Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 5, 2025

ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

Петрозаводск
2025

Научный журнал
Труды Карельского научного центра Российской академии наук
№ 5, 2025
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

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; И. В. ДРОБЫШЕВ, доктор биологии (Швеция – Канада); Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; Х. ЙООСТЕН, доктор биологии, проф. (Германия); А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Н. В. ЛУКИНА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, академик РАН, д. б. н., проф.; О. ОВАСКАЙНЕН, доктор математики, проф. (Финляндия); О. Н. ПУГАЧЕВ, академик РАН, д. б. н.; С. А. СУББОТИН, доктор биологии (США); Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Т. Э. ХАНГ, доктор географии (Эстония); П. ХЁЛЬТТЯ, доктор геологии, проф. (Финляндия); К. ШАЕВСКИЙ, доктор математики, проф. (Польша); В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия серии «Геология докембрия»

Ю. Л. ВОЙТЕХОВСКИЙ, д. г.-м. н., проф.; О. И. ВОЛОДИЧЕВ, д. г.-м. н.; В. В. КОВАЛЕВСКИЙ, д. г.-м. н.; А. Б. КУЗНЕЦОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; Ю. А. МОРОЗОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; А. В. ПЕРВУНИНА, к. г.-м. н.; А. М. ПЫСТИН, 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., проф.; Е. Н. СВЕТОВА (ответственный секретарь), к. г.-м. н.; А. И. СЛАБУНОВ, д. г.-м. н.; А. СОЭСОО, доктор геологии, проф. (Эстония); А. В. СТЕПАНОВА, к. г.-м. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.; 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», 2025
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2025

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

of the KARELIAN RESEARCH CENTRE of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES

No. 5, 2025

PRECAMBRIAN GEOLOGY

Petrozavodsk
2025

Scientific Journal
Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
No. 5, 2025
PRECAMBRIAN GEOLOGY

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

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

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); I. V. DROBYSHEV, PhD (Biol.) (Sweden – Canada); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; T. E. HANG, PhD (Geog.) (Estonia); P. HÖLTTÄ, PhD (Geol.), Prof. (Finland); E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; H. JOOSTEN, Dr. (Biol.), Prof. (Germany); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); N. V. LUKINA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; O. OVASKAINEN, PhD (Math.), Prof. (Finland); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SUBBOTIN, PhD (Biol.) (USA); D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); K. SZAJEWSKI, PhD (Math.), Prof. (Poland); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the Experimental «Precambrian Geology» Series

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

Published since January 2009

8 issues a year

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, 2025
© Institute of Geology, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2025

От редактора

В этом выпуске мы публикуем объемную и содержательную статью о минерально-сырьевой базе металлов докембрия Республики Карелия. Обзорный характер статьи позволяет оценить минерально-сырьевой потенциал металлических полезных ископаемых региона с позиций исторических сведений, нового фактического материала и разработки стратегического подхода к оценке доступности, характеризующей возможность их эффективного и безопасного использования в зависимости от состояния ресурсов, потребности в них, достигнутого технологического уровня и экономической целесообразности. Продолжение обзора, с включением важных данных о карельских месторождениях промышленных минералов, редкоземельных элементов и редких металлов, природных строительных материалов, планируется в следующем выпуске серии «Геология докембрия».

В номер также вошел ряд кратких научных сообщений российских и зарубежных специалистов в области геологии докембрия, представляющих, помимо Института геологии КарНЦ РАН, Институт земной коры СО РАН (Иркутск), Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), Институт геологии и геохимии УрО РАН им. А. Н. Заварицкого (Екатеринбург), Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (Москва), Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И. С. Грамберга (Санкт-Петербург), Санкт-Петербургский государственный университет, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург), Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН (Апатиты). Сообщения были инициированы проведением в августе в г. Петрозаводске международной научной конференции «Докембрийский саммит-2025» (Precambrian Summit-2025), посвященной ранней истории планеты.

Геологию докембрия изучают не так много ученых в нашей стране. Тема эта достаточно серьезная, специалистов мало, и наконец-то произошло официальное мероприятие, которое позволило вернуться к дискуссии. С учетом того, что в журнале «Труды Карельского научного центра РАН» регулярно публикуются статьи серии «Геология докембрия», редакционная коллегия решила опубликовать актуальные научные работы по докембрийской геологии, авторами которых в ряде случаев являются видные ученые-докембристы, участники прошедшего саммита. В России это единственный журнал, в котором освещается докембрийская проблематика на протяжении более десяти лет.

Отдельное место в выпуске занимает статья о ветеранах Великой Отечественной войны, в разное время трудившихся в Институте геологии Карельского научного центра, вошедшая в этот номер в связи с 80-летием Великой Победы.

Ответственный редактор серии «Геология докембрия»
В. В. Щипцов

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 6–38
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 6–38
DOI: 10.17076/geo2145

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ
Reviews

УДК 553.04 (470.22)

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА КАРЕЛИИ: МЕТАЛЛЫ

В. В. Щипцов[1,2]*, С. А. Светов[1]

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

С учетом исторических данных, нового фактического материала и результатов современных исследований, полученных специалистами Института геологии КарНЦ РАН, ПГО «Севзапгеология», ВСЕГЕИ, ИГГД РАН, ВИМС, СПбГУ, ПО «Невскгеология», АО «Полиметалл», дана обобщенная оценка минерально-сырьевой базы металлов Республики Карелия. Приведены сведения об истории освоения и использования недр территории, выделены основные рудные объекты металлов Республики Карелия. Охарактеризован Костомукшский рудный район, включающий Костомукшское и Корпангское железорудные поля с серией месторождений и проявлений железных руд. Приведены данные по окисным малосульфидным титаномагнетитовым рудам Пудожгорского месторождения ликвационно-магматического генезиса в границах Бураковского лополита по Аганозерскому месторождению хромовых и никелевых руд и Шалозерскому проявлению хромовых руд с попутной благороднометалльной минерализацией. Охарактеризован ванадий-урановый рудный тип с карбонатно-слюдистыми метасоматитами и слюдитами Онежского рудного района на примере месторождения Средняя Падма. Дано описание молибден-рениевого месторождения Лобаш, одного из крупнейших в мире молибден-порфировых месторождений архейского возраста с благоприятными горнотехническими условиями для отработки открытым способом. К экономически важным отнесены медно-золоторудное месторождение Лобаш-1, золото-кварцевые месторождения Майское и Эльмусское, золоторудное проявление Таловейс, а также крупное Кительское месторождение олова в западной олово-полиметаллической подзоне Салминско-Уксинско-Кительской рудной зоны. Приводится информация о первом на территории Карелии промышленно перспективном платинометалльном объекте Викша и платино-палладиевом проявлении Луккулайсваара в расслоенных интрузивах рифтогенной структуры Куусамо-Паанаярви-Ципринга. В Приладожье в рифейских альбит-карбонатно-слюдистых метасоматитах изучено месторождение Карку урановой формации типа «несогласия».

Ключевые слова: минерально-сырьевая база; металлы; месторождения; проявления; недра; Фенноскандинавский щит; докембрий

Для цитирования: Щипцов В. В., Светов С. А. Минерально-сырьевая база Карелии: металлы // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 6–38. doi: 10.17076/geo2145

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

V. V. Shchiptsov[1,2]*, S. A. Svetov[1]. KARELIA'S PROVEN MINERAL RESOURCES: METAL ORES

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

Historical data, new findings and latest research results are combined to produce an updated assessment of the mineral resources of metals in the Republic of Karelia. The factual background for the study is the results of the assessments of strategically and economically important deposits and large manifestations of metals in the Republic of Karelia done by specialists of the IG KarRC RAS, PGO Sevzapgeologiya, VSEGEI, IGGD RAS, VIMS, St. Petersburg State University, PO Nevskgeologiya, and JSC Polymetal. General information is provided on the history of subsoil use in the republic in the past. It is emphasized that the geological structure and formation history of useful minerals reflects various successive stages of the development of the Precambrian Earth's crust in the region. Specifically, attention is given to the relationship between tectonic movements, deep-seated processes and geological events which determined the specific features of the geodynamic processes in the eastern part of the Fennoscandian Shield. Karelia's main metal ore objects are named, such as the Kostomuksha ore district, which includes the Kostomuksha and Korpanga iron ore fields with a series of deposits and occurrences of iron ores and is part of the Severostal business ecosystem. Much emphasis is placed on the oxide low-sulfide titanomagnetite ores of the Pudozhgorskoye deposit of liquation-magmatic genesis within Burakovskiy lopolith boundaries, Aganozerskoye deposit of chromium and nickel ores, and Shalozerskoye occurrence of chromium ores with the associated precious metal mineralization. The vanadium-uranium ore type with carbonate-mica metasomatites and micas of the Onega ore region is characterized through the case of the Srednyaya Padma deposit. It is mentioned that the Lobash molybdenum-rhenium deposit is one of the world's largest molybdenum-porphyry deposits of Archean age with favorable conditions for its open-pit mining. Economically important mineral resources include the Lobash-1 copper-gold deposit, the Maiskoye gold-quartz deposit, the Elmus gold ore cluster, and the Taloveis gold occurrence. The large Kitelskoye tin deposit in European Russia is located in the western tin-polymetallic subzone of the Salmi-Uksinsko-Kitelskaya ore zone. The first industrially promising platinum metal site, Viksha, was discovered in Karelia, and the Lukkulaisvaara platinum-palladium occurrence was found in layered intrusions in the Kuusamo-Paanajarvi-Tsipringa rift structure. In the Ladoga region, the Karku deposit of an "unconformity"-type uranium formation was studied in Riphean albite-carbonate-mica metasomatites.

Keywords: proven mineral resources; metals; deposits; occurrences; subsoil; Fennoscandian Shield; Precambrian

For citation: Shchiptsov V. V., Svetov S. A. Karelia's proven mineral resources: metal ores. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 6–38. doi: 10.17076/geo2145

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

Введение

Современная оценка минерально-сырьевой базы металлов Республики Карелия является важной составляющей общей оценки социально-экономического потенциала региона. Необходимость в ней существовала всегда по мере получения нового фактического материала и пересмотра старых предположений на основе результатов исследований с применением современных методов, ведущихся специалистами Института геологии КарНЦ РАН, а также ПГО «Севзапгеология», ВСЕГЕИ, ИГГД РАН, ВИМС, СПбГУ, ПО «Невскгеология», АО «Полиметалл».

Указом президента от 27 июня 2017 г. территория Лоухского, Кемского и Беломорского муниципальных районов Республики Карелия включена в состав Арктической зоны РФ, а в 2020 году к Карельской Арктике дополнительно отнесены территории Сегежского, Калевальского муниципальных районов и Костомукшского городского округа в соответствии с Федеральным законом от 13 июля 2020 года № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне

Российской Федерации». В настоящей статье определяется роль и значение месторождений и крупных проявлений металлов Карельской Арктики в ресурсной базе Арктической зоны Российской Федерации.

Основными сводными материалами по месторождениям и проявлениям металлов в регионе являются монографии «Металлогения Карелии» [1982, 1999], «Недра Северо-Запада Российской Федерации» [Журавлев и др., 2003], «Минерально-сырьевая база Республики Карелия» [2005], «Минерально-сырьевые ресурсы Республики Карелия» [Голубев и др., 2011]; «Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia» [2012].

История горнорудного дела в Карелии

Заселение Севера неразрывно связано с историей освоения и использования природных ресурсов в России. Северные земли являлись составной частью древнерусского государства, возникшего в IX веке. Первые русские мореплаватели на побережье Белого и Баренцева морей, называвшихся Студеным морем, появились в X веке. Примерно с этого времени и началось освоение минерально-сырьевых ресурсов Севера, в частности, с зарождения масштабного по тем временам слюдяного промысла и производства соли-«морянки» в Поморье. «Солнечные» солеварни располагались в мелководных бухтах Белого моря, к XVIII в. по его побережью работали десятки соляных варниц, в большинстве своем принадлежавших Соловецкому монастырю. До 50 % всей соли выварилось в деревне Ненокса (Архангельская область), где «крепость» соляных растворов была значительно выше, чем в других местах.

Существовали и более экзотические промыслы – так, на северных реках велась добыча жемчуга, а на Терском берегу Белого моря с XV века – аметиста.

Но самыми значимыми среди всех полезных ископаемых в тот период были металлы. Уже велась разработка меди, но основное внимание уделялось железу. Благодаря широкому распространению на территории Карелии озерных (болотных) железных руд, с достаточными запасами, еще в допетровское время была организована их активная добыча и переработка. Создание Петровской слободы, впоследствии города Петрозаводска, стало прямым следствием активного развития железорудного производства, инициированного Петром I в регионе.

Существует много исторических свидетельств об использовании железа местным населением. Так, деревня Костомукша (современный горнорудный центр Республики Карелия) издавна славилась мастерами железоделательного производства. Можно обоснованно говорить, что на территории современного Костомукшского ГОКа сотни лет назад местные жители добывали болотную железную руду. Именно там были построены кузницы для получения и ковки железа. Основным же местом добычи и выплавки руды являлось местечко Хейкин Ахо, где сейчас находится Центральный карьер ГОКа.

Карельская топонимика также сохранила многочисленные указания на присутствие железных руд (бобовых, корковых или монетных) в регионе. Например, часто встречаются в географических названиях топонимы Раутосуо (железное болото), Раутаваара (железная гора), Руостеойя (ржавый ручей).

Важно, что Карелия стала родиной и первого российского золота, местом, где был заложен первый в стране (в 1744 г.) золотодобывающий Воицкий рудник. На Урале золото найдут только через год, а знаменитые Березовские казенные золотые промыслы будут основаны еще позже – в 1752 году. Сохранились планы Воицкого рудника, схемы расположения главной разрабатываемой жилы. На руднике существовало несколько штолен (одна из них была с шахтой глубиной около 17 м), оборудованных передовой по тем временам системой вентиляции и подъемниками руды с использованием паровых машин. Воицкое месторождение уже в те далекие годы разрабатывалось как комплексное – медно-сульфидное. В те времена, когда еще только формировалась идеология и методология горных работ, масштаб рудных тел не имел большого значения, разрабатывались небольшие, богатые по содержанию рудные обьекты. Минеральный состав рудных жил был преимущественно халькопиритовый и халькопирит-борнитовый.

Новый эпизод развития горнорудного дела в регионе связан с изучением и попытками использования высокоуглеродистых осадочных пород Заонежского полуострова – шунгитов. Практическое использование выветрелых (рыхлых) шунгитоносных пород началось с применения их в качестве смазки для осей мельничных жерновов, тележных колес и краски. Чуть позже, при Петре I, аспидный сланец (шунгит) использовался в качестве облицовочного камня при оформлении отдельных деталей архитектурных сооружений. Лишь в 1860 году, после того как академик Г. П. Гельмерсен описал древние глинистые черные сланцы Олонии, изобилующие графитом, была сформирована научная основа для всего дальнейшего исследования высокоуглеродистых пород Карелии.

Важной вехой в освоении северных «подземных кладовых» стало создание «Комиссии по изучению естественных производительных сил России» (КЕПС) в 1915 г. при Императорской Петербургской Академии наук, а также реализация в стране крупных инфраструктурных проектов – строительство Мурманской железной дороги. В ходе строительных работ в 1916 г. были вскрыты слюдоносные пегматитовые жилы. А уже в 1919 г. КЕПС была подготовлена сводка по месторождениям слюды [Гинзбург, 1919], в которой описаны как участки исторической слюдодобычи в Керетско-Кандалакшском округе, так и новые площади, и даны рекомендации по методам их отработки.

В XX веке формируется новый тренд поисковых работ. Стране нужен титан, ванадий, никель, хром и другие металлы. В 1936 году Ю. С. Неуструевым выявлен и изучен Елетьозерский дифференцированный массив с титановым оруденением, а уже после войны, в период с 1954 по 1956 г. Северо-Западным геологическим управлением проведены поисково-оценочные работы, основным результатом которых стал подсчет запасов титановых руд по категориям С1 и С2 на участке Суриваара. Позже детальное изучение геологии, петрографии и рудоносности массива проводилось сотрудниками Геологического отдела Карельского филиала АН СССР в 1954–1959 гг. [Богачев и др., 1963].

В 1934 году управлением Беломорско-Балтийского канала НКВД открыто Пудожгорское месторождение титаномагнетитовых (Ti-V-Fe) руд. Параллельно с проведением геологоразведочных работ создается Центральная химическая лаборатория, формируется дирекция будущего ГОКа, строится причальный комплекс на Онежском озере, начинается проектирование институтом «Гипроруда» металлургического комбината. Эксплуатации месторождения помешала Великая Отечественная война… Уже позже в Восточной Карелии были обнаружены Аганозерское месторождение хромовых руд, Бураковское месторождение и многие другие масштабные объекты.

За все время существования горнорудного дела в Карелии менялись приоритеты, территориальные векторы поиска и добычи сырья. Исследования смещались с Северной Карелии на восточные и западные ее части. Важный вектор развития горной отрасли связан с горным комплексом Приладожья, регионом, где активно добывалось железо, олово, серебро, графит и блочный камень – гранит, мрамор [Дорога…, 2014].

В недавнем прошлом развитию горнорудной отрасли способствовало обнаружение кианитовых проявлений в Карелии. Причем развитие экономики страны полностью меняло перспективы использования кианита, от сырья для получения алюминия, силумина, до огнеупоров и керамики.

Отмеченные исторические вехи развития горнорудной отрасли во многом определили современный и закладывают будущий вектор развития Карелии, ее экономические перспективы.

Минерально-сырьевая база Карелии

Минерально-сырьевая база является основой экономического благополучия страны, донором российской экономики, обеспечивающим ее развитие и переход на новый технологический уклад [Козловский, 2015; Миронов, 2021; Горячев и др., 2022]. Начнем с того, что такое руда. Руда – это минеральное вещество, из которого технологически возможно, экономически и экологически рентабельно извлекать металлы или минералы для использования в народном хозяйстве. В мировой практике большая группа минеральных полезных ископаемых выделяется под названием «industrial minerals».

К докембрийским комплексам Фенноскандинавского щита приурочена обширная группа полезных ископаемых, локализация которых является следствием взаимодействия многих процессов, от вулканизма, магматизма, метаморфизма до тектоники. Причем ключевое значение в формировании рудных концентраций отводится геодинамическим режимам корообразования [Связь…, 2008; Онежская…, 2011; Костомукшский…, 2015; Ладожская…, 2020], затрагивающим и корово-мантийный уровень [Москалева и др., 1993; Металлогения…, 1999; Митрофанов и др., 2012; Кольская…, 2023].

В кадастр минерально-сырьевой базы Республики Карелия входят месторождения и значимые проявления металлических полезных ископаемых и промышленных минералов, локализованных в докембрийских комплексах юго-восточной и восточной части Фенноскандинавского щита (черные, цветные, благородные, урановые, редкие и редкоземельные металлы и промышленные минералы) [Журавлев и др., 2003; Минерально-сырьевая…, 2005, 2006; Mineral…, 2012; Gautneb et al., 2013; Иващенко, Щипцов, 2018; Щипцов и др., 2020]. Наиболее значимые месторождения и проявления черных, цветных, благородных металлов и урановых руд Республики Карелия отражены на схеме (рис. 1), при этом промышленные минералы, представленные самородными элементами, силикатами, кремнеземом, карбонатами, окислами, сульфидами и фторидами, будут детально рассмотрены в отдельной статье о промышленных минералах Карелии.

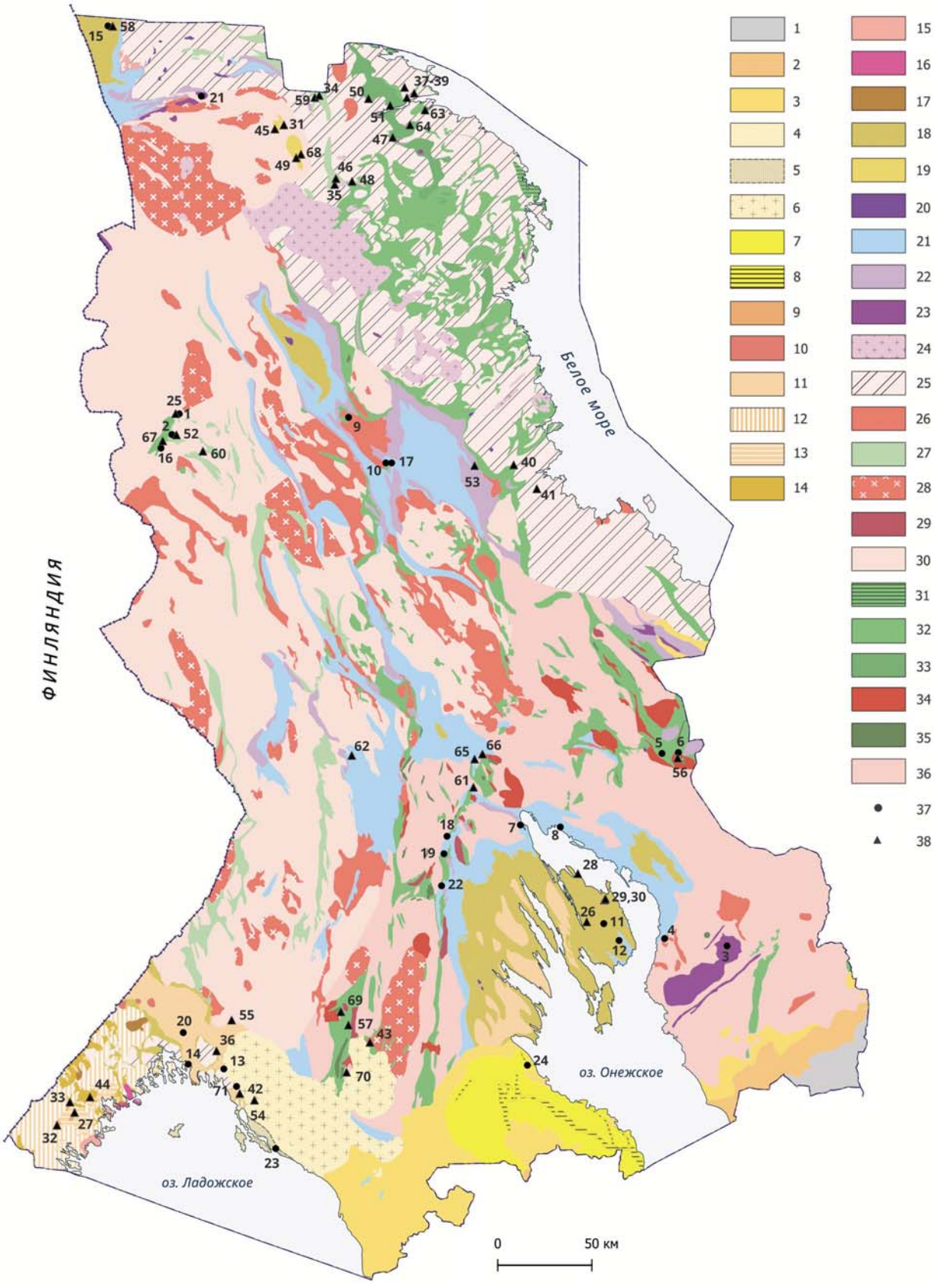


Рис. 1. Размещение месторождений и крупных проявлений металлов и промышленных минералов Республики Карелия (с использованием обзорной геологической карты Юго-Восточной Фенноскандии [Куликов и др., 2017])

Fig. 1. Location of the deposits and large occurrences of metals and industrial minerals in the Republic of Karelia (with the use of the overview geological map of Southeastern Fennoscandia [Kulikov et al., 2017])

Условные обозначения к рис. 1 / Legend for Fig. 1:

Фанерозой (< 0,54 млрд лет) Палеозой / Phanerozoic (< 0.54 Ga) Paleozoic

1 – карбон (0,36–0,3 млрд лет) песчаники, глины, доломиты, известняки / Carboniferous (0.36–0.3 Ga) sandstones, clays, dolomites, limestones

2 – девон (0,48–0,36 млрд лет) песчаники, конгломераты, глины / Devonian (0.48–0.36 Ga) sandstones, conglomerates, clays

Протерозой (2,54–0,54 млрд лет) Неопротерозой / Proterozoic (2.54–0.54 Ga) Neoproterozoic

3 – венд (0,64–0,54 млрд лет) песчаники, глины, алевролиты, аргиллиты, туффиты, конгломераты / Vendian (0.64–0.54 Ga) sandstones, clays, siltstones, mudstones, tuffites, conglomerates

4 – верхний и средний рифей (1,35–0,64 млрд лет) аргиллиты, песчаники / Upper and Middle Riphean (1.35–0.64 Ga) mudstones, sandstones

Мезопротерозой / Mesoproterozoic

5 – нижний рифей (1,65–1,35 млрд лет) аркозовые песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты, базальты, андезибазальты, габбродолериты, сиениты / Lower Riphean (1.65–1.35 Ga) arkosic sandstones, siltstones, mudstones, conglomerates, basalts, basaltic andesites, gabbrodolerites, syenites

6 – нижний рифей (1,65–1,35 млрд лет) граниты рапакиви, литий-фтористые граниты, анортозиты / Lower Riphean (1.65–1.35 Ga) rapakivi granites, lithium-fluoride granites, anorthosites

Палеопротерозой / Paleoproterozoic

7 – вепсий (1,8–1,65 млрд лет) красноцветные и сероцветные кварцитопесчаники, конгломераты / Vepsian (1.8–1.65 Ga) red- and grey-colored quartzite sandstones, conglomerates

8 – вепсий (1,77–1,75 млрд лет) габбродолериты, долериты / Vepsian (1.77–1.75 Ga) gabbro-dolerites, dolerites

9 – вепсий (1,8–1,65 млрд лет) граниты (1,79 млрд лет) / Vepsian (1.8–1.65 Ga) granites (1.79 Ga)

10 – вепсий (1,8–1,65 млрд лет) монцогаббро, сиениты, калиевые граниты (1,87–1,77 млрд лет) / Vepsian (1.8–1.65 Ga) monzogabbro, syenites, potassic granites (1.87–1.77 Ga)

11 – калевий (1,92–1,8 млрд лет) песчаники, алевролиты, кварциты, аргиллиты, углеродистые породы / Kalevian (1.92–1.8 Ga) sandstones, siltstones, quartzites, mudstones, carbonaceous rocks

12 – калевий (1,92–1,8 млрд лет) кристаллические сланцы, биотитовые гнейсы / Kalevian (1.92–1.8 Ga) crystalline schists, biotite gneisses

13 – калевий (1,92–1,8 млрд лет) гранулиты, эндербиты, чарнокиты (1,88 млрд лет) / Kalevian (1.92–1.8 Ga) granulites, enderbites, charnockites (1.88 Ga)

14 – калевий (1,92–1,8 млрд лет) пироксениты, габбро, монцониты (1.89–1.88 млрд лет) / Kalevian (1.92–1.8 Ga) pyroxenites, gabbros, monzonites (1.89–1.88 Ga)

15 – калевий (1,92–1,8 млрд лет) диориты, тоналиты / Kalevian (1.92–1.8 Ga) diorites, tonalites

16 – калевий (1,92–1,8 млрд лет) монцодиориты, гранодиориты, граниты (1,87 млрд лет) / Kalevian (1.92–1.8 Ga) monzodiorites, granodiorites, granites (1.87 Ga)

17 – калевий (1,92–1,8 млрд лет) калиевые граниты, граниты, пегматиты (1,86–1,82 млрд лет) / Kalevian (1.92–1.8 Ga) potassium granites, granites, pegmatites (1.86–1.82 Ga)

18 – людиковий (2,1–1,92 млрд лет) базальты, пикриты, андезибазальты, габбродолериты, шунгиты, песчаники, сланцы, конгломераты, доломиты / Ludicovian (2.1–1.92 Ga) basalts, picrites, andesite-basalts, gabbro-dolerites, shungites, sandstones, shales, conglomerates, dolomites

19 – людиковий (2,1–1,92 млрд лет) феррогаббро, пироксениты, оливиниты, нефелиновые сиениты, карбонатиты (2,0 млрд лет) / Ludicovian (2.1–1.92 Ga) ferrogabbro, pyroxenites, olivinites, nepheline syenites, carbonatites (2.0 Ga)

20 – людиковий (2,1–1,92 млрд лет) перидотиты, габбро (1,98–1,96 млрд лет) / Ludicovian (2.1–1.92 Ga) peridotites, gabbro (1.98–1.96 Ga)

21 – ятулий (2,3–2,1 млрд лет) кварцитопесчаники, конгломераты, доломиты, соли, базальты, габбродолериты / Jatulian (2.3–2.1 Ga) quartzite sandstones, congomerates, dolomites, salts, basalts, gabbrodolerites

22 – сариолий + сумий (2,5–2,3 млрд лет) конгломераты, песчаники, кварциты, аркозы, сланцы, коматиитовые базальты (2,41 млрд лет), андезибазальты, дациты, риолиты (2,44 млрд лет) / Sariolian + Sumian (2.5–2.3 Ga) conglomerates, sandstones, quartzites, arkoses, shales, komatiite basalts (2.41 Ga), basaltic andesites, dacites, rhyolites (2.44 Ga)

23 – сариолий + сумий (2,5–2,3 млрд лет) расслоенные интрузивы (2,51–2,40 млрд лет), перидотиты, пироксениты, нориты, диориты / Sariolian + Sumian (2.5–2.3 Ga) layered intrusions (2.51–2.40 Ga), peridotites, pyroxenites, norites, diorites

24 – сариолий + сумий (2,5–2,3 млрд лет) чарнокиты, граниты (2,43–2,42 млрд лет) / Sariolian + Sumian (2.5–2.3 Ga) charnockites, granites (2.43–2.42 Ga)

25 – сариолий + сумий (2,5–2,3 млрд лет) архейские образования, интенсивно переработанные в палеопротерозое / Sariolian + Sumian (2.5–2.3 Ga) Archean formations, intensively reworked in the Paleoproterozoic

Архей (3,8 – 2,5 млрд лет) Неоархей / Archean (3.8–2.5 Ga) Neoarchean

26 – (2,7–2,6 млрд лет) гранодиориты, граниты (2,69–2,67 млрд лет) / (2.7–2.6 Ga) granodiorites, granites (2.69–2.67 Ga)

27 – (2,8–2,7 млрд лет) метаосадки, железистые кварциты и метавулканиты разного состава / (2.8–2.7 Ga) metasediments, ferruginous quartzites and metavolcanics of various compositions

28 – (2,8–2,7 млрд лет) санукитоиды (2,75–2,72 млрд лет) / (2.8–2.7 Ga) sanukitoids (2.75–2.72 Ga)

29 – (2,8–2,7 млрд лет) нерасчлененные гранитоиды / (2.8–2.7 Ga) undifferentiated granitoids

30 – (2,8–2,7 млрд лет) нерасчлененные тоналиты, трондъемиты, гранодиориты архея (3,0–2,75 млрд лет) / (2.8–2.7 Ga) undifferentiated tonalites, trondhjemites, granodiorites of the Archean (3.0–2.75 Ga)

31 – (2,8–2,7 млрд лет) эклогитсодержащие комплексы / (2.8–2.7 Ga) eclogite-bearing complexes

Мезоархей / Mesoarchean

32 – (3,0–2,8 млрд лет) метаосадки, вулканиты (коматииты, базальты, андезиты, дациты, риолиты) / (3.0–2.8 Ga) metasediments, volcanics (komatiites, basalts, andesites, dacites, rhyolites)

33 – (3,0–2,8 млрд лет) парагнейсы / (3.0–2.8 Ga) paragneisses

34 – (3,0–2,8 млрд лет) граниты и палеограниты / (3.0–2.8 Ga) granites and paleogranites

35 – (3,2–2,8 млрд лет) интрузивы ультрамафитов и мафитов, диориты (2,99–2,92 млрд лет) / (3.2–2.8 Ga) ultramafic and mafic intrusions, diorites (2.99–2.92 Ga)
36 – (3,2–2,8 млрд лет) древнейшие ТТГ и амфиболиты (3,3–2,9 млрд лет) / (3.2–2.8 Ga) ancient TTG and amphibolites (3.3–2.9 Ga)

37 – Месторождения и рудопроявления металлов / Deposits and ore occurrences of metals

38 – Месторождения и проявления промышленных минералов / Deposits and ore occurrences of industrial minerals

Металлы. *Черные: железо* (1) Корпанга, (2) Костомукша, (14) Велимяки; *хром* (3) Аганозеро; *титан* (4) Пудожгорское. *Цветные: никель* (5) Золотопорожское, (6) Светлоозерское; *медь* (7) Воронов Бор, (8) Восточно-Повенецкое; *молибден* (9) Пяявара, (10) Лобаш; *ванадий* (11) Средняя Падма, (12) Царевское; *олово* (13) Кительское; *Благородные: золото* (15) Майское, (16) Таловейс, (17) Лобаш 1, (18) Педролампи, (19) Эльмус, (20) Алатту; *платина* (21) Луккулайсвара, (22) Викша. *Уран* (23) Карку, (24) Птицефабрика.

Промышленные минералы. *Самородные элементы: алмаз* (25) Луупеансуо, (26) Кимозеро; *графит* (27) Ихальское, (55) Полвилампи; *шунгит* (28) Шуньгское, (29) Максовское, (30) Зажогинское; *апатит* (31) Карбонатитовое, (32) Райвимяки, (33) Кайвомяки; *гранат* (34) Униярви, (35) Высота-181, (36) Кителя; *полевой шпат пегматитовый* (37) Блинковые Вараки, (38) Хетоламбина, (39) Уракка, (40) Торлов Ручей, (41) Слюдяной Бор, (42) Люпикко, (43) Кюрьяла, (44) Яккима; *оливин* (45) Шапкоозерское; *кианит* (46) Хизоваарское; *мусковит* (47) Слюдозеро, (48) Межозерное; *полевой шпат нетрадиционный* (49) Нижнее (нефелин, полевой шпат), (50) Нижнекотозерское (анортозит), (51) Озеро Долгое (полевой шпат, кварц), (52) Костомукшское (полевой шпат), (53) Роза Лампи (микроклин), (54) Юка-Коски (полевой шпат); *тальк-магнезит, тальк* (56) Светлоозерское, (57) Игнойла; *кремнезем* (58) Майское (кварц), (59) Степаново Озеро (кварц, кварциты), (60) Меломайс (кварц), (61) Фенькина Лампи, (62) Метчангъярви (кварциты), (63) Климовский (отвалы пегматитового кварца), (64) Плотина (отвалы пегматитового кварца; *тальковый камень* (65) Турган-Койван-Аллуста, (66) Каллиево-Муренен-ваара, (67) Озерки; *ильменит* (68) Суривара; *пирит* (*серный колчедан*) (69) Хаутаваарское, (70) Нильмозерское; *флюорит* (71) Хопунваара.

Metals. *Ferrous: iron* (1) Korpanga, (2) Kostomuksha, (14) Velimäki; *chromium* (3) Aganozero; *titanium* (4) Pudozhgorskoye. *Non-ferrous: nickel* (5) Zolotoporozhskoe, (6) Svetloozerskoe; *copper* (7) Voronov Bor, (8) Vostochno-Povenetskoe; *molybdenum* (9) Pyayavara, (10) Lobash; *vanadium* (11) Srednaya Padma, (12) Tsarevskoe; *tin* (13) Kitelskoe. *Noble: gold* (15) Mayskoe, (16) Taloveys, (17) Lobash 1, (18) Pedrolampi, (19) Elmus, (20) Alattu; *platinum* (21) Lukulaisvara, (22) Viksha. *Uranium* (23) Karku, (24) Ptitsefabrika.

Industrial minerals. *Naturally occurring elements: diamond* (25) Luupeansuo, (26) Kimozero; *graphite* (27) Ihalskoe, (55) Polvilampi; *shungite* (28) Shungskoe, (29) Maksovskoe, (30) Zazhoginskoe; *apatite* (31) Karbonatitovoe, (32) Raivimäki, (33) Kaivomäki; *garnet* (34) Unijärvi, (35) Vysota-181, (36) Kitelya; *feldspar (pegmatite)* (37) Blinky Varaki, (38) Hetalambina, (39) Urakka, (40) Torlov Ruchey, (41) Slyudyanoy Bor, (42) Lyupikko, (43) Kyuryala, (44) Yakkima; *olivine* (45) Shapkoozerskoye; *kyanite* (46) Khizovaarskoye; *muscovite* (47) Slyudozero, (48) Mezhozernoye; *feldspar (unconventional)* (49) Nizhneye (nepheline, feldspar), (50) Nizhnekotozerskoye (anorthosite), (51) Lake Dolgoye (feldspar, quartz), (52) Kostomukshskoye (feldspar), (53) Rosa Lampi (microcline), (54) Yuka-Koski (feldspar); *talc-magnesite, talc* (56) Svetloozerskoye, (57) Ignoila; *silica* (58) Mayskoye (quartz), (59) Stepanovo Ozero (quartz, quartzites), (60) Melomais (quartz), (61) Fenkina Lampi, (62) Metchangjärvi (quartzites), (63) Klimovsky (pegmatite quartz dumps), (64) Plotina (pegmatite quartz dumps); *talc stone* (65) Turgan-Koivan-Allusta, (66) Kallievo-Murenenvaara, (67) Ozerki; *ilmenite* (68) Surivara; *pyrite (sulphur pyrite*) (69) Hautavaara, (70) Nilmozerskoye; *fluorite* (71) Hopunvaara

Достижения в области минерагенического изучения региона отражены на многочисленных картографических изданиях, среди которых стоит отметить Карту металлов и промышленных минералов Фенноскандинавского щита, составленную в рамках международного проекта FODD – Metallogenic Map of the Fennoscandian Shield 1:2 000 000, Industrial Mineral Deposit Map of the Fennoscandian Shield 1:2 000 000, а также карту полезных ископаемых в новом переработанном издании Атласа Республики Карелия [Щипцов, 2021].

В последние годы проведена активная работа по изучению закономерностей формирования и размещения полезных ископаемых в условиях постоянного обновления данных о геологическом строении и минерагеническом потенциале региона [Щипцов, 2024а, б].

Современные экономические подходы к полезным ископаемым и процессам их переработки позволяют выделять следующие составляющие минерально-сырьевой иерархии региона: непосредственно минеральное сырье, минерально-сырьевую базу и минерально-сырьевой комплекс [Щипцов, 2024а, б]. К первой группе относится минеральное сырье, представленное десятками видов полезных ископаемых, технически доступных и экономически рентабельных для промышленного использования в настоящее время или в перспективе. Минерально-сырьевая база включает более широкое понятие, охватывающее геологические территории, на которых выявлены дефицитные рудные комплексы с определенными промышленными запасами и ресурсами минерального сырья, отвечающего стандартам качества, и включающие благоприятную транспортную и социальную инфраструктуру. К подобным объектам минерально-сырьевой базы могут быть отнесены крупные рудные районы – Тикшеозерско-Елетьозерский, Хизоваарский, Толвуйский шунгитовый и Ихальский графитовый.

Минерально-сырьевой комплекс представляет собой уже совокупность отраслей промышленности и прочих сфер хозяйственной деятельности – торговли, логистики, финансов и т. д., служащих для обеспечения потребностей человечества в минеральном сырье. Структура комплексов включает геологоразведочное и горное производство, металлургию, химический и пр. передел с последовательными товарными и раздельными потоками. Ярким примером минерально-сырьевого комплекса в Карельской Арктике может служить Костомукшский рудный район [Костомукшский..., 2015], где ведется одновременная отработка Костомукшского и Корпангского месторождений железных руд силами ОАО «Карельский окатыш» и переработка руд.

В данной статье рассматривается и обобщается материал по ключевым месторождениям и крупным проявлениям черных, цветных, благородных металлов и урановых руд Республики Карелия.

Месторождения железа

Россия обладает второй в мире по объему (после Австралии) сырьевой базой железных руд. По выпуску железорудной продукции (концентратов, окатышей, агломератов и продуктов прямого восстановления железа) Россия занимает 5-е место среди стран-производителей [Государственный..., 2024].

Основным источником железорудного сырья в мире (как и в России) являются месторождения железистых кварцитов, образующие крупные железорудные районы.

Освоение крупных по запасам титаномагнетитовых месторождений сдерживается отсутствием в России промышленных технологий эффективного передела высокотитанистых титаномагнетитовых концентратов, получаемых на объектах такого типа. В 1945–1946 гг. на территории Карелии была поставлена аэромагнитная съемка общей площадью около 112 тыс. кв. км, в результате которой было открыто 40 магнитных аномалий – Костомукшская, Гимольская, Межозерская, Хедозеро-Большеозерская, Тумбареченская, Воломская, Совдозерская и другие [Костомукшский..., 2015]. Впоследствии в пределах Карельского кратона Фенноскандинавского щита, сложенного архейскими и протерозойскими комплексами пород, перекрытых маломощным чехлом четвертичных образований, с учетом геохронологических данных было определено возрастное положение гранит-зеленокаменных поясов, с которыми связано формирование разновозрастных ассоциаций железистых кварцитов (BIF-banded iron formation) [Горьковец и др., 1981, 1991; Костомукшский..., 2015; Слабунов и др., 2023, 2024]. Например, комплекс Костомукшского гранит-зеленокаменного пояса состоит из двух стратотектонических серий: контокской и гимольской [Горьковец и др., 1981]. В их составе выделяются разновозрастные ассоциации BIF: мезоархейская с возрастом 2,87–2,81 и 2,8–2,79, а также неоархейская с возрастом 2,76–2,74 [Слабунов и др., 2023].

Железисто-кремнистые образования (железистые кварциты и магнетитовые сланцы) в ассоциации с вулканогенными, вулканогенно-осадочными и осадочными архейскими комплексами были метаморфизованы и превращены в железные руды в различных структурах. В настоящее время широко развивается модель образования BIF в результате окисления растворенного в морской воде двухвалентного железа за счет кислорода, который продуцировался цианобактериями в условиях бескислородной атмосферы, появилась гипотеза об источнике железа, связанном с подводными гидротермами, аналогами современных черных курильщиков [Bekker, Kovalick, 2021]. Это позволяет развивать представления о генезисе архейских железорудных месторождений.

В пределах Западно-Карельской и Центрально-Карельской зон Карельского кратона располагаются все железорудные месторождения с промышленными запасами железных руд и ряд мелких месторождений неоархейского возраста. На рис. 2 показана схема Костомукшского рудного поля.

Костомукшское месторождение

Наиболее ранние сведения о геологическом строении Костомукшского района появились еще во второй половине XIX века. Главный этап его изучения начался с 1945 года [Открытие..., 2014]. В пределах Костомукшского рудного района выделены Костомукшское и Корпангское железорудные поля, включающие серию месторождений и проявлений железных руд.

Костомукшское месторождение разрабатывается открытым способом в границах лицензии, полученной АО «Карельский окатыш» на срок до 01.01.2035 г. ОАО «Карельский окатыш» считается одним из лучших горно-обогатительных предприятий России, входящих в состав бизнес-системы «Северсталь». Основная продукция месторождения поступает на Череповецкий металлургический комплекс.

Железорудные отложения установлены в четырех породных ассоциациях: 1) в железистых кварцитах коматиит-базальтовой ассоциации;

2) в риодацитовой железисто-кремнистой ассоциации; 3) в терригенно-хемогенной (флишевой) железисто-кремнистой ассоциации; 4) в метаморфогенной гидротермально-метасоматической ассоциации богатых руд [Костомукшский..., 2015]. На рис. 2 приводится схема геологического строения двух промышленных месторождений – Костомукшского и Корпангского (северная часть района).

При проектной производительности горно-обогатительного комбината в 24 млн тонн сырой руды в год его обеспеченность разведанными запасами месторождения оценивалась в 45 лет. Оценка прогнозных ресурсов железных руд месторождения проводилась неоднократно. В последующем основная часть прогнозных ресурсов железных руд месторождения была снята с учета в связи с отсутствием реальных перспектив их дальнейшего геологического изучения и промышленного освоения. Прогнозные ресурсы железных руд месторождения в количестве 300 млн тонн по категории Р1 были приняты научно-техническим советом Департамента природных ресурсов по Северо-Западному региону в декабре 2001 года.

По состоянию на 1 января 2024 г. Государственным балансом РФ учитываются запасы железных руд (железистые кварциты) для открытой отработки в количестве (ГКЗ 2005 г. № 1129):

- категории А+В+С1 – 677,9 тыс. тонн (ср. содержание – 32,1 %),
- категория С2 – 68 848 тыс. тонн,
- забалансовые – 1 006 935 тыс. тонн.

Выделяются три типа минеральных руд:

1. Первый тип – щелочно-амфибол-магнетитовые кварциты, содержащие 40–60 % магнетита, 30–50 % кварца и не более 10 % щелочных амфиболов (рибекит, кроссит и эгирин). Руды этого типа отличаются наиболее крупными агрегатами магнетита и характеризуются лучшей обогатимостью.

2. Второй тип – биотит-магнетитовые кварциты, содержащие не более 15 % биотита и 30–50 % магнетита, иногда до 30 % карбоната (анкерит или магнезит-доломит).

3. Третий тип – грюнерит-роговообманково-магнетитовые и грюнерит-магнетитовые кварциты, содержащие 35–50 % кварца, 20–35 % магнетита и повышенное (до 10 %) по сравнению с двумя первыми типами количество пирротина и акцессорного апатита (до 3 %).

Сера и фосфор являются вредными примесями руд. Среднее содержание железа магнетитового ($Fe_{магн}$) снижается от первого типа руд к третьему. В рудной залежи «Основная» преобладает первый природный тип руд, в залежи «Переслаивание» – второй (57 %) и третий (22 %) типы, при этом доля третьего типа возрастает

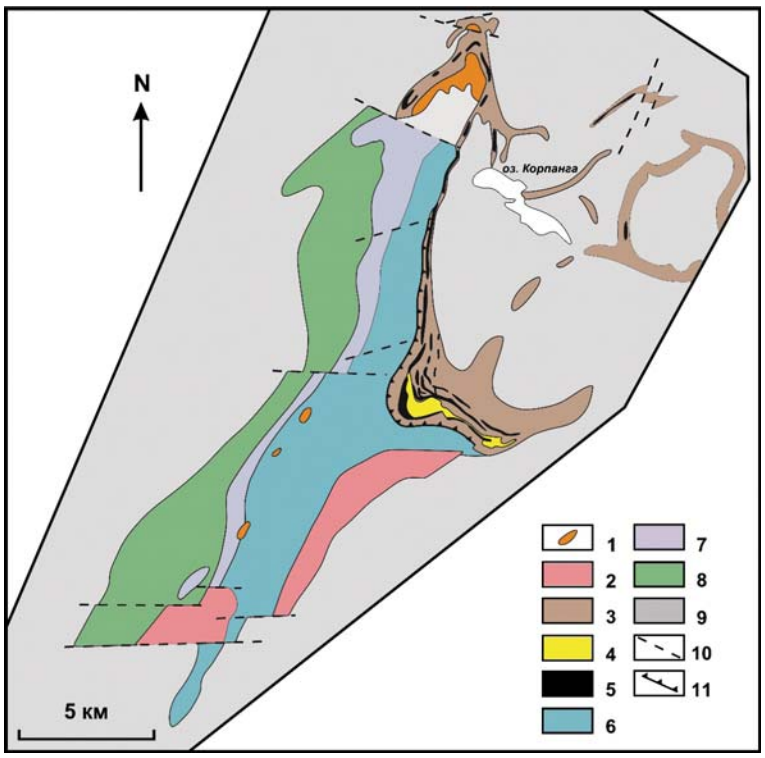


Рис. 2. Схема геологического строения Костомукшского рудного района [Слабунов и др., 2023 с авторскими изменениями]:

1 – палеопротерозойские долериты; 2 – неоархейские граниты; 3–5 – породы гимольской серии; 4 – силлы и дайки метариолитов (геллефлинта); 5 – магнетитовые кварциты; 6–8 – мезоархейские: 6 – туфы, туффиты, риолит-риодациты (шурловаарская свита); 7 – базальт-коматиитовый комплекс (рувинваарская свита); 8 – базальты и коматииты (ниемиярвинская свита); 9 – гранитоиды TTG-ассоциации; 10 – разломы; 11 – надвиг

Fig. 2. Scheme of the geological structure of the Kostomuksha ore district [Slabunov et al., 2023 with authors' modifications]:

1 – Palaeoproterozoic dolerites; 2 – Neoarchaean granites; 3–5 – rocks of the Gimoly series; 4 – sills and dykes of metarhyolites (helleflint); 5 – magnetite quartzites; 6–8 – Mesoarchaean: 6 – tuffs, tuffites, rhyolite-rhyodacites (Shurlovaara Formation); 7 – basalt-komatite complex (Ruvinvaara Formation); 8 – basalts and komatites (Niemijärvi Formation); 9 – granitoids of TTG association; 10 – faults; 11 – thrusting

в мелких рудных телах и на выклинивании крупных тел. Руды месторождения неоднородны по содержанию железа. Среднее содержание $Fe_{магн}$ в рудах основной залежи – 27,15 %, в залежи переслаивания – 23,48 %. Среднее содержание по месторождению $Fe_{общ}$ – 32,2 %, $Fe_{магн}$ – 26,45 %, S – 0,21 %, P – 0,07 %.

Руды легкообогатимы. Обогащение осуществляется по трехстадиальной схеме мокрой магнитной сепарации, обеспечивающей получение магнетитового концентрата с содержанием железа 65,7–70 % при извлечении $Fe_{общ}$ 73,6–78,5 %, $Fe_{магн}$ 94,6–95,4 % и выходе концентрата 33,8–37,3 %. Содержание серы в концентрате – от следов до 1 %.

Архейские железисто-кремнистые образования (железистые кварциты и магнетитовые сланцы) при метаморфизме в благоприятных условиях амфиболитовой фации превращаются в богатые железные руды. Так, возраст проявления метаморфизма в породах контокской серии оценен двумя методами – по циркону в 2674 ± 13 млн лет [Levskii et al., 2009] и в 2757 ± 113 млн лет [Puchtel et al., 1998].

За открытие и разработку Костомукшского месторождения коллектив специалистов, внесший большой вклад, удостоен в 1985 году Государственной премии СССР в области науки и техники (Беляев К. Д., Голубев Н. Н., Егорушков А. Н., Иванов П. И., Кратц К. О., Макарова З. А., Макарьин В. И., Морозов В. В., Мошков Е. И., Патковская Н. А., Тушевский Е. Л., Хрусталев Н. Н.).

Корпангское месторождение

Месторождение находится в 19 км к северу от обогатительной фабрики. Корпангский участок как перспективный для выявления железорудного месторождения среднего размера был выделен по результатам геофизических и геологосъемочных работ. В 1974–1976 гг. на участке были проведены поисковые и оценочные работы, а в 1977–1981 гг. – детальная разведка [Минерально-сырьевая…, 2005]. Месторождение разрабатывается с 2010 г.

Породы гимольской серии, вмещающей тела железистых кварцитов, залегают в ядерной части дугообразной изоклинально-складчатой синклинальной структуры с периметром более 7 км, шириной до 550 м. Месторождение представлено в основном Западной и Восточной рудными зонами, каждая из которых имеет протяженность более 3 км, при мощности от 20–45 до 220–370 м. Рудные зоны состоят из большого количества мелких, средних, параллельно и кулисообразно расположенных тел железистых кварцитов, залегающих в кварцито-гнейсо-сланцевой толще [Костомукшский…, 2015].

Рудные тела Западной зоны падают на северо-запад под углом 28–60°, Восточной – на восток под углом 60–90°. Наиболее насыщены рудными телами южная часть Западной зоны и северная часть Восточной. Рудные тела перемежаются с кварц-биотитовыми, биотит-кварцевыми, углеродсодержащими сланцами и безрудными кварцитами, участками интенсивно мигматизированными. Продуктивная толща пронизана субсогласными и секущими жильными и дайковыми телами геллефлинтов, гранитов, габбро, лампроитов, лампрофиров, сиенитов. Месторождение изучено до глубины 300 м, а по Западной зоне – до 500–600 м (рис. 3).

Состав руд месторождения преимущественно амфибол-магнетитовый с разновидностями: кроссит-магнетитовые, арфведсонит (рибекит)-магнетитовые, эгирин-магнетитовые и роговообманково-магнетитовые кварциты, в меньшей степени имеют развитие биотит-магнетитовые руды с разновидностями: грюнерит-биотит-магнетитовые, роговообманково-биотит-магнетитовые и карбонат-эпидот-биотит-магнетитовые кварциты, третий природный тип роговообманково-грюнеритовых и грюнеритовых кварцитов практически не развит. Амфибол-магнетитовые являются наиболее качественными, для них характерно содержание магнетита до 39 %, содержание $Fe_{магн}$ достигает 27,1 % [Костомукшский…, 2015].

Среднее содержание в рудах фосфора – 0,06 %, серы – 0,21 %, в том числе связанной с пирротином 0,11 %.

Подсчет запасов железных руд выполнен по 18 наиболее крупным рудным телам в соответствии с постоянными кондициями, разработанными институтом «Гипроруда».

По состоянию на 1 января 2020 г. Государственным балансом РФ учитываются запасы железных руд (железистые кварциты) для открытой отработки в количестве (запасы железных руд месторождения утверждены протоколом ГКЗ 2005 г. № 1129):

- категории A+B+C1 – 177 784 тыс. тонн (ср. содержание железа – 32,1 %),
- категория C2 – 10 223 тыс. тонн,
- забалансовые – 165 892 тыс. тонн.

Основные показатели кондиций:

- бортовое содержание $Fe_{магн}$ в пробе – 10 %
- минимальная мощность рудных тел и максимальная мощность прослоев пустых пород, включаемых в подсчет запасов, – 5 м.

Отработка месторождения проходит открытым способом двумя карьерами: на Западном

Рис. 3. Месторождение Корпанга, карьер Западный
Fig. 3. Korpanga deposit, Western quarry

и Восточном участках. Прирост запасов возможен за счет разведки глубоких горизонтов.

По технологическим свойствам руды легкообогатимы. Высококачественные руды составляют 70 % всего объема руд в контурах карьера. Магнетит образует как тонкораспыленный агрегат зерен размером около 0,01 мм, так и агрегатные сростки размером от 0,04 до 0,25 мм. При обогащении используется трехстадийная мокрая магнитная сепарация, позволяющая получать концентрат с содержанием железа общего ($Fe_{общ}$) 68,5–71,0 % (выход концентрата 41,6–43,9 %). Извлечение $Fe_{общ}$ в концентрат составляет 88,5–93,6 %. Содержание серы находится в допустимых пределах и не превышает в исходных пробах 0,21 %, в концентрате – 0,19 %. Доля I технологического сорта руд составляет 62 %, II – 15 %, III – 23 %. Наряду с традиционным использованием в доменном производстве руды пригодны для получения суперконцентратов и металлических порошков.

Горнотехнические и гидрогеологические условия отработки месторождения благоприятны. Согласно расчетам, при годовой производительности карьера по сырой руде 17,4 млн т срок существования предприятия определяется в 28 лет.

К северо-востоку от Костомукшского железорудного месторождения известны по запасам небольшие железорудные объекты и проявления (участок Южно-Корпангский, Северо-Костомукшское проявление и проявление Корпангйоки). Кондокское проявление железных руд (в 15 км к юго-востоку от Костомукшского месторождения) может представлять интерес в качестве резервной сырьевой базы.

Вторым после Костомукшского по масштабам железопроявления в Республике Карелия является Суоярвско-Гимольский рудный район, в пределах которого известен по крайней мере один перспективный для промышленного освоения объект – Межозерское месторождение [Журавлев и др., 2003].

Месторождения титана

Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р титан входит в перечень стратегических видов минерального сырья. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 16.04.2024 № 939-р он внесен в перечень дефицитных видов твердых полезных ископаемых. Балансовые запасы титана в Карелии заключены в месторождениях – магматогенные в габброидных породах (ильменит-титаномагнетитовый минеральный состав). Проект может иметь статус инвестиционного проекта Республики Карелия [Государственный..., 2024].

Пудожгорское титано-магнетитовое месторождение

Месторождение расположено близ восточной береговой зоны Онежского озера и открыто в 1859 г. горным мастером Аносовым. Участие Управления ББК в освоении месторождения способствовало привлечению к этой проблеме ряда ведущих институтов СССР и крупнейших предприятий Урала (1949 г. – заводские технологические испытания). По результатам предварительной разведки 1950–1951 гг. были утверждены запасы титаномагнетитовой руды в окончательном варианте в 1952 г. Однако технологическое изучение руды продолжалось до 1966 г., а по научной тематике металлургического института (ИМЕТ АН СССР) – еще несколько десятков лет (руководитель проф. В. А. Резниченко). Исследовались титаномагнетитовые руды Пудожгорского и других аналогичных месторождений [Резниченко, Шабалин, 1986].

На основе Пудожгорского месторождения комплексных благороднометалльно-титаномагнетитовых руд (рис. 4) выделен новый рудноформационный тип – Пудожгорский, приуроченный к трапповому магматизму и флюидонасыщенным высокожелезистым расплавам, прошедшим глубинную и гипабиссальную дифференциацию [Голубев и др., 2001; Трофимов, Голубев, 2008]. По аналогичной схеме развивался и Койкарско-Святнаволокский рудный силл (Центральная Карелия). Основным полезным ископаемым Пудожгорского месторождения являются титаномагнетитовые (Ti-V-Fe) руды с сопутствующей минерализацией Pd, Pt и Au и ассоциирующие преимущественно с сульфидами меди. Важная особенность заключена в том, что интрузия истощена Ni, Co, Cr [Голубев и др., 2001; Трофимов, Голубев, 2008]. При металлогенической оценке района этот факт необходимо принимать во внимание.

Руды относятся к окисному малосульфидному типу. Оруденение, приуроченное к титаномагнетитовому горизонту, занимает четкое стратифицированное положение и имеет ликвационный магматический генезис [Трофимов, Голубев, 2008; Онежская..., 2011]. Минеральный состав руды по первичному парагенезису – титаномагнетит (TiO_2 – 19,5 %, V_2O_5 – 1,45 %, FeO – 73,8 %). Руды средне-, густовкрапленные. Структуры распада – субмикроскопические. Руды характеризуются низкими содержаниями вредных примесей (S, P, Cr). Запасы титаномагнетитовой руды Пудожгорского месторождения составляют по категории B+C2 316,7 млн т, содержание основных компонентов в %: TiO_2 – 8,14, V_2O_5 – 0,43, $Fe_{вал}$ – 28,9 [Онежская..., 2011].

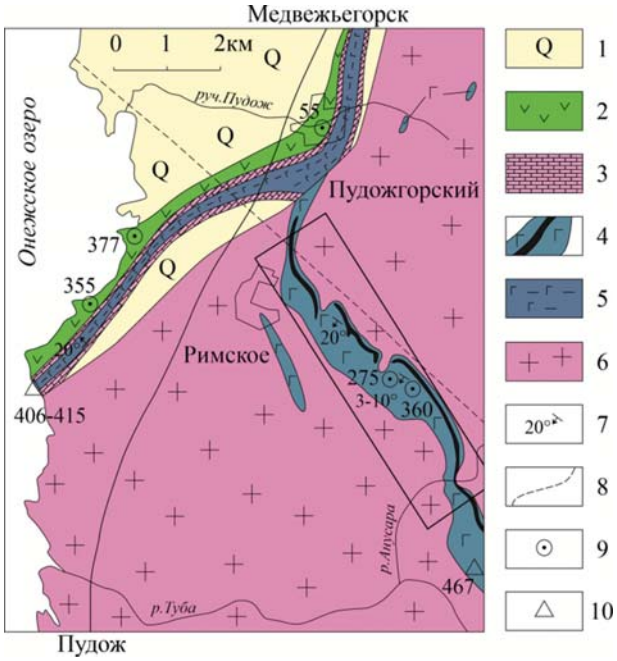


Рис. 4. Геологическая карта района Пудожгорского месторождения [Онежская..., 2011]:

1 – четвертичные отложения. Палеопротерозой. Ятулийский надгоризонт: 2–3 – вулканогенно-осадочный комплекс: 2 – эффузивы основного состава (лавы, покровы), 3 – доломиты; 4–5 – Пудожгорский интрузивный комплекс: 4 – Пудожгорский интрузив долеритов с промышленным титаномагнетитовым оруденением, 5 – Габневский силл долеритов с бедным титаномагнетитовым оруденением. Архей – палеопротерозой. Нерасчлененный комплекс: 6 – плагиограниты и микроклин-плагиоклазовые граниты и гранито-гнейсы; 7 – элементы залегания пластовой отдельности и слоистости; 8 – тектонические нарушения; 9 – поисковые буровые скважины;10 – граница Пудожгорского месторождения

Fig. 4. Geological map of the Pudozhgorskoye deposit area [Glushanin et al., 2011]:

1 – Quaternary deposits. Paleoproterozoic. Jatulian superhorizon: 2–3 – volcanogenic-sedimentary complex: 2 – basic effusive rocks (lavas, covers), 3 – dolomites; 4–5 – Pudozhgorsky intrusive complex: 4 – Pudozhgorsky dolerite intrusion with industrial titanomagnetite mineralization, 5 – Gabnevsky dolerite sill with poor titanomagnetite mineralization. Archean – Paleoproterozoic. Undifferentiated complex: 6 – plagiogranites and microcline-plagioclase granites and granite-gneisses; 7 – elements of bedding of layered jointing and foliation; 8 – tectonic faults; 9 – exploratory boreholes; 10 – boundary of the Pudozhgorskoye deposit

Морфоструктурные и конституционные особенности железных руд месторождения исследованы сотрудниками ВИМСа [Быстров и др., 2015]. При обогащении выделяется только титаномагнетитовый концентрат. Руды легкообогатимы. ИМЕТ РАН разработал энергосберегающую технологию непрерывного двухстадийного (восстановление – электроплавка) электротермического передела титаномагнетитового концентрата. Месторождение

рентабельно для открытой разработки. Вскрышные породы являются полезным ископаемым и могут использоваться как строительный камень для получения щебня [Трофимов и др., 2004]. Возраст дифференцированных интрузий Пудожгорского комплекса 1983–1984 млн лет.

Месторождения хрома

Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р хром входит в перечень стратегических видов минерального сырья. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 16.04.2024 № 939-р он внесен в перечень дефицитных видов твердых полезных ископаемых.

Россия занимает 8-е место среди мировых производителей товарно-сырьевой хромовой продукции. При этом около трети потребностей российской промышленности в хромовом сырье удовлетворяется импортом – небольшой масштаб отечественных объектов с рудами приемлемого качества ограничивает возможности.

Основные запасы хромовых руд страны (74,1 %) сосредоточены в Карело-Кольском регионе. Здесь находится крупнейшее российское месторождение стратиформного типа — Аганозерское [Государственный…, 2024].

Бураковское месторождение

Палеопротерозойский Бураковский (Бураковско-Аганозерский) расслоенный базит-ультрабазитовый массив расположен в Заонежье, на Пудожском берегу Онежского озера, крупнейший в Евразии, площадью 630 кв. км. Массив имеет лополитообразную форму и представлен Бураковским, Шалозерским и Аганозерским блоками. Первые сведения о хромовой минерализации получены в 1956 году в результате геологосъемочных работ Карельской комплексной геологической экспедиции.

В границах Бураковского лополита располагаются Аганозерское месторождение хромовых и никелевых руд с попутной благороднометалльной минерализацией и Шалозерское проявление хромовых руд с попутной благороднометалльной минерализацией. Исследования показали, что содержание благородных металлов в рудах не превышает 1,2–1,3 г/т металлов платиновой группы (МПГ) и 0,1–0,3 г/т золота [Журавлев и др., 2003; Минерально-сырьевая…, 2005].

Необходимо отметить значительные скопления в Аганозерском блоке пород гидротальк-серпентинитового состава, так называемых кемиститов с никель-магнезиальной рудой, происхождение которых связывается с низкотемпературным водно-углекислотным автометасоматическим изменением ультраосновных пород на завершающей стадии процесса серпентинизации. Кемиститы и в различной степени серпентинизированные ультрамафиты принадлежат к доминирующим образованиям. Отличительная особенность кемиститов – существенное содержание кислоторастворимых фаз никеля, магния и железа, где никель находится в кислоторастворимой форме [Горошко, 1998].

Аганозерское месторождение хромовых руд

Аганозерское месторождение расположено северо-восточнее Онежского озера, примерно в 40 км к северу от г. Пудожа. К Аганозерскому блоку приурочено месторождение хромовых руд, заключающее более половины балансовых запасов руд хрома России (рис. 5), представленных низкосортными хромовыми рудами повышенной железистости. Руды Аганозерского месторождения в среднем содержат 23–26 % Cr_2O_3, отношение Cr_2O_3/FeO находится в пределах 2–3 [Государственный…, 2024].

Хромит представляет собой сложный оксид хрома и железа Fe_2CrO_4, входит в группу шпинели. В составе природных хромитов всегда присутствует примесь Mg, Al, реже Ti, Mn, V, при этом содержание Cr_2O_3 в руде 61–68 %. Основная роль хромита в металлургии проявляется при производстве нержавеющей стали: так, около 75 % потребления хромита и более 90 % потребления феррохрома приходится на это производство, объемы которого составляют от 1 до 2 % всей мировой выплавки стали. Количество хрома в данном типе стали варьирует от 12 до 36 %.

Оруденение на Аганозерском массиве приурочено к верхней части разреза перидотитовой подзоны (маломощные прослои и линзы) и границе ультраосновной и пироксенитовой зон Главного хромитового горизонта расслоенной серии массива. В пределах Аганозерского блока Главный хромитовый горизонт соответствует одноименному месторождению хромитовых руд. Рудное тело – шириной до 3,6 км, вытянуто с севера на юг на 8,5 км. Максимальная глубина залегания горизонта – 670 м. При бортовом содержании Cr_2O_3 истинная мощность рудного тела от 1,4 до 5,4 м, в среднем 2,5 м. Нижняя часть сложена массивными рудами, в верхней части – вкрапленные руды и далее переходят в хромитсодержащие перидотиты.

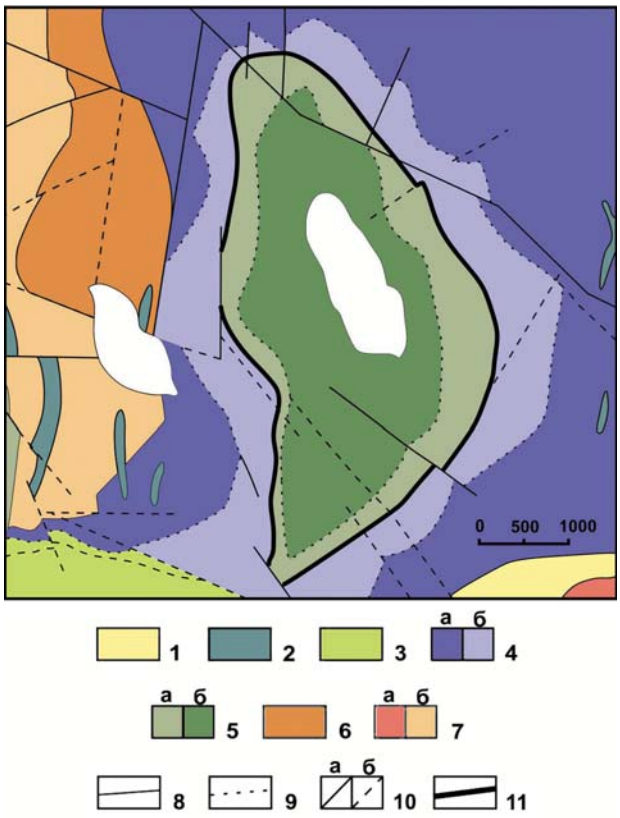


Рис. 5. Геологическая карта Аганозерского хромитового месторождения (по материалам Карельской геологоразведочной экспедиции):

1 – песчаники, алевролиты, конгломераты (котлинский горизонт); 2 – габбродолериты, лейкогаббродолериты с титаномагнетитом (Пудожгорский дайковый комплекс); 3 – габбродиориты, феррогаббронориты, пироксениты (вторая фаза); 4 – дуниты (а), перидотиты (первая фаза) (б); 5 – пироксениты (а), габбронориты, плагиоклазиты (первая фаза) (б); 6 – металавы базальтовых и перидотитовых коматиитов, коматиитовых базальтов, метабазальтов, сланцы по этим разновидностям: хлорит-биотитовые, биотитовые, биотит-амфиболовые; гнейсо-сланцы, амфиболиты (вожминская серия); 7 – водлозерский комплекс гранитов (а), диорито-гнейсы (б); 8 – границы разновозрастных стратиграфических подразделений; 9 – границы одновозрастных образований (фаз, фаций, зон, подзон) внутри подразделений; 10 – тектонические нарушения: главные (а); второстепенные (б); 11 – выход горизонта хромитовых руд на поверхность

Fig. 5. Geological map of the Aganozersky chromite deposit (based on materials of the Karelian Geological Survey Expedition):

1 – sandstones, siltstones, conglomerates (Kotlinsky horizon); 2 – gabbrodolerites, leucogabbrodolerites with titanomagnetite (Pudozhgorsky dyke complex); 3 – gabbrodiorites, ferrogabbronorites, pyroxenites (second phase); 4 – dunites (a), peridotites (first phase) (б); 5 – pyroxenites (a), gabbronorites, plagioclasites (first phase) (б); 6 – metalavas of basaltic and peridotitic komatiites, komatiitic basalts, metabasalts, shales of these varieties: chlorite-biotite, biotite, biotite-amphibole; gneiss-shales, amphibolites (Vozhma series); 7 – Vodlozersky complex of granites (a), diorite-gneisses (б); 8 – boundaries of different-age stratigraphic subdivisions; 9 – boundaries of single-age formations (phases, facies, zones, subzones) within subdivisions; 10 – tectonic disturbances: major (a); minor (б); 11 – outcrop of chromite ore horizon on the surface

Поисково-оценочные и разведочные работы развернулись в полном масштабе с 1984 года, после того как были обнаружены собственно руды, содержащие хром. Запасы хромовых руд Аганозерского месторождения утверждены ГКЗ (протокол № 752 от 07.08.2002 г.) [Минерально-сырьевая..., 2005]: основное полезное ископаемое – хром, попутные – МПГ и золото. Содержание Cr_2O_3 макс. 45,28, средн. 21,79. Запасы руды по категории С1 8,111 млн т, по категории С2 18,476 млн т [Минерально-сырьевая..., 2005]. К 2008 году завершилась оценка рудника, и был составлен технологический регламент строительства горно-обогатительного комбината.

По данным ТЭО кондиций (АО «Гипроникель», 1999), отработка запасов месторождения эффективна как открытым, так и подземным (более экологически предпочтительным) способом.

Технологические исследования хромовых руд выполнялись на лабораторных пробах ВИМСом. Предложена гравитационная магнитная схема обогащения с получением концентрата с 48 % Cr_2O_3. Извлечение триоксида хрома в концентрат составляет 70 % [Журавлев и др., 2003].

Проблема освоения хромитового месторождения тесно переплетается с перспективами использования промышленных минералов Аганозерского блока Бураковского массива, что позволяет сбалансированно подходить к оценке перспектив данного района. Решение задач комплексного и рационального использования недр неотделимо от общей программы, в которой доля промышленных минералов должна занимать достойное и экономически обоснованное место. Вопрос о доступности и ценности должен решаться параллельно с подготовкой крупного инвестиционного мегапроекта будущего в канве геолого-технологического и эколого-экономического обоснования на современном уровне [Щипцов и др., 2017].

Месторождения цветных металлов

Месторождения молибдена

Молибден входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р.

Молибден – серебристо-серый ковкий металл, обладающий высокой термостойкостью, легкой дегазацией, высокими значениями электро- и теплопроводности, малым коэффициентом линейного расширения, значительной прочностью, высоким модулем упругости и хорошей обрабатываемостью.

Основная область применения молибдена (около 85–90 %) – металлургическая промышленность, где его используют в качестве легирующей добавки, главным образом при производстве сталей, а также в производстве (совместно с V, W, Cu, Ni и Co) твердых, жаростойких и кислотоупорных сплавов.

Главным минералом молибденовых руд является молибденит, из которого добывается более 98 % всего молибдена. Молибденовые типы руд легко обогащаются флотационным способом, что позволяет извлекать его даже при весьма низком исходном содержании молибдена в руде. Извлекаемость обычно составляет более 80 %. В будущем динамика цен на молибденовую продукцию будет определяться уровнем и стабильностью поставок молибдена Китаем, Чили и США [Государственный..., 2024].

Месторождение молибденовых руд Лобаш

В 1980-е годы было открыто молибденовое месторождение Лобаш в Беломорском районе Республики Карелия, первое крупное месторождение докембрийского возраста [Покалов, Семенова, 1993]. Вмещающими породами являются вулканиты пебозерской серии базальт-андезит-дацитового состава, слагающие борт крупной структуры, выполненной супракрустальными комплексами неоархея и палеопротерозоя. Молибден-порфировое месторождение пространственно и генетически связано с неэродированной интрузией порфировидных гранитов, в которой молибденовые руды размещены в эндогенном гидротермальном рудном штокверке в экзоконтактной надинтрузивной зоне, что четко изображено на схематическом разрезе молибденового месторождения Лобаш (рис. 6). Геологическое строение рудного поля Лобаш освещено в ряде отчетов по проводимым в Лехтинской структуре и ее обрамлении поисково-оценочным работам на молибден, медь и благородные металлы под руководством геологов Карельской комплексной геологоразведочной экспедиции С. Н. Юдина, Г. Н. Пироженко, В. М. Тытыка за 1985–1998 гг.

Рудное поле локализовано на юго-восточном окончании крупного многофазного интрузивного массива. К ранней (главной) фазе относятся гранодиориты и монцограниты. Геохимия пород главной фазы, как отмечают В. А. Богачев с соавторами [2009], соответствует известково-щелочной K-Na-серии с умеренной щелочностью, глиноземистостью и железистостью [Богачев и др., 2009]. Граниты второй (поздней) фазы образуют небольшие по размерам тела порфировидных биотитовых лейкогранитов с фацией плагиогранит-порфиров в эндоконтакте. Лейкограниты формируют наиболее дифференцированную фазу плутона с редкоэлементным составом. Следствием кристаллизационной дифференциации становится относительно пониженное содержание Zr, LREE и повышенное содержание Nb, Ta, U, Th, Mo, W, Bi в породах. Данные лейкограниты сопоставимы с лейкократовыми производными гранитов ранней фазы [Богачев и др., 2009].

Постмагматические гидротермально-метасоматические процессы в ореоле гранитного массива интенсивно изменили весь комплекс вмещающих пород. Максимальные изменения вмещающих толщ проявлены над апикальной областью, не выходящей на поверхность интрузии.

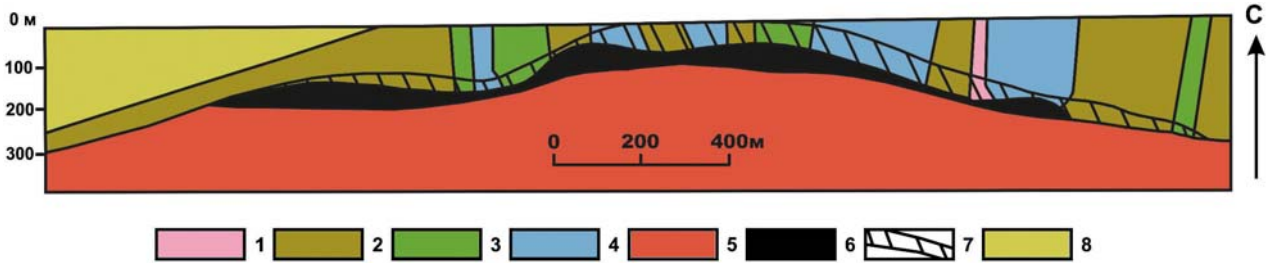


Рис. 6. Схематический разрез молибденового месторождения Лобаш [Mineral..., 2012].

Неоархей: 1 – полевошпатовые и кварцевые порфириты; 2 – метабазальты, метагаббродолериты; 3 – молибденовая руда; 4 – метадациты; 5 – гранодиориты и гранит-порфиры; 6 – обогащенные молибденом вмещающие породы; 7 – метаандезиты; 8 – туфы и метапесчаники (палеопротерозой)

Fig. 6. Schematic section across the Lobash Mo deposit [Eilu, 2012].

Neoarchaean: 1 – feldspar and quartz porphyry; 2 – metabasalt, metagabbrodolerite; 3 – molybdenum ore; 4 – metadacite; 5 – granodiorite and granite porphyry; 6 – molybdenum-enriched host rocks; 7 – metaandesite; 8 – tuffs and metasandstones (Palaeoproterozoic)

Грейзенизация и окварцевание наиболее характерны для изменений в апикальной части гранитов [Тытык, Фролов, 2014].

Месторождение молибдена Лобаш и гранитная интрузия представляют собой единую рудно-магматическую систему с возрастом 2722–2715 млн лет. Цирконовый возраст пород ранней и поздней фаз плутона получен U-Pb-методом на SIMS SHRIMP в ЦИИ ВСЕГЕИ [Богачев и др., 2009]. Петро- и геохимические особенности разных типов вмещающих пород и их изменения, которыми сопровождалось становление флюидно-рудномагматической системы Лобаш, детально рассмотрены в работе [Кулешевич, Дмитриева, 2021].

Молибденовые руды представлены двумя разновидностями – богатой гнездово-вкрапленной минерализацией в кварцевых жилах в гранитах и вкрапленно-прожилковой минерализацией (основной тип оруденения) в эпидотизированных и биотитизированных вмещающих толщах и секущих их габброидах. Месторождение представляет собой штокверк длиной 2 км при ширине 0,4–0,6 км и с вертикальным размахом оруденения длиной до 200 метров.

Установлено, что молибденовый жильно-штокверковый рудный объект обладает значительными ресурсами и запасами [Тытык, Фролов, 2014; Кулешевич, Дмитриева, 2021]. Запасы молибдена месторождения Лобаш приводятся по подсчету основной Штокверковой залежи с содержанием Mo макс. 0,6 %, средн. 0,061 % и запасами по категориям С1 56,0 и С2 71,3 тыс. т [Минерально-сырьевая…, 2005].

Разработка месторождения планируется в рамках индивидуальной программы социально-экономического развития Карелии, которая будет финансироваться, как предполагается, из федерального бюджета.

Месторождения ванадия

Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р ванадий входит в перечень стратегических видов минерального сырья. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 16.04.2024 № 939-р он внесен в перечень дефицитных видов твердых полезных ископаемых.

Месторождения ванадия в Онежской структуре

Рудные объекты ванадия сконцентрированы в центральной части палеопротерозойской Онежской структуры и приурочены к черносланцевой толще людиковия (~1,97 млрд лет).

Ванадий-урановый рудный тип представлен ванадий-содержащими карбонатно-слюдистыми метасоматитами и слюдитами. В 1980–90-е годы был выявлен Онежский рудный узел с месторождениями богатых комплексных руд, к которым в первую очередь относятся перспективные рудопроявления ванадиевых (с ураном, платиноидами, золотом, серебром и другими ценными компонентами) руд – Шульгиновское, Весеннее, Средняя Падма, Верхняя Падма, Космозерское, Царевское месторождения. Геологии и вещественному составу этих объектов посвящены многочисленные публикации [Булавин, 1999; Черников и др., 2007; Кулешевич, Голубев, 2011 и др.]. Отличительными чертами строения рудного района являются широкое развитие углеродсодержащих пород людиковия, неоднократное проявление и широта распространения базальтоидного, в меньшей степени пикрит-базальтоидного вулканизма, региональный метаморфизм преимущественно в условиях фации зеленых сланцев, наличие зон складчато-разрывных дислокаций (СРД), которые и являются рудоносными. Залежи руд установлены в зонах СРД на участках, где широко проявлены процессы низкотемпературного метасоматоза. Тела метасоматитов имеют длину до 10 км при ширине 0,2–0,5 км, характеризуются очень сложным зональным строением. Радиологический возраст слюдитов (U-Pb-метод по настурану) 1760 ± 30 млн лет.

Месторождение ванадия Средняя Падма

Месторождение «Средняя Падма» открыто в 1985 году при проведении поисковых работ экспедицией № 32 ПГО «Невскгеология». В дальнейшем последовательно были осуществлены поисково-оценочные работы и разведка с применением шахт и подсчетом запасов комплексных уран-благороднометалльно-ванадиевых руд. Основная рудоконтролирующая структура представляет собой крутопадающую зону межпластового срыва вдоль контакта доломитов туломозерской свиты ятулийского надгоризонта и пачки алевролитов заонежской свиты людиковия (рис. 7) [Онежская…, 2011].

Общий состав руд определяется прежде всего ванадием, концентрирующимся главным образом в слюдах – роскоэлите и флогопите (около 95 %), а также в гематите, ноланите и ряде других минералов. Урановые минералы представлены преимущественно настураном, коффинитом, частично уранинитом и реже браннеритом. Золото, серебро, палладий и

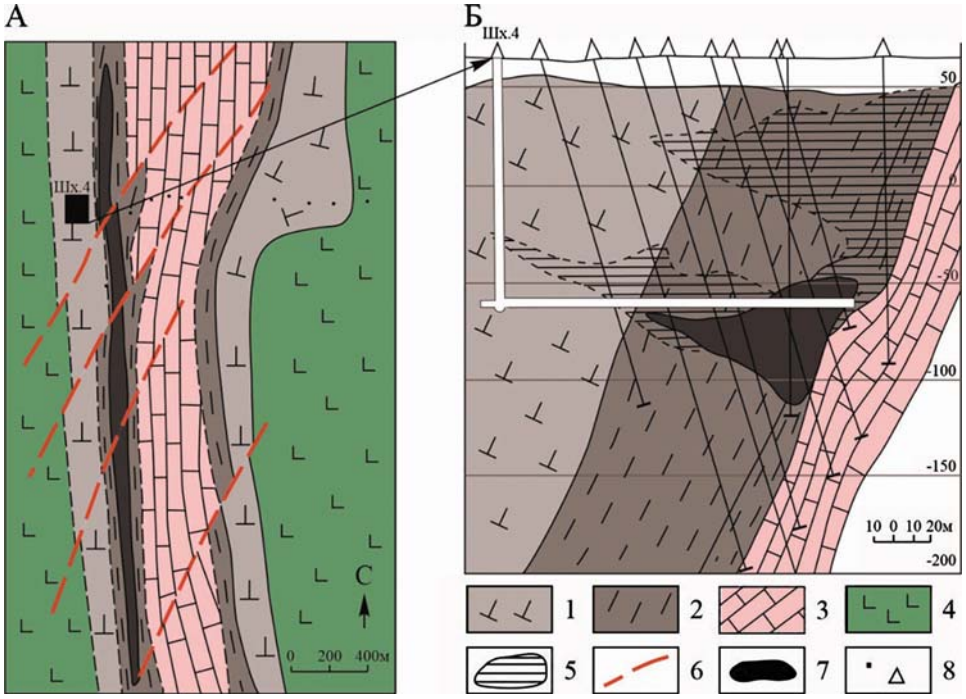


Рис. 7. Схема геологического строения месторождения Средняя Падма (А) и геологический разрез (Б) (по данным ПГО «Невскгеология»):

1 – слюдисто-карбонатные сланцы; 2 – шунгитсодержащие сланцы, алевролиты; 3 – доломиты; 4 – базальты; 5 – зоны альбитизации; 6 – разрывные нарушения; 7 – рудные залежи, 8 – скважины

Fig. 7. Scheme of the geological structure of the Srednyaya Padma deposit (based on the data of the PGA Nevskgeologiya):

1 – mica-carbonate schists; 2 – shungite-bearing schists, siltstone; 3 – dolomites; 4 – basalts; 5 – zones of albitization; 6 – fault zones; 7 – ore bodies; 8 – boreholes

платина определены в сульфидах, селеносульфидах и селенилах свинца, висмута и меди, а также в самородном виде.

Руды характеризуются очень высоким содержанием V_2O_5 – до 5 % (в среднем 2,35 %). Золото, серебро, палладий и платина определены в сульфидах, селеносульфидах и селенилах свинца, висмута и меди, а также в самородном виде. В комплексных рудах диагностировано свыше 80 рудных минералов, в т. ч. новых, обнаруженных только в рудах этого месторождения – падмаит, судоковит и селеноджуноит. Селеноджуноит обнаружен недавно, он рассматривается в качестве потенциального индикатора залежей редких металлов. Многообразие минерального и элементного состава руды является уникальным [Онежская..., 2011]. Основную ценность на месторождении Средняя Падма представляют ванадиевые руды.

На месторождении Средняя Падма балансовые запасы ванадия подсчитаны до глубины 350 м. Запасы пентоксида утверждены по категориям С1 58,77 тыс. т и С2 48,88 тыс. т [Онежская..., 2011]. В соответствии с ТЭО кондиций бортовое содержание V_2O_5 1,0 %, минимальная мощность рудного тела 2,0 м, максимальная мощность пустых пород и некондиционных руд в рудном пересечении 4,0 м [Онежская..., 2011].

Лабораторные технологические исследования обогатимости руд проводились в 90-е годы в ВИМСе и ВНИИХТе, в результате были рекомендованы две методики их переработки: химико-металлургическая с предварительным магнито-флотационным обогащением руды и гидрометаллургическая (автоклавное сернокислотное выщелачивание) с предварительным флотационным обогащением.

Основные проблемы разработки месторождения связаны с экологическими проблемами, что неоднократно обсуждалось на разных уровнях. Значительным шагом в этом вопросе стало заключение Карельского научного центра РАН, в котором была дана полная и достоверная оценка изменения окружающей среды и определения вероятного эколого-экономи-

ческого ущерба от освоения месторождения Средняя Падма. Указывалось, что необходимо выполнить весь комплекс экологических исследований и расчетов в соответствии с действующими нормативными актами в области охраны окружающей среды и рационального природопользования [Экологические..., 2005]. На сегодняшний день никаких мероприятий в этом отношении не проводилось, что откладывает решение об использовании объекта.

Месторождения олова

Олово входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р.

Кительское месторождение олова

Расположено в Республике Карелия, в районе деревни Кителя, в 12 км к северо-западу от города Питкяранты. Является крупным месторождением в европейской части России. Месторождение находится в западной олово-полиметаллической подзоне Салминско-Уксинско-Кительской рудной зоны (рис. 8). В рудах Кительского месторождения среднее содержание Sn составляет 0,48 % [Государственный..., 2024].

В 1960 году Р. А. Хазов и техник-геолог А. Степанков обнаружили касситеритовое оруденение в керне одной из скважин в районе Кителя. По инициативе Р. А. Хазова и при поддержке руководства Карельской комплексной геологоразведочной экспедиции было составлено обоснование для проведения поисковых работ на цветные и редкие металлы в Питкярантском районе. Этот вопрос обсуждался в СЗГУ и Мингео РСФСР. Р. А. Хазов составил проект работ по Восточно-Ладожской и Кительской партиям на 1964–1967 годы. Буровыми скважинами было уточнено положение рудного тела (рудных скарнов), его размеры, что позволило определить положение разведочной шахты, которая могла прояснить перспективы оловянного месторождения. В 1969 году Р. А. Хазов, в ранге главного геолога партии, составил геолого-методическую часть проекта на проходку Кительской шахты. Шахта «Кителя» с системой штреков и ортов стала главным объектом Уксинской геологоразведочной партии Северо-Западного производственного геологического объединения «Севзапгеология» (УГРП работала с 1967 по 2014 год) (рис. 9) [Хазов, 1973].

Месторождение представлено несколькими рудными зонами, самая большая из них Южная, простирается на 1850 метров в длину и до глубины 700 метров. Оловянное оруденение локализовано в скарнах и приурочено к контакту карбонатно-сланцевой толщи питкярантской свиты сортавальской серии с гранитоидами. Основная рудная залежь, в пределах кото-

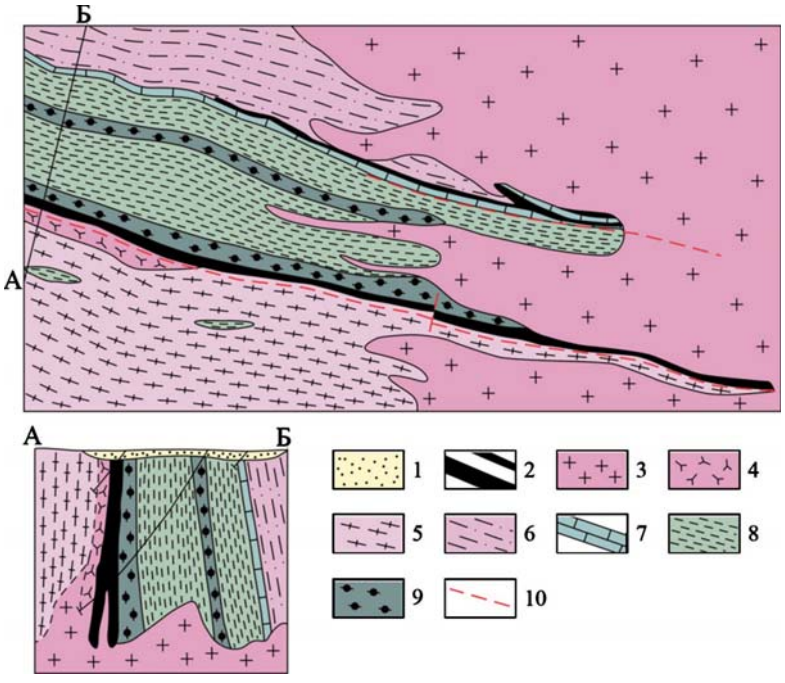


Рис. 8. Схематическая геологическая карта восточной части Кительского рудного поля и разрез А–Б [по: Хазов, 1987]:

1 – четвертичные отложения; 2 – рудные скарны; 3 – граниты второй фазы; 4 – мигматиты; 5 – плагиомикроклиновые гнейсо-граниты и метасоматиты; 6 – биотит-кварцевые сланцы и гнейсы с прослоями кварцитов; 7 – мраморизованные и скарнированные известняки с прослоями скарнов; 8 – амфиболовые сланцы и полевошпатовые амфиболиты; 9 – пачки переслаивания разнообразных сланцев, амфиболитов и маломощных прослоев скарнированных известняков; 10 – разрывные нарушения

Fig. 8. Schematic geological map of the eastern part of the Kitelskoye ore field and section А–Б [after: Khazov, 1987]:

1 – Quaternary sediments; 2 – ore skarns; 3 – second-phase granites; 4 – migmatites; 5 – plagiomicrocline gneiss granites and shadow metasomatites; 6 – biotite quartz shales and gneiss shales with quartzite interlayers; 7 – marbled and skarnified limestones with skarn interlayers; 8 – amphibole shales and feldspar amphibolites; 9 – interlayer bundles of various shales, amphibolites and low-power interlayers of skarnized limestones; 10 – discontinuous disturbances

Рис. 9. Разведочная шахта, Кительское месторождение. На фото А. Степанков

Fig. 9. Exploration mine, Kitelskoye deposit. In the photo: A. Stepankov

рой выделяются несколько рудных тел, имеет сложную форму, ее мощность варьирует от 4–5 до 30 метров. Кроме олова в рудах присутствуют цинк, медь, серебро, кадмий, графит. На объекте были выделены два типа промышленных оловянных руд. Первый тип представлен гранат-пироксеновыми скарнами с магнетитом, сфалеритом и другими сульфидами с содержанием олова от 0,1 до первых процентов. Второй тип – калишпатизированные пироксен-гранатовые скарны с содержанием олова от десятых долей до десятков процентов [Хазов, 1987; Металлогения..., 1999].

Олово содержится в касситерите (75–90 %), а также в виде изоморфной примеси тонкодисперсных включений в силикатах, главным образом в гранате, амфиболе, магнетите. Этот минерал образует в руде тонкозернистую вкрапленность, представленную игольчатыми и призматическими кристаллами и колломорфными агрегатами размером от 0,1 мм до 1 см в ассоциации с гранатом, пироксеном, магнетитом.

Отмечается также сфалерит (цинковая руда) – гнездовая вкрапленность, с размерами кристаллов до 1–2 см, в ассоциации с магнетитом, халькопиритом и кальцитом. Текстура руд пятнисто-полосчатая, полосчатая, реже массивная, структура гипидиоморфнозернистая, аллотриоморфнозернистая, эмульсионная. Руды мелкозернистые, характерны тонкие срастания рудных и породообразующих минералов.

В 1984 году была завершена детальная разведка месторождения до глубины 340 м, запасы утверждены ГКЗ СССР. В составе скарноворудной залежи основными породообразующими минералами являются пироксены (диопсид), гранаты (андрадит-гроссулярового ряда), амфиболы (роговая обманка и тремолит-актинолит), серпентин, хлорит. К второстепенным породообразующим минералам относятся альбит, флогопит, кварц, кальцит, эпидот, везувиан. Главные рудные минералы – касситерит и сфалерит, реже встречаются станнин, самородное серебро, шеелит, галенит, халькопирит, пирротин.

Основное полезное ископаемое – олово (рудный минерал касситерит), попутные – цинк, графит, медь, серебро, кадмий, железо. Содержание олова в рудных телах (в %) максимальное 3,02, среднее 0,48. Подсчет запасов выполнен на основе постоянных кондиций, разработанных институтом «Гипроникель», и утвержден ГКЗ СССР в 1984 г. Запасы олова по категории С1 составляют 5,91 тыс. т, по категории С2 0,456 тыс. т [Минерально-сырьевые..., 2005].

Руды месторождения являются труднообогатимыми. По результатам заводских и лабораторных технологических исследований крупнообъемных проб рекомендована комбинированная схема переработки руд, включающая рентгено-радиометрическую сепарацию крупнокускового материала (извлечение олова 93,3 %) и пирометаллургический передел (фьюмингование) обогащенного продукта (извлечение олова 89,7 %).

Месторождения платины

Проявления платиноидов в Карелии связаны с несколькими типами минерализаций: малосульфидной никель-хромовой (с МПГ и золотом) минерализацией базит-гипербазитовых интрузий (Бураковской, Луккулайсваара, Ципринга), ванадий-железо-титановой сульфидно-окисной минерализацией (Пудожгорское месторождение, Койкарский массив, месторождение Викша) и уран-благороднометалльно-ванадиевой минерализацией (месторождения Средняя Падма, Царевское, Космозеро, Весеннее).

Платиноиды (МПГ) входят в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р.

Месторождение платины Викша

Месторождение Викша относится к первому промышленно перспективному платинометалльному объекту на территории Карелии, прошедшему независимую аудит-оценку компании AMC Consultants в соответствии с Кодексом JORC [Корнеев и др., 2019]. На схеме (рис. 10) показан контур лицензионной площади месторождения Викша с обозначением трех участков (Вишнеозерский, Кенти и Шарги) и контуры благороднометалльного оруденения, локализованного в северной части Койкарско-Святнаволокского силла, интрудирующего палеопротерозойские вулканогенно-осадочные толщи. К этому силлу приурочено титаномагнетитовое месторождение (запасы составляют 314,1 млн т с содержанием $Fe_{вал}$ ~20–47,9 %, TiO_2 3,7–8,1 %, V_2O_5 0,13–1 % [Минерально-сырьевая..., 2005]), в составе рудных тел которого, помимо главных компонентов железа и титана, присутствуют платина, палладий и золото [Петров и др., 2023]. В этих исследованиях отражена роль жидкостной несмесимости, которая привела к накоплению благородных металлов в высокожелезистом флюидизированном ликвате в соответствии с коэффициентами распределения благородных металлов между силикатным и оксидным расплавами и между расплавом и флюидом, что позволяет выделить малосульфидный благороднометалльный тип оруденения. Наиболее распространенная благороднометалльная минерализация представлена арсенидами платины и палладия. В целом характерно видовое разнообразие минерализации.

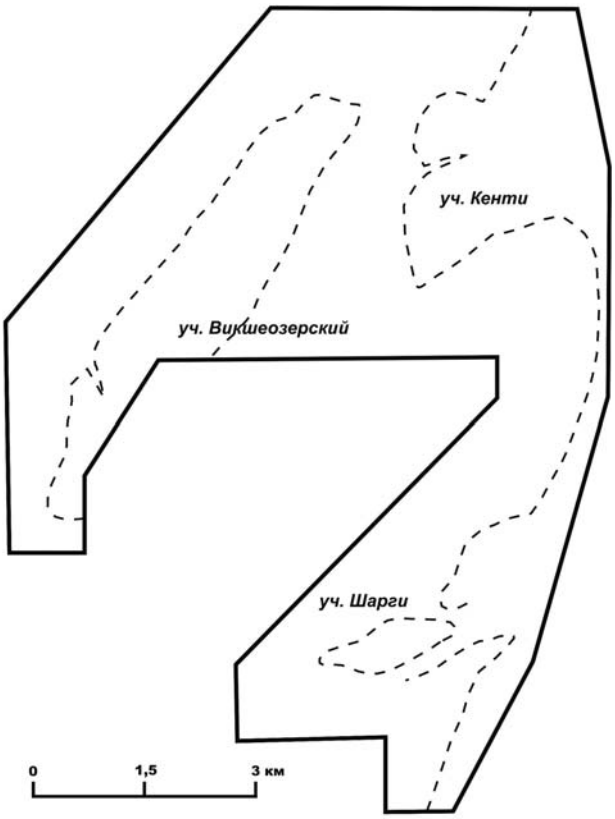


Рис. 10. Схема лицензионной площади месторождения Викша:

контур лицензионной площади – сплошная линия; контур благороднометалльного оруденения – штриховая линия [по: Корнеев и др., 2019]

Fig. 10. Scheme of the licensed area of the Viksha deposit:

the contour of the licensed area – solid line; the contour of the precious metal mineralization – dashed line [Korneev et al, 2019]

Для подсчета запасов и ресурсов металлов платиновой группы и золота были проведены буровые работы и осуществлена проходка канав с последующим керновым и бороздовым опробованием. Выполнены технологические исследования руд месторождения.

Ниже приводятся цифровые значения содержания металлов платиновой группы и золота в благороднометалльном рифе в г/т: Pt – 0,022–0,8; Pd – 0,026–2,4; Rh – <0,003; ΣЭПГ – 0,9–3; Au – 0,008–2,3 [Олейник, Кулешевич, 2016]. Концентрации сопутствующих рудных элементов невысокие, г/т: Cu – 620–1700; Zn – 260–380; Pb – 5–8; As – 2,4–4,8; Sb – 2,26–2,5; Te – 1,5–2; Bi – ~0,2–0,3; Sn – 2–2,5. В рудах установлена положительная корреляция между содержаниями Cu и Au, Te, Re, P, REE, Be, Zr, Hf, Th [Borozdin et al., 2014], платиноидов с Au, As, Sb, Te, Sn [Олейник, Кулешевич, 2016].

Общее количество благородных металлов оценивается в 6,6 млн унций, что характеризует Викшу как крупное месторождение металлов платиновой группы, пригодное для открытой разработки [Корнеев и др., 2019]. Оптимальная проектная глубина карьера варьирует от 240 до 305 м ниже поверхности.

Месторождение расположено в регионе с благоприятными географо-климатическими условиями, развитой инфраструктурой и достаточным количеством квалифицированной рабочей силы, в 90 км от города Петрозаводска.

Проектантами предлагается флотационная схема обогащения для производства коллективного медно-МПГ-сульфидного концентрата, который может быть переработан на аффинажных заводах по производству МПГ или на медеплавильных заводах [Корнеев и др., 2019].

В Республике Карелия ООО «Семченское золото» планирует подготовку к освоению месторождения Викша, относящегося к новому

типу собственных месторождений платины и палладия, представленному убогой вкрапленностью сульфидов меди в титаномагнетитовых рудах. Согласно ТЭО постоянных разведочных кондиций (2021 г.), годовая производительность потенциального предприятия по добыче и переработке руды составит 4,7 млн т; срок обеспеченности рудника запасами – 29 лет [Государственный…, 2024].

Вместе с тем существуют перспективы обнаружения новых промышленных объектов с благороднометалльной минерализацией.

Месторождение Луккулайсваара в структуре Куусамо-Паанаярви-Ципринга

Известно несколько перспективных рудопроявлений в расслоенных интрузивах Олангской группы (рис. 11), из которых Луккулайсваара является самым крупным (8×4 км) и наиболее хорошо изученным [Монтин, 2009]. В его пределах проведены поисково-съемочные работы, а также детальные поиски на установленных здесь рудопроявлениях Надежда и Восточное КЗ, составлена геологическая карта м-ба 1:25 000 и 1:5000. U-Pb-возраст массива Луккулайсваара по циркону 2437 ± 1 млн лет [Барков, 1992].

Массив Луккулайсваара представляет собой фрагмент изометричного тела, длина которого составляет более 8 км, а ширина 5 км. По гравиметрическим данным, подошва массива находится на глубине около 2 км. В строении массива выделяется пять серий (зон): нижняя – краевая (20–30 м), ультраосновная (600–900 м), норитовая (1200–1800 м), габброноритовая (500–900 м) и габбровая (900–1000 м) [Щипцов, Иващенко, 2018].

Наиболее значительные концентрации МПГ установлены в зонах относительного обогащения сульфидами (халькопирит, пентландит, пирротин, миллерит, пирит и др.). Однако и в этих зонах общее их содержание редко достигает 1 об.%, и только в микрогабброноритах изредка отмечаются шлировидные обособления размером в первые десятки сантиметров, сложенные массивными и густовкрапленными сульфидными скоплениями.

Комплексное (Pd, Pt, Au, Ni, Cu) платинометалльное оруденение приурочено к норитовой

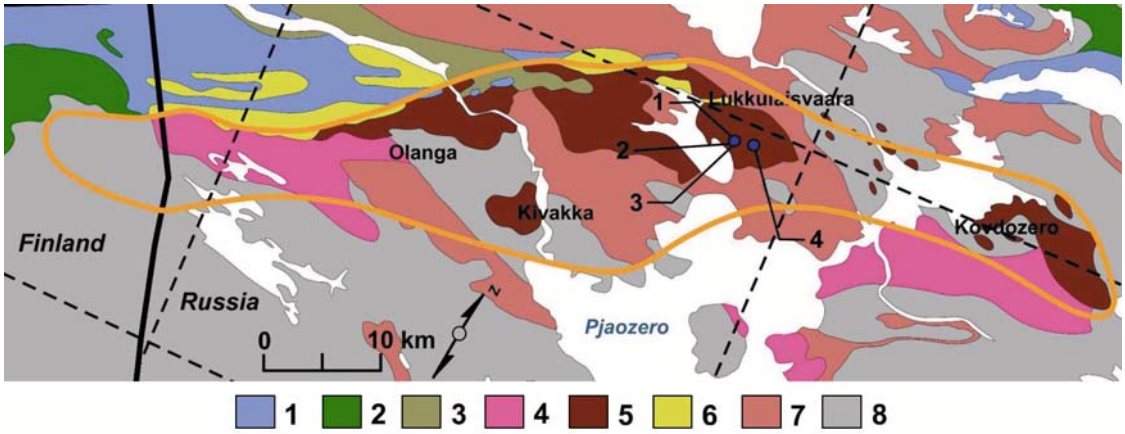


Рис. 11. Проявления платиноидов и расслоенные интрузии в субширотной рифтогенной структуре Куусамо-Паанаярви-Ципринга. Геологическая карта основана на данных [Koistinen et al., 2001]:

1–6 – протерозой: 1 – кварцит, слюдяной сланец, слюдяной гнейс, конгломерат; 2 – базальт, высокомагниевый базальт, высокомагниевый андезит, дацит, коматиитовый базальт/долерит; 3 – коматиит, базальт, андезит, риолит; 4 – гранит, кварцевый сиенит, кварцевый монцонит, монцонит, чарнокит; 5 – расслоенная интрузия: габбро, габбро-норит, анортозит, дунит, перидотит, пироксенит; 6 – риолит, дацит, грауваккa, конгломерат. 7, 8 – архей: 7 – гранит, пегматит, 8 – тоналит-трондьемит-гранодиоритовый гнейс, кварц-полевошпатовый гнейс, эндербит, мигматитовый гнейс с мафическими и фельзитовыми включениями.

Элементы ЭПГ: 1. Надежда; 2. Проявление № 15; 3. Проявление № 2; 4. Восточное – Критическая Зона

Fig. 11. PGE occurrences and layered intrusions in the sublatitudinal rift structure of Kuusamo-Paanajarvi-Tsipringa. The geological map is based on [Koistinen et al., 2001]:

1–6 – Proterozoic: 1 – quartzite, mica schist, mica gneiss, conglomerate; 2 – basalt, high-Mg basalt, high-Mg andesite, dacite, komatiitic basalt/dolerite; 3 – komatiite, basalt, andesite, rhyolite; 4 – granite, quartz syenite, quartz monzonite, monzonite, charnokite; 5 – layered intrusion: gabbro, gabbro-norite, anorthosite, dunite, peridotite, pyroxenite; 6 – rhyolite, dacite, greywacke, conglomerate. 7, 8 – Archean: 7 – granite, pegmatite; 8 – tonalite-trondhjemite-granodiorite gneiss, quartz-feldspathic gneiss, enderbite, migmatic gneiss, with mafic and felsic enclaves.

PGE elements: 1. Nadezhda; 2. Occurence no. 15; 3. Occurence no. 2; 4. Vostochnoe – Critical Zone

серии дифференциатов и отличается необычайным разнообразием минеральных фаз и парагенезисов [Glebovitsky et al., 2001]. Кроме собственных минералов МПГ (более 20) в тесной ассоциации с ними встречаются минералы ряда кобальтин-герсдорфит с примесью родия и палладия, палладийсодержащий пентландит, гессит, электрум, самородное золото. Наиболее широкий спектр сульфидов и минералов МПГ отмечается в пегматоидных разновидностях микрогаббро-норитов.

В относительно повышенных количествах сульфиды и минералы МПГ отмечаются в нескольких горизонтах (рудных зонах) расслоенных серий массива Луккулайсваара, приуроченных к двум рудным уровням – Надежда и Критическая Зона (КЗ), в пределах которых выявлено 7 рудопроявлений. Наиболее перспективным рудопроявлением является Надежда. На участке протяженностью 560 метров рудное тело разведано по категории С1 и С2 до глубины 300 м. Содержание МПГ варьирует от 1,0 до 9,8 г/т. Мощность горизонта непостоянная и меняется от 0,3 до 5,0 м.

Разведочные работы проводило ЗАО «Норит» с целью выявления и последующего детального изучения платиноносных горизонтов.

Месторождения золота

На территории Республики Карелия установлено несколько золоторудных проявлений, имеющих высокую степень изученности.

Золотоносные проявления в Паана-Куолаярвинской структуре

В Паана-Куолаярвинской структуре известно значительное число проявлений с комплексным благороднометалльным оруденением (Au, Pt, Pd, U), имеющим признаки как орогенного мезотермального типа, так и железооксидного с медью и золотом (Алакуртти, Апаярви, Курсунярви и др.) (рис. 12).

Ряд комплексных благороднометалльно-урановых проявлений в Паана-Куолаярвинской структуре (Озерное, Лагерное и др.) имеют повышенные содержания молибдена (до 0,2–0,3 %). При этом молибденит характеризуется аномально высокими концентрациями рения (до 1,2 %) и селена (до 15 %), впервые установленными А. А. Калининым [Калинин и др., 2014] и подтвержденными нашими исследованиями. Данное обстоятельство раскрывает новые металлогенические перспективы Паана-Куолаярвинской структуры.

Золото-кварцевое месторождение Майское

Месторождение Майское было открыто в 1971 году, а с 1977 года ПГО «Севзапгеология» проводило там исследовательские работы и первые технические испытания. Добычей золота на Майском в 1993–1998 годах занималась артель старателей «Вуосна ЛТД».

Месторождение размещается в восточной краевой части Паана-Куолаярвинской структуры, сложенной породами ятулийского и людиковийского надгоризонтов нижнего протерозоя, и приурочено к субмеридиональной сдвиговой дислокации. Вмещающими породами для месторождения являются базальт-андезиты и туфы ятулия. Породы в районе месторождения метаморфизованы в фации зеленых сланцев.

Золотоносными являются кварцевожильные зоны протяженностью 2,5–3,8 км, залегающие в основных вулканитах, претерпевших тремолитизацию, биотитизацию, альбитизацию. Месторождение представлено двумя параллельными системами крутопадающих золотоносных кварцевых жил мощностью до 5–6 м северо-восточного-субмеридионального простирания, расположенными в 240–250 м друг от друга и прослеживающимися по простиранию на 2,5 и 3,8 км. Протяженность жил в пределах месторождения – 250–300 м. Морфология жил пластинообразная линзовидная, местами четковидная с раздувами и пережимами.

Оруденение золото-кварцевого малосульфидного типа ассоциируется с мелкозернистым гранулированным кварцем. Продуктивной является золотоносная теллуридно-галенитовая минеральная ассоциация. Золото встречается в виде чешуек, дендритов, тетраэдрических кристаллов, изометричных и ксеноморфных выделений размером 0,01–1,5 мм.

Кварцевые жилы и рудная минерализация имели магматическое и метаморфогенное происхождение, а источник рудного вещества, вероятно, был мантийным. Время формирования оруденения, определенное Re-Os-методом по золоту самородному и халькопириту, дало возраст 397 ± 15 млн лет [Бушмин и др., 2013]. Это, вероятно, связано с термальным воздействием девонского щелочного интрузива Саланлатва, расположенного в 16 км к северу от месторождения.

Содержание золота в рудах месторождения Майское крайне варьирующее – от следов до сотен г/т. Элементы-спутники золота – Cu (до 1 %), Pb (до 0,3 %), Ag (0,008 %), As (0,015 %),

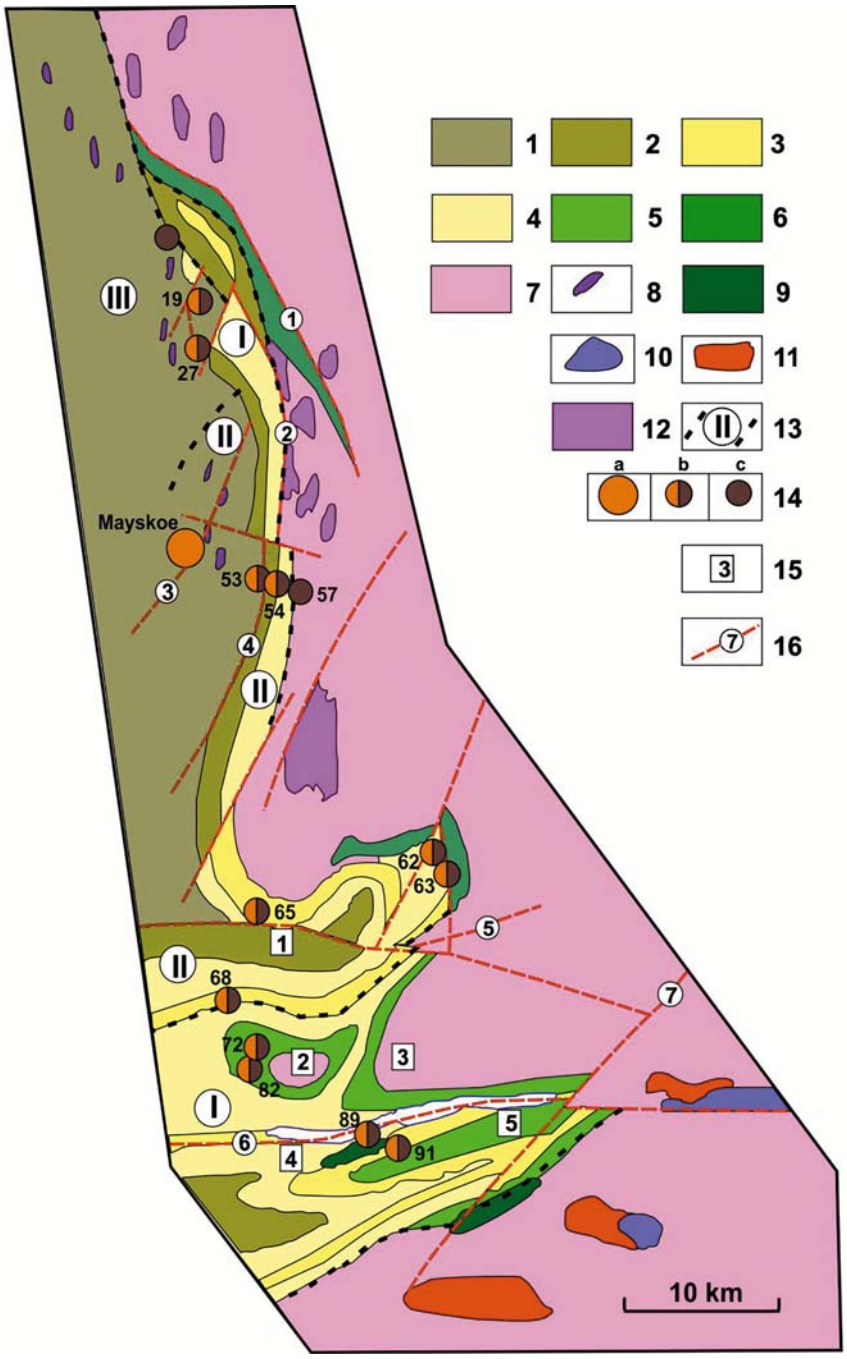


Рис. 12. Геологическая схема размещения золоторудных проявлений на российской части (Паана-Куолаярвинский прогиб) палеопротерозойского зеленокаменного пояса Куусамо (по данным Е. Н. Афанасьевой и др., 2004 [цит. по: Щипцов, Иващенко, 2018]):

1 – суйсарий: базальты, пикробазальты, вулканические брекчии, лавы среднего состава с маломощными прослоями туфов; 2 – людиковий: алевролиты, алевропелиты, туфы, туфоалевролиты, углеродистые и углеродсодержащие сланцы, прослои известняков и доломитов; 3, 4 – ятулий: 3 – базальты, порфириты, прослои туфов; 4 – песчаники, кварцитопесчаники, аркозы, кварцевые конгломераты, кварциты, алевролиты, доломиты; 5 – сумий-сариолий: андезиты, андезибазальты, туфы, туфоконгломераты, туфобрекчии сариолия, кварцевые порфиры, кератофиры сумия; 6 – амфиболовые, биотит-амфиболовые сланцы, амфиболиты; 7 – гнейсы, гранитогнейсы; 8 – гипербазиты; 9 – диабазы, габбродиабазы; 10 – расслоенные перидотит-габбро-норитовые интрузии; 11 – граниты микроклиновые, плагиомикроклиновые; 12 – плагиограниты; 13 – границы структурных (структурно-металлогенических) зон: I – краевая, II – промежуточная, III – центральная; 14 – месторождения золота (а), рудопроявления золото-урановые (б), урановые (в) (5 – Апаярви, 19 – Курсунярви, 27 – Алакуртти, 53 – Лагерное, 54 – Озерное, 57 – Кварцкое, 62 – Сиеппи, 63 – Исосиеппи, 65 – Каутио, 68 – Альбит-1, 72 – Хейкинваара, 82 – Ристаниеми, 89 – Корпела, 91 – Сувалампи); 15 – крупные структуры: синклинали – Совоярвинская (1), Паанаярвинская (4); антиклинали – Рааку-Тунтури (2), Мянтю-Тунтури (3), Минаваарская (5); 16 – разрывные нарушения: Нивоярвинский (1), Восточно-Куолаярвинский (2), Центральный (3), Западно-Куолаярвинский (4), Савоярвинский (5), Паанаярвинский (6), Олангский (7)

Fig. 12. Geological scheme showing the distribution of gold occurrences in the Russian sector (Paana-Kuolajarvi depression) of the Paleoproterozoic Kuusamo greenstone belt (according to E. N. Afanasyeva et al., 2004 [quoted after: Shchiptsov, Ivashchenko, 2018]):

1 – Suisarian: basalts, picrobasalts, volcanic breccia, mafic lava with thin tuff intercalations; 2 – Ludicovian: siltstones, aleuropelites, tuffs, tuffaceous siltstones, carbonaceous and coaly shales, limestone and dolomite interbeds; 3, 4 – Jatulian: 3 – basalts, porphyrites, tuff interbeds; 4 – sandstones, quartzitic sandstones, arkoses, quartz conglomerates quartzites, siltstones, dolomites; 5 – Sumian-Sariolian: Sariolian andesites, andesite-basalts, tuffs, tuffaceous conglomerates, tuffo-breccia, Sumian quartz porphyry, Sumian keratophyres; 6 – amphibole, biotite-amphibole schists, amphibolites; 7 – gneisses, granite-gneisses; 8 – hyperbasic rocks; 9 – diabases and gabbro-diabases; 10 – layered peridotite-gabbro-norite intrusions; 11 – microcline, plagiomicrocline granites; 12 – plagiogranites; 13 – boundaries of structural (structural-metallogenic) zones: I – marginal, II – intermediate, III – central; 14 – gold deposits (a), gold-uranium occurrences (б), uranium occurrences (в) (1 – Apajärvi, 2 – Kursunjärvi, 3 – Alakurtti, 4 – Lagernoye, 5 – Ozernoye, 6 – Kvartsitovoye, 7 – Sieppi, 8 – Isosieppi, 9 – Kautio, 10 – Albit-1, 11 – Heikonvaara, 12 – Ristaniemi, 13 – Korpela, 14 – Suvalampi); 15 – large structures: synclines – Sovajärvi (1), Paanajärvi (4); anticlines – Raaku-Tunturi (2), Mänty-Tunturi (3), Minavaara (5); 16 – faulting: Nivajärvi (1), East Kuolajärvi (2), Tsentralny (3), West Kuolajärvi (4), Savojarvi (5), Paanajärvi (6), Olanga (7)

Sb, Bi, Mo, W. Руда легкообогатима, свыше 90 % золота извлекается гравитационным способом. Запасы по категории С2 до глубины 30 м – 196,8 кг при среднем содержании Au 7,625 г/т [Щипцов, Иващенко, 2018].

Эльмусский золоторудный узел

Геологические исследования, проведенные на Эльмусской площади, показали, что ведущими для локализации позднеархейских более значительных золоторудных объектов являются субмеридиональные зоны рассланцевания и метасоматические преобразования пород. К ним приурочены такие рудопроявления и месторождения, как Педролами, Восточное Орехозеро, Талпус. Вторая группа проявлений имеет связь с кислым дайковым комплексом и приурочена к зонам рассланцевания и гидротермального изменения в кислых толщах в области развития порфировых даек (Эльмус). Третья группа – это золотосодержащие колчеданные руды и зоны сульфидной минерализации [Кулешевич, Лавров, 2007, 2011].

Месторождение Педролампи

Месторождение Педролампи расположено на западном берегу небольшого озера Педролампи в 3,5 км юго-западнее оз. Орехозеро.

Объект относится к небольшим мезотермальным докембрийским рудным комплексам полистадийного генезиса с запасами золота около 0,9 т и суммарными прогнозными ресурсами до 10 т (рис. 13). Оно находится в пределах Эльмусского золоторудного узла. Специалистами «Карелнедр» эта площадь рассматривалась как одна из наиболее перспективных в регионе. В мае 2011 года компания, владевшая Эльмусской площадью, была выкуплена ОАО «Полиметалл».

Месторождение Педролампи приурочено к узлу пересечения субмеридиональной (архейской) и СЗ (протерозойской) зон сдвиговых деформаций [Ручьев, 2011]. Породы, вмещающие золотое оруденение, представлены милонитизированными и лиственитизированными зелеными сланцами по основным туфам и карбонат-хлорит-серицитовыми сланцами по граувакам, песчаникам и полимиктовым конгломератам верхней части лопийского разреза, сопоставимыми с верхней частью разреза Койкарской структуры и осадками бассейнов типа пулл-апарт.

Месторождение приурочено к субмеридиональной сдвиговой зоне рассланцевания,

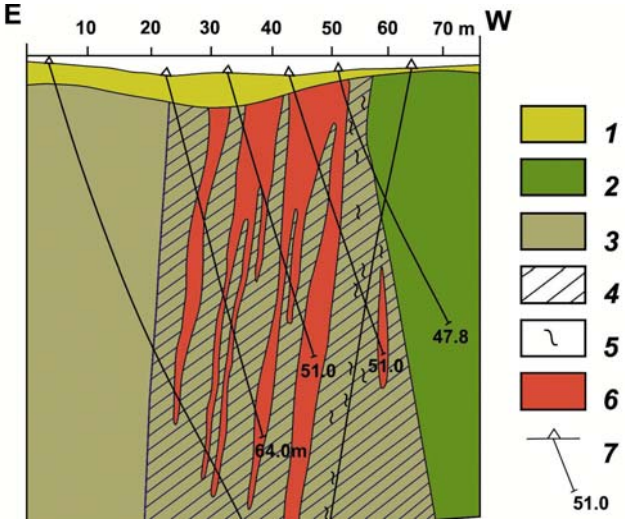


Рис. 13. Геологический разрез участка месторождения Педролампи [Mineral..., 2012]:

1 – четвертичные отложения; 2 – палеопротерозойские, ятулийские вулканогенно-осадочные породы; 3 – неоархейские, лопийские карбонат-кварц-хлоритовые, альбит-серицит-кварцевые и другие сланцы; 4 – пропилит-березитовая измененная минерализованная зона; 5 – кварцевые и кварц-карбонатные жилы; 6 – рудное тело (Au > 1 г/т); 7 – скважина на участке

Fig. 13. Geological section of the Pedrolampi field area [Eilu, 2012]:

1 – Quaternary deposits; 2 – Paleoproterozoic, Jatulian volcanic-sedimentary rock; 3 – Neoarchean, Lopian carbonate-quartz-chlorite, albite-sericite-quartz and other schists; 4 – propilite-berezite altered mineralised zone; 5 – quartz and quartz-carbonate veins; 6 – ore body (Au > g/t); 7 – borehole on the section

милонитизации и метасоматического преобразования лопийских пород семчереченской и бергаульской свит вблизи их контакта с ятулийской структурой северо-западного простирания. В западной части участка развиты метабазальты и туфы по ним. В северной части участка находятся породы, относимые к бергаульской свите и представленные метаандезитами и их туфами, в восточной – метапесчаники, серицит-хлоритовые сланцы (метаграувакки) и конгломераты, содержащие обломки гранитов, порфировых кислых даек и кварца из ранних жил. Эти осадки сопоставимы с верхним горизонтом конгломератов Койкарской структуры, выделяемых как образования пулл-апарт бассейнов [Светов, 2005].

Мезоархейские толщи в пределах участка моноклинально и круто падают на запад и несогласно перекрываются ятулийскими отложениями небольшой синклинальной структуры. Отложения янгозерской свиты ятулийского надгоризонта (кварцевые конгломераты, базальты и кварциты) и в целом вся структура хорошо

выделяются в магнитном поле благодаря повышенной магнитности основных вулканитов. В протерозойской синклинали отчетливо фиксируются постятулийские субширотные сдвиги. Золото-сульфидно-кварцевая минерализация локализована вблизи контакта лопийских и ятулийских толщ.

Рудные тела в пределах продуктивной зоны выделены по содержанию золота 1 г/т (по данным Карельской геологоразведочной экспедиции). Они представляют собой вытянутые линзы или пласты, согласные с общим крутым залеганием сланцев. Руды относятся к золото-кварц-сульфидному рудно-формационному типу (золото-пиритовому и золото-халькопиритовому минеральным типам), без каких-либо значительных примесей других элементов. В них установлено содержание Au в количестве 0,1–46 г/т, Ag до 0,4–5 г/т, Pb до 0,002–0,005 %, Cu до 0,015–0,2 %, Bi до 0,015 %, МПГ до 0,11 г/т, примеси As, Te, Co, Ni и др. [Минерально-сырьевая…, 2005].

В золото-пиритовом минеральном типе главными рудными минералами являются пирит (от 5 до 30–60 % в гнездах) и золото. Пирит образует кубические, иногда незначительно уплощенные кристаллы размером 0,3–1 см (реже до 5 см) и их сростки.

Золото в пиритовых рудах выделяется как мелкое и тонкодисперсное с размером золотин 0,5–2 мм (85 %) и 0,5–0,05 мм. Форма выделения золотин – чешуйки, пластинки, реже дендриты, пленки и шнурки. Золото имеет высокую пробность 983–989 (по данным Карельской геологоразведочной экспедиции).

Золото-полиметаллическое месторождение Лобаш-1

За последние годы масштаб Лобаш-1 изменился от золото-полиметаллического рудопроявления к признанию статуса месторождения [Покалов, Семенова, 1993; Минерально-сырьевая…, 2005; Тытык, Фролов, 2014]. В 2010 году проведена переоценка месторождения, что позволило перевести его в разряд крупнообъемных комплексных золотосодержащих со средним содержанием золота 0,46 г/т и меди 0,18 %. Запасы золота по категории С2 – 34,4 т и ресурсы Р1+Р2 – 209,7 т; запасы меди по категории С2 – 126,2 тыс. т, ресурсы Р1+Р2 – 771,8 тыс. т (протокол заседания государственной комиссии по запасам полезных ископаемых Роснедра РФ № 2129 от 17.02.2010).

Месторождение золота и меди приурочено к зонам рассланцевания и биотитизации на контактах даек кварц-плагиопорфиров (дацит-риодацитов) и во вмещающих толщах – туфах среднего состава и измененных габброидах в результате свекофеннских деформаций [Кулешевич и др., 2004; Тытык, Фролов, 2014]. Оно представляет собой рудоносный пологозалегающий штокверк размером 300–800 м, который прослеживается до глубины 250–300 м. Рудные тела имеют преимущественно линзовидно-пластовую морфологию со средней мощностью 0,9–1,8 м и протяженностью 20–235 м.

Урановые руды Карелии

В Онежском рудном районе Республики Карелия разведано месторождение типа «несогласия» Средняя Падма (урановая формация в альбит-карбонатно-слюдистых метасоматитах) со средним содержанием урана 0,067 и запасами урана по категории С1 1553 т и по категории С2 1513 т (0,4 % российских). Средняя концентрация урана в комплексных рудах этого объекта, основной компонент которых – ванадий, составляет 0,074 % [Минерально-сырьевая…, 2005]. Известно урановое проявление «Птицефабрика» под Петрозаводском. В Приладожье изучалось месторождение Карку (урановая формация в хлорит-карбонатных метасоматитах), известно много проявлений урановой минерализации, связанной с древнейшими рудопроявлениями возраста 2100–1750 млн лет, которые локализованы среди пород кристаллического фундамента, и их образование связывается в основном со свекофеннской тектономагматической активизацией.

Помимо месторождения Карку в рифейских отложениях Салминской впадины установлены два урановых рудопроявления и большое количество аномалий. В Южном Приладожье выявлена серия небольших месторождений в базальных горизонтах венда. Возраст урановой минерализации этих месторождений оценивается в 400–380 млн лет, что соответствует ордовик-девонской активизации Балтийско-Мезенского тектонического пояса. Таким образом, имеются все основания рассматривать Приладожье как металлогеническую провинцию с четко проявленной урановой специализацией [Металлогения…, 1999; Минерально-сырьевая…, 2005].

Урановое месторождение Карку

Месторождение Карку открыто в 1989 году. Оно расположено около деревни Карку Питкярантского района, в северной части северо-восточного побережья Ладожского озера.

На Салминской мульде работу проводили НПО «Невскгеология» и ВИМС. Именно эти результаты использованы при оценке уранового оруденения на месторождении Карку (Северное Приладожье).

Основная масса рудных тел располагается в нижней части рифейских субплатформенных вулканогенно-осадочных отложений и контролируется поверхностью структурно-стратиграфического несогласия между рифейскими породами и кристаллическим фундаментом. Выявлена последовательность и характер рифейских катагенетических преобразований и метасоматических предрудных и рудосопровождающих изменений в осадочно-вулканогенной толще и фундаменте [Кушнеренко и др., 2004; Величкин и др., 2005].

В богатых урановых рудах резко преобладают оксиды урана трех генераций, ассоциирующие с Fe-Mg-хлоритом, кальцитом и пирротином. Главными урановыми минералами рядовых и бедных руд являются силикаты урана. С помощью микротермометрии и Рамановской спектрометрии газо-жидких включений в минералах оценены физико-химические условия образования урановых руд. На месторождении Карку, в отличие от месторождений гидротермального класса, установлена резкая изменчивость во включениях в минералах рудной стадии температуры, состава и концентрации растворов, состава и плотности газовой составляющей (урановая формация в альбит-карбонатно-слюдистых метасоматитах [Кушнеренко и др., 2004].

По геолого-структурным характеристикам месторождение Карку представляет собой «карельскую» разновидность «канадского» подтипа урановорудных объектов типа «несогласия». Исследование месторождения Карку – прямого аналога богатейших рудных объектов Канады и Австралии – позволяет выработать систему поисковых критериев месторождений типа «несогласия» в Приладожье и для Фенноскандинавского щита в целом [Геология..., 2016]. Проведенные комплексные исследования позволили сделать вывод о том, что месторождение Карку обладает рядом геологических, минералого-геохимических и физико-химических общностей с уникальными урановыми месторождениями типа «несогласия» района Атабаска [Величкин и др., 2005].

Основными тектоно-магматическими фазами развития стали следующие геодинамические события: 1) становление массивов гранитов рапакиви и сопровождающих их пород (анортозитов-мангеритов-чарнокитов-гранитов рапакиви) ассоциации (1650–1500 млн лет); 2) внедрение роев диабазовых даек, силлов и проявления бимодального вулканизма и габбро-гранитных интрузивных ассоциаций (субиотний, 1640–1362 млн лет); 3) заложение грабенов, рифтогенных впадин и накопление в них терригенных осадков континентального типа (субиотний, иотний – от 1500(?) до 1270 млн лет); 4) гидротермальная деятельность, связанная с активизацией разрывных структур (1350–1318 млн лет); 5) внедрение диабазовых даек, преимущественно в пределах иотнийских осадочных бассейнов (постпотний, 1268–1258 млн лет). Как видно, этот период характеризуется тектоно-магматическими событиями рифтогенного типа [Шурилов, 2005].

На месторождении выявлены три рудные зоны, к которым относятся пять рудных залежей пластообразной неправильной формы. Размеры залежей от 400×100 до 1600×500 метров, мощность от 0,2 до 20,5 метров. Рифейская зона уранового оруденения в песчаниках и гравелитах салминской свиты нижнего рифея расположена над биотитовыми гнейсами и сланцами палеопротерозоя. Рудные концентрации урана генерируются? в тектонических зонах фундамента. В рифее активизировалась циркуляция по ослабленным зонам разогретых флюидов фундамента, что и способствовало восстановлению урановых скоплений и стало источником данного месторождения. Коффинит в оруденелых песчаниках и гравелитах развит более широко, чем настуран.

Таким представляется механизм формирования богатых и основной части бедных урановых руд месторождения Карку в низах песчано-гравелитовой толщи мощностью 10–15 метров.

Установлена приуроченность рудных залежей к разрывным структурам северо-западного и меридионального направлений. Богатая урановая минерализация приурочена к зонам наложенной графитизации пород фундамента.

Основными источниками урана, представленного главным образом настураном, являлись древние погребенные концентрации, а также радиохимически специализированные породы кристаллического фундамента и терригенного покрова. Ореол бедной коффинитовой минерализации большей частью образовался в результате размыва древних руд пластовыми водами, то есть имеет гидрогенную природу. Направление миграции пластовых вод в значительной степени определялось палеорельефом фундамента. На основе сравнения месторождения Карку с эталонными урановорудными объектами типа «несогласия» подтверждается его отнесение к данному типу.

Заключение

Практическая значимость минерально-сырьевой базы месторождений металлов Республики Карелия зависит от социально-экономических условий, действующих экологических требований и, что существенно, от потребностей современного рынка. В целом минерально-сырьевая база региона опирается на месторождения и крупные рудопроявления твердых полезных ископаемых с утвержденными запасами или ресурсами категории Р1. Важную перспективу развития минерально-сырьевого комплекса формируют рудопроявления и площади с разведанными запасами и ресурсами минерального сырья различного качества, с определенной транспортной доступностью и существующей социальной инфраструктурой. В идеале минерально-сырьевая база должна включать совокупность отраслей промышленности от геологоразведочного и горного производства, металлургии до прочих сфер хозяйственной деятельности (торговля, логистика, финансы и пр.), обеспечивающих потребности человечества в минеральном сырье.

В настоящее время формируется новый вид территориального управления макрорегионом на основе опорных зон экономического развития. Особое внимание при этом должно уделяться освоению месторождений стратегических и дефицитных полезных ископаемых, на основе отбора перспективных объектов и проектов социально-экономического развития региона с учетом обеспечения экологической безопасности и климатических рисков. Все это требует разработки инвестиционных проектов в области освоения минерально-сырьевой базы с применением процедур государственных комплексной и экологической экспертиз, что будет способствовать повышению эффективности и комплексности освоения недр.

Правительство РФ распоряжением от 11 июля 2024 г. № 1838-р утвердило Стратегию развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года. В этом документе определены приоритеты, цели и задачи геологической отрасли и минерально-сырьевого комплекса, направленные на устойчивое долгосрочное обеспечение национальной экономики минеральным сырьем. Обращается внимание на то, что стратегические виды минерального сырья являются особо важными для устойчивого функционирования и стратегического развития национальной экономики, обеспечения национальной обороны и безопасности.

Все значимые полезные ископаемые подразделяются на три группы. В первую группу входят полезные ископаемые, добываемые в настоящее время, запасы которых при любых сценариях развития национальной экономики удовлетворяют ее необходимые потребности до 2035 года. Во вторую группу входят полезные ископаемые, достигнутые уровни добычи которых недостаточно обеспечены запасами на период до 2035 года. В третью группу входят импортозависимые дефицитные виды полезных ископаемых, внутреннее потребление которых в существенной степени обеспечивается ввозом.

Что касается Республики Карелия, то имеющиеся сведения по месторождениям и крупным проявлениям металлов данного региона должны учитываться при формировании и реализации государственных программ в области геологического изучения недр, воспроизводства и использования минерально-сырьевой базы на федеральном и региональном уровнях. В соответствии с потребностями национальной экономики могут существенно меняться направления использования полезных ископаемых, появляться новые их источники, возникать новые стратегические вызовы, в связи с чем сведения подлежат периодическому обновлению. Определенные шаги должны быть сделаны в направлении развития юниорного геологоразведочного бизнеса и геологоразведочного сервиса.

Сегодня добыча металлов в Карелии характеризуется только одним месторождением железных руд. Действующий ГОК «Карельский окатыш» географически находится в Арктической зоне Республики Карелия. Запасы железных руд при любых сценариях развития экономики удовлетворяют ее необходимые потребности до 2035 года, но так как существующие запасы выбывают, то важным фактором становится повышение эффективности геологоразведочных работ за счет подготовки перспективных площадей для продолжения добычных работ. Такой перспективной площадью является Гимольский район.

В России существует проблема, связанная с импортозависимыми дефицитными стратегическими видами металлов. В этом отношении со счетов нельзя сбрасывать Республику Карелия, на территории которой выявлены месторождения урановых (Карку), титановых (Пудожгора, Койкары), молибденовых (Лобаш) и хромовых (Аганозеро) руд.

Не сказано последнее слово по поводу перспектив территории Республики Карелия на платину и золото (месторождение платины

Викша, проявление платины Луккулайсваара и проявления золота на участках Педролампи-Эльмус, Майское и другие). Обращаем внимание, что на государственном балансе находится единственное в европейской части России Кительское месторождение олова.

Литература

Барков А. Ю. Петролого-геохимические особенности платиноносного расслоенного интрузива Луккулайсваара. Северная Карелия: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1992. 24 с.

Богачев В. А., Иваников В. В., Сергеев С. А. U-Pb SHRIMP-датирование рудоносных гранитов Лобашского молибденового месторождения (Северо-Восточная Карелия) // Минерагения докембрия: Мат-лы Всерос. конф. (Петрозаводск, 11–13 ноября 2009). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 22–25.

Богачев А. И., Зак С. И., Сафронова Г. П., Инина К. А. Геология и петрология Елетьозерского массива габброидных пород Карелии: геология, петрография, петрология, металлогения. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 160 с.

Булавин А. В. Формация комплексных медь-уран-молибден-ванадиевых руд зон складчато-разрывных дислокаций Онежской структуры // Металлогения Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. С. 246–261.

Бушмин С. А., Беляцкий Б. В., Крымский Р. Ш., Глебовицкий В. А., Буйко А. К., Савва Е. В., Сергеев С. А. Изохронный Re-Os возраст золота жильного золото-кварцевого месторождения Майское (Северная Карелия, Балтийский щит) // ДАН. 2013. Т. 448, № 1. С. 76–79.

Быстров И. Г., Пирогов Б. И., Якушина О. А. Морфоструктурные и конституционные особенности титаномагнетита железных руд Пудожгорского месторождения // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 6. С. 546–572. doi: 10.7868/S0016777015060076

Величкин В. И., Кушниренко В. Г., Тарасов Н. Н., Андреева О. В., Киселева Г. Д., Крылова Т. Л., Дойникова О. А., Голубев В. Н., Головин В. А. Геология и условия формирования месторождения типа «несогласия» Карку в Северном Приладожье (Россия) // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47, № 2. С. 99–126.

Геология, геохимия и эталонные месторождения урана / Гл. ред. М. Ч. Усков. Ташкент: НИИМР, 2016. 220 с.

Гинзбург И. И. Слюда, ее свойства, применение и распространение в России. Петроград: 1-я Гос. тип., 1919. 128 с.

Голубев А. И., Щипцов В. В., Михайлов В. П., Глушанин Л. В. Минерально-сырьевые ресурсы Республики Карелия // Геология Карелии от архея до наших дней. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 123–134.

Голубев А. И., Трофимов Н. Н., Петров С. В., Филиппов Н. Б. Благороднометалльная минерализация титаномагнетитовых руд Пудожгорского месторождения: технологическая характеристика, минералогия // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 4. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 48–53.

Горошко А. Ф. Новый геолого-промышленный тип месторождений комплексного никель-магнезиального сырья в ультамафитах Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 24–35.

Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Белоусов Е. Ф., Инина К. А. Геология и металлогения Костомукшского железорудного месторождения. Петрозаводск: Карелия, 1981. 143 с.

Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Володичев О. И., Голованова Л. С. Геология и метаморфизм железисто-кремнистых формаций Карелии. Л.: Наука, 1991. 176 с.

Горячев Н. А., Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Диденко А. Н., Петров О. В., Гладкочуб Д. П., Оганов А. Р., Кузнецова А. Н., Верниковский В. А., Шацкий В. С., Котов А. Б., Перепелов А. Б. Нужны ли геология и минеральные ресурсы Российской Федерации? // Вестник РАН. 2022. Т. 92, № 9. С. 825–836. doi: 10.31857/S0869587322090079

Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году / Гл. ред. Д. Д. Тетенькин, О. В. Казанов. М.: ВИМС, 2024. 710 с.

Дорога горных промыслов / Отв. ред. В. А. Шеков. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 362 с.

Журавлев В. А., Ключникова Г. Н., Коровкин В. А., Руденко Д. Г., Турылева Л. В. Недра Северо-Запада Российской Федерации. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2003. 754 с.

Иващенко В. И., Щипцов В. В. Минерагения и минерально-сырьевой потенциал Карельской Арктики // Региональная геология и металлогения. 2018. № 74. С. 35–42.

Калинин А. А., Савченко Е. Э., Селиванова Е. А. Минерализация Se и Te в альбититах и перспективы золотоносности метасоматитов Салла-Куолаярвинской зоны Северной Карелии // ДАН. 2014. Т. 455, № 1. С. 58–61. doi: 10.7868/S0869565214070159

Козловский Е. А. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике мира и России. Статья 1. Минерально-сырьевой комплекс мира и России // Известия вузов. Геология и разведка. 2015. № 1. С. 53–59.

Кольская платинометалльная провинция / Гл. ред. В. В. Адушкин. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 193 с.

Корнеев А. В., Вихко А. С., Фатов Н. В., Иващенко В. И. Месторождение Викша – первый крупный промышленно-перспективный платинометалльный рудный объект на территории Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 31–34. doi: 10.17580/gzh.2019.03.06

Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерагения) / Ред. В. Я. Горьковец, Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 322 с.

Кулешевич Л. В., Голубев А. И. Благороднометалльная минерализация в щелочных метасоматитах Средней Падмы Онежской структуры // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 113–126.

Кулешевич Л. В., Дмитриева А. В. Геохимические особенности измененных пород на месторождениях

рудного поля Лобаш, Карелия // Труды Ферсмановской научной сессии. Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2021. С. 239–243. doi: 10.31241/FNS.2021.18.044

Кулешевич Л. В., Лавров О. Б. Месторождение Педролампи и золоторудные проявления Эльмусской площади // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 10. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 146–158.

Кулешевич Л. В., Лавров О. Б. Новые данные по минералогии золоторудных объектов Карелии // Геология Карелии от архея до наших дней. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 149–160.

Кулешевич Л. В., Тытык В. М., Коротаева Н. Н. Золото-полиметаллическое местрождение Лобаш-1 в докембрии Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 111–126.

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

Кушнеренко В. К., Петров Ю. В., Пичугин В. А. и др. Геологическое строение и последовательность эпигенетического минералообразования уранового месторождения Карку (Северо-Восточное Приладожье) // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Вып. 146. М., 2004. С. 11–22.

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

Металлогения Карелии / Ред. А. И. Богачев, Р. А. Хазов. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1982. 200 с.

Металлогения Карелии / Ред. С. И. Рыбаков, А. И. Голубев. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. 340 с.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. / Под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. Петрозаводск: Карелия, 2005. Кн. 1. 278 с.; 2006. Кн. 2. 356 с.

Митрофанов Ф. П., Жиров Д. В., Баянова Т. Б. Комплексные прогнозно-поисковые критерии главной металлогенической специализации (малосульфидной Pt-Pd или сульфидной Cu-Ni) раннепротерозойских базит-гипербазитовых расслоенных массивов кристаллических щитов // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. С. 7–14.

Миронов С. М. Проблемы недропользования и задачи государственного регулирования // Недропользование – XXI век. 2021. № 3-4(91). С. 62–65.

Монтин А. С. Платиноносность расслоенного массива Луккулайсваара в Северной Карелии // Вестник МГУ, серия Геология. 2009. № 4. С. 60–62.

Москалева В. Н., Марковский Б. А., Колбанцев Л. Р., Орлова М. П., Смолькин В. Ф. Магматизм и металлогения рифтогенных систем восточной части Балтийского щита / Отв. ред. А. Д. Щеглов. СПб.: Недра, 1993. 248 с.

Олейник И. Л., Кулешевич Л. В. Благороднометалльная минерализация Койкарского силла // Региональная геология, минералогия и полезные ископаемые Кольского полуострова. Труды XIII Всероссийской с международным участием Ферсмановской научной сессии. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. С. 190–194.

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

Открытие и разведка Костомукшского железорудного месторождения: учебное пособие для студентов / Сост. Н. В. Шаров. Петрозаводск: ПетрГУ, 2014. 103 с.

Петров С. В., Бороздин А. П., Олейник И. Л., Тарасова И. П., Котова И. К., Котов С. Р., Шелухина Ю. С., Колушева О. С. Состав и условия формирования благороднометалльных руд Койкарско-Святнаволокского силла (Республика Карелия) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2023. Т. 68(2). С. 235–264. doi: 10.21639/spbu07.2023.20

Покалов В. Т., Семенова Н. В. Лобаш – первое крупное молибденовое месторождение докембрийского возраста // Геология рудных месторождений. 1993. № 3. С. 262–270.

Резниченко В. А., Шабалин Л. И. Титаномагнетиты, месторождения, металлургия, химическая технология. М.: Наука, 1986. 291 с.

Ручьев А. М. Структурные особенности разведочного участка и относительный возраст золоторудного месторождения Педролампи // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 92–112.

Светов С. А. Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 229 с.

Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Мат-лы 14-й Международной конференции / Ред. Н. В. Шаров, В. В. Щипцов, Ю. К. Щукин, А. В. Первунина, Н. А. Яблокова, Г. Н. Соколов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. Ч. 1. 311 с.

Слабунов А. И., Исаченко А. А. Литогеохимия полосчатых железистых кварцитов шурловаарской свиты Костомукшского зеленокаменного пояса (Карельский кратон) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 6. С. 30–50. doi: 10.17076/geo1950

Слабунов А. И., Кервинен А. В., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Максимов О. А., Медведев П. В. Главные эпизоды формирования полосчатых железистых кварцитов Костомукшского зеленокаменного пояса (Карельский кратон): данные U-Th-Pb датирования циркона // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 2. С. 5–22. doi: 10.17076/geo1749

Трофимов Н. Н., Голубев А. И. Пудожгорское благороднометалльное титаномагнетитовое месторождение. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008. 123 с.

Трофимов Н. Н., Голубев А. И., Смирнова Н. К. Комплексное использование руд и вскрышных пород Пудожгорского месторождения // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. С. 92–110.

Тытык В. М., Фролов П. В. Молибденовое месторождение Лобаш – крупный перспективный объект в Республике Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 1. С. 56–62.

Хазов Р. А. Геологические особенности оловянного оруденения Северного Приладожья. Л.: Наука, 1973. 87 с.

Хазов Р. А. Новое проявление оловянного оруденения в Северном Приладожье (Кительское месторождение) // Советская геология. 1987. № 8. С. 119–125.

Черников А. А., Дубинчук В. Т., Ожогин Д. О., Чистякова Н. И. Особенности нахождения и распределения благородных металлов в рудах и зоне окисления онежских уран-ванадиевых месторождений Южной Карелии // Новые данные о минералах. 2007. Вып. 42. С. 43–49.

Шурилов А. В. Геолого-структурная позиция уранового месторождения Карку (северо-восточное Приладожье): Автореф. дис. … канд. геол.-мин. наук. СПб., 2005. 21 с.

Щипцов В. В. Опорные пункты стратегического и экономически важного минерального сырья Арктической зоны Российской Федерации в условиях геополитической турбулентности на севере Европы и в Арктике. Петрозаводск: ПетрГУ, 2024а. С. 142–149.

Щипцов В. В. Полезные ископаемые // Атлас Республики Карелия. Петрозаводск: Версо, 2021. С. 10.

Щипцов В. В. Экономически важные твердые полезные ископаемые Арктической зоны Республики Карелия // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Мат-лы XVIII Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2024б. Т. 1. С. 48–58.

Щипцов В. В., Бурцев И. Н., Жиров Д. В., Волошин А. В., Машин Д. О. Промышленные минералы севера европейской части России // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 6. С. 7–35. doi: 10.17076/geo1276

Щипцов В. В., Иващенко В. И. Минерально-сырьевой потенциал арктических районов Республики Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 2. С. 3–33. doi: 10.17076/geo775

Щипцов В. В., Фролов П. В., Ильина В. П., Кевлич В. И. Минералого-технологические особенности промышленных минералов Аганозерского блока Бураковского массива // Юбилейный съезд РМО «200 лет РМО»: Мат-лы конф. СПб., 2017. Т. 2. С. 171–173.

Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма / Отв. ред. Е. П. Иешко. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. 110 с.

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations // Encyclopedia of Geology (2nd ed.) / Eds. D. Anderton, S. A. Elias. Oxford: Academic Press, 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.400199-5

Borozdin A. P., Petrov S. V., Polekhovsky Yu. S., Tarasova I. P., Bulavin A. V., Oleynik I. L., Bederova L. L. The mineral assemblage of Au-PGE-Cu-V-Ti-Fe ores in the Vikshozero ore occurrence (Koikar sill, South Karelia, Russia) // Proceedings of the12th international Platinum Symposium. Absracts. Yekaterinburg: UB RAS, 2014. P. 63–54.

Gautneb H., Ahtola T., Bergman T. Gonzalez J., Hallberg A., Litvinenko V., Shchiptsov V., Voytekhovsky Y. Industrial minerals deposits map of the Fennoscandian Shield / Ed. Eric Jonsson et al. // 12th Biennial SGA Meeting. Mineral deposit research for a high-tech world. Proceedings. Uppsala: Elanders Sverige AB, 2013. Vol. 4. P. 1767–1769.

Glebovitsky V. A., Semenov V. S., Belyatsky B. V., Koptev-Dvornikov E. V., Pohelintseva N. F., Kireev B. S., Koltson A. B. The structure of the Lukkulaisvaara intrusion, Olanka, Northern Group, Northern Karelia: petrological implications // Can. Mineral. 2001. Vol. 39. P. 607–637.

Koistinen T., Stephens M. B., Bogatchev V., Nordgulen O., Wennerström M., Korchonen J. Geological map of Fennoscandian Shield, scale 1:2 000 000 / Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia. Trondheim, 2001.

Levskii L. K., Skublov S. G., Gembitskaya I. M. Isotopic-geochemical study of zircons from metabasites of the Kontokki dike complex: age of regional metamorphism in the Kostomuksha structure // Petrology. 2009. Vol. 17(7). P. 669–683. doi: 10.1134/S08669591.109070030

Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia / Ed. P. Eilu. Espoo: Geological Survey of Finland, 2012. 401 p.

Puchtel I. B., Hofmann A. W., Mozger K., Jouchum K. P., Shchipansky A. A., Samsonov A. V. Oceanic plateau model for continental crust growth in the Archean: A case study from Kostomuksha greenstone belt, NW Baltic Shield // Earth Planet Sci. Lett. 1998. Vol. 155. P. 57–74. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00202-1

References

Adushkin V. V. (ed.). Kola platinum-metal province. Apatity: KNTs RAN; 2023. 193 p. (In Russ.)

Barkov A. Yu. Petrological and geochemical features of the platinum-bearing layered intrusion of the Lukkulaisvaara. Northern Karelia: Summary of PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow; 1992. 24 p. (In Russ.)

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations. *D. Anderton, S. A. Elias (eds.). Encyclopedia of Geology (2nd ed.)*. Oxford: Academic Press; 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.400199-5

Bogachev V. A., Ivanikov V. V., Sergeev S. A. U–Pb SHRIMP dating of ore-bearing granites of the Lobash molybdenum deposit (North-Eastern Karelia). *Merageniya dokembriya: Mat-ly Vseros. konf. (Petrozavodsk, 11–13 noyabrya 2009)* = *Precambrian merageny: Proceed. of the All-Russian conf. (Petrozavodsk, Nov. 11–13, 2009).* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2009. P. 22–25. (In Russ.)

Bogachev A. I., Khazov R. A. (eds.). Metallogeny of Karelia. Petrozavodsk: KF AN SSSR; 1982. 200 p. (In Russ.)

Bogachev A. I., Zak S. I., Safronova G. P., Inina K. A. Geology and petrology of the Elet'ozero massif of gabbroic rocks of Karelia: geology, petrography, petrology, metallogeny. – Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1963. 160 p. (In Russ.)

Borozdin A. P., Petrov S. V., Polekhovsky Yu. S., Tarasova I. P., Bulavin A. V., Oleynik I. L., Bederova L. L. The mineral assemblage of Au-PGE-Cu-V-Ti-Fe ores in the Vikshozero ore occurrence (Koikar sill, South Karelia, Russia). *Proceedings of the12th international Platinum Symposium. Absracts.* Yekaterinburg: UB RAS; 2014. P. 63–54.

Bulavin A. V. Formation of complex copper-uranium-molybdenum-vanadium ores of fold-fault dislocation zones of the Onega structure. *Metallogeniya Karelii = Metallogeny of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. P. 246–261. (In Russ.)

Bushmin S. A., Belyatsky B. V., Krymsky R. Sh., Glebovitskii V. A., Buiko A. K., Savva E. V., Sergeev S. A. Isochronous Re-Os age of gold from the Mayskoye vein gold-quartz deposit (Northern Karelia, Baltic Shield). *Doklady Akademii nauk = Doklady Earth Sciences.* 2013;448(1):76–79. (In Russ.)

Bystrov I. G., Pirogov B. I., Yakushina O. A. Morphostructural and constitutional features of titanomagnetite in iron ore of the Pudozhgorsky deposit. *Geology of Ore Deposits.* 2015;57(6):496–521. doi: 10.1134/S1075701515060070

Chernikov A. A., Dubinchuk V. T., Ozhogin D. O., Chistyakova N. I. Features of the occurence and distribution of noble metals in the ores and oxidized zone of the Onega uranium-vanadium deposits, South Karelia. *Novye dannye o mineralakh = New Data on Minerals.* 2007;42:43–49. (In Russ.)

Eilu P. (ed.). Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia Espoo: Geological Survey of Finland; 2012. 401 p.

Gautneb H., Ahtola T., Bergman T. Gonzalez J., Hallberg A., Litvinenko V., Shchiptsov V., Voytekhovsky Y. Industrial minerals deposits map of the Fennoscandian Shield. *12th Biennial SGA Meeting. Mineral deposit research for a high-tech world. Proceedings.* Uppsala: Elanders Sverige AB; 2013. Vol. 4. P. 1767–1769.

Ginzburg I. I. Mica, its properties, application and distribution in Russia. Petrograd: 1st Gos. tip.; 1919. 128 p. (In Russ.)

Glebovitsky V. A., Semenov V. S., Belyatsky B. V., Koptev-Dvornikov E. V., Pohelintseva N. F., Kireev B. S., Koltson A. B. The structure of the Lukkulaisvaara intrusion, Olanka, Northern Group, Northern Karelia: petrological implications. *Can. Mineral.* 2001;39:607–637.

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

Golubev A. I., Shchiptsov V. V., Mikhailov V. P., Glushanin L. V. Mineral resources of the Republic of Karelia. *Geologiya Karelii ot arkheya do nashikh dnei = Geology of Karelia from the Archean to the present day.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. (In Russ.)

Golubev A. I., Trofimov N. N., Petrov S. V., Filippov N. B. Precious metal mineralization of titanomagnetite ores of the Pudozhgorskoye deposit: technological characteristics, mineralogy. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 4. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. P. 48–53. (In Russ.)

Goroshko A. F. New geological and industrial type of deposits of complex nickel-magnesian raw materials in ultamafites of Karelia. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1998. P. 24–35. (In Russ.)

Gor'kovets V. Ya., Raevskaya M. B., Belousov E. F., Inina K. A. Geology and metallogeny of the Kostomuksha iron ore deposit. Petrozavodsk: Karelia; 1981. 143 p. (In Russ.)

Gor'kovets V. Ya., Raevskaya M. B., Volodichev O. I., Golovanova L. S. Geology and metamorphism of ferruginous-siliceous formations of Karelia. Leningrad: Nauka; 1991. 176 p. (In Russ.)

Gor'kovets V. Ya., Sharov N. V. (eds.). Kostomuksha ore region (geology, deep structure and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 322 p. (In Russ.)

Goryachev N. A., Kuz'min M. I., Yarmolyuk V. V., Didenko A. N., Petrov O. V., Gladkochub D. P., Oganov A. R., Kuznetsova A. N., Vernikovskii V. A., Shatskii V. S., Kotov A. B., Perepelov A. B. Are geology and mineral resources of the Russian Federation needed? *Vestnik RAN = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2022;92(9):825–836. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869587322090079

Ieshko E. P. (ed.). Ecological problems of development of the Srednyaya Padma deposit. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2005. 110 p. (In Russ.)

Ivashchenko V. I., Shchiptsov V. V. Minerageny, mineral and raw material potential of Arctic Karelia. *Regional'naya geologiya i metallogeniya = Regional Geology and Metallogeny*. 2018;74:35–42. (In Russ.)

Kalinin A. A., Savchenko E. E., Selivanova E. A. Se and Te mineralization in albitites and prospects of the metasomatites for Au, Salla-Kuolajarvi Belt, Northern Karelia. *Doklady Earth Sciences.* 2014;455(1):229–232. doi: 10.1134/S1028334X14030039

Khazov R. A. Geological features of tin mineralization in Northern Priladozhye. Leningrad: Nauka; 1973. 87 p. (In Russ.)

Khazov R. A. New manifestation of tin mineralization in Northern Priladozhye (Kitelskoye deposit). *Sovetskaya geologiya = Soviet Geology*. 1987;8: 119–125. (In Russ.)

Koistinen T., Stephens M. B., Bogatchev V., Nordgulen O., Wennerström M., Korchonen J. Geological map of Fennoscandian Shield, scale 1:2 000 000. Trondheim; 2001.

Korneev A. V., Vikhko A. S., Fatov N. V., Ivashchenko V. I. The Viksha deposit is the first large industrially promising platinum-metal ore object in Karelia. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2019;3:31–34. (In Russ.). doi: 10.17580/gzh.2019.03.06

Kozlovsky E. A. Mineral resources in Russian and world economy. Article 1. Russian and world mineral resources sector. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka = Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2015;1:53–59. (In Russ.)

Kuleshevich L. V., Dmitrieva A. V. Geochemical features of altered rocks at the deposits of the Lobash ore field, Karelia. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii = Proceedings of the Fersman scientific session.* Apatity: KNTs RAN; 2021. P. 239–243. (In Russ.). doi: 10.31241/FNS.2021.18.044

Kuleshevich L. V., Golubev A. I. Noble metal mineralization in alkaline metasomatites of the Middle Padma of the Onega structure. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 14. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. P. 113–126. (In Russ.)

Kuleshevich L. V., Lavrov O. B. New data on the mineralogy of gold ore objects of Karelia. *Geologiya Karelii ot arkheya do nashikh dnei = Geology of Karelia from the Archean to the present day.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. P. 149–160. (In Russ.)

Kuleshevich L. V., Lavrov O. B. Pedrolampi deposit and gold ore occurrences of the Elmus area. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 10. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. P. 146–158. (In Russ.)

Kuleshevich L. V., Tytyk V. M., Korotaeva N. N. Lobash-1 gold-polymetallic deposit in the Precambrian of Karelia. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. P. 111–126. (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 (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. P. 3–41. (In Russ.). doi: 10.17076/geo444

Kushnerenko V. K., Petrov Yu. V., Pichugin V. A. et al. Geological structure and sequence of epigenetic mineral formation of the Karku uranium deposit (Northeastern Priladozhye). *Materialy po geologii mestorozhdenii urana, redkikh i redkozemel'nykh metallov = Materials on the geology of uranium, rare and rare earth metal deposits.* Iss. 146. Moscow; 2004. P. 11–22. (In Russ.)

Levskii L. K., Skublov S. G., Gembitskaya I. M. Isotopic-geochemical study of zircons from metabasites of the Kontokki dike complex: age of regional metamorphism in the Kostomuksha structure. *Petrology*. 2009;17(7):669–683. doi: 10.1134/S08669591.109070030

Mikhailov V. P., Aminov V. N. (eds.). Mineral resource base of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: Karelia; 2005. Book 1. 278 p.; 2006. Book 2. 356 p. (In Russ.)

Mironov S. M. Problems of subsoil use and tasks of state regulation. *Nedropol'zovanie – XXI vek = Subsoil Use – XXI Century*. 2021;3-4(91):62–65. (In Russ.)

Mitrofanov F. P., Zhirov D. V., Bayanova T. B. Complex prognostic and prospecting criteria of the main metallogenic specialization (low-sulfide Pt-Pd or sulfide Cu-Ni) of Early Proterozoic basic-ultrabasic layered massifs of crystalline shields. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the KSC RAS*. 2012;1:7–14. (In Russ.)

Montin A. S. Platinum content of the layered massif Lukkulaisvaara in Northern Karelia. *Vestnik MGU, seriya Geologiya = Bulletin of Moscow State University. Ser. Geology.* 2009;4:60–63. (In Russ.)

Moskaleva V. N., Markovskii B. A., Kolbantsev L. R., Orlova M. P., Smol'kin V. F. Magmatism and metallogeny of riftogenic systems of the eastern part of the Baltic Shield. St. Petersburg: Nedra; 1993. 248 p. (In Russ.)

Oleinik I. L., Kuleshevich L. V. Noble metal mineralization of the Koykar sill. *Regional'naya geologiya, mineralogiya i poleznye iskopaemye Kol'skogo poluostrova. Trudy XIII Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem Fersmanovskoi nauchnoi sessii = Regional geology, mineralogy and useful minerals of the Kola Peninsula. Proceedings of the XIII All-Russian with int. part. Fersman scientific session*. Apatity: KNTs RAN; 2016. P. 190–194. (In Russ.)

Petrov S. V., Borozdin A. P., Oleinik I. L., Tarasova I. P., Kotova I. K., Kotov S. R., Shelukhina Yu. S., Kolusheva O. S. Composition and formation conditions of noble metal ores of the Koykar-Svyatnavolok sill (Republic of Karelia). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2023;68(2):235–264. (In Russ.). doi: 10.21639/spbu07.2023.20

Pokalov V. T., Semenova N. V. Lobash – the first large molybdenum deposit of the Precambrian age. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits.* 1993;3:262–270. (In Russ.)

Puchtel I. B., Hofmann A. W., Mozger K., Jouchum K. P., Shchipansky A. A., Samsonov A. V. Oceanic plateau model for continental crust growth in the Archean: A case study from Kostomuksha greenstone belt, NW Baltic Shield. *Earth Planet Sci. Lett.* 1998;155:57–74. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00202-1

Reznichenko V. A., Shabalin L. I. Titanomagnetites, deposits, metal industry, chemical technology. Moscow: Nauka, 1986. 291 p. (In Russ.)

Ruch'ev A. M. Structural features of the exploration site and the relative age of the Pedrolampi gold deposit. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 14. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. P. 92–112. (In Russ.)

Rybakov S. I., Golubev A. I. (eds.). Metallogeny of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. 340 p. (In Russ.)

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

Sharov N. V. (comp.). Discovery and exploration of the Kostomuksha iron ore deposit: a textbook for students. Petrozavodsk: PetrGU; 2014. 103 p. (In Russ.)

Sharov N. V., Shchiptsov V. V., Shchukin Yu. K., Pervunina A. V., Yablokova N. A., Sokolov G. N. (eds.). Relationship between surface structures of the earth's crust and deep ones: *Proceedings of the 14th International Conference*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. Part 1. 311 p. (In Russ.)

Shekov V. A. (ed.). The road of mining. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. 362 p. (In Russ.)

Shurilov A. V. Geological and structural position of the Karku uranium deposit (northeastern Priladozhye): Summary of PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg; 2005. 21 p. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. Economically important solid minerals of the Arctic zone of the Republic of Karelia. *Geologiya i mineral'nye resursy Evropeiskogo Severo-Vostoka Rossii: Mat-ly XVIII Geologicheskogo s"ezda Respubliki Komi = Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Proceedings of the XVIII geological congress of the Komi Republic*. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN; 2024. Vol. 1. P. 48–58. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. Strongholds of strategic and economically important mineral resources of the Arctic zone of the Russian Federation in the conditions of geopolitical turbulence in the north of Europe and in the Arctic. Petrozavodsk: PetrGU; 2024. P. 142–149. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. Useful minerals. *Atlas Respubliki Kareliya = Atlas of the Republic of Karelia*. Petrozavodsk: Verso; 2021. P. 10. (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., Frolov P. V., Il'ina V. P., Kevlich V. I. Mineralogical and technological features of industrial minerals of the Aganozersky block of the Burakovsky massif. *Yubileinyi s"ezd RMO «200 let RMO»: Mat-ly konf. = Anniversary congress of the Russian Mineralogical Society "200 years of the RMS": Proc. conf.* St. Petersburg; 2017. Vol. 2. P. 171–173. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Ivashchenko V. I. Mineral potential of Arctic Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;2:3–33. (In Russ.). doi: 10.17076/geo775

Slabunov A. I., Isachenko A. A. Lithogeochemistry of the Shurlovaara banded iron formation, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Russia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2024;6:30–50. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1950

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Egorov A. V., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Main stages of the Kostomuksha greenstone belt banded iron formation genesis, Karelian craton: based on U-Th-Pb dating of zircon*. Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2023;2:5–22. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1749

Svetov S. A. Magmatic systems of the ocean-continent transition zone in the Archean of the Eastern Fennoscandian Shield. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2005. 229 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: VIMS; 2024. 710 p. (In Russ.)

Trofimov N. N., Golubev A. I. Pudozhgorskoye noble metal titanomagnetite deposit. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 123 p. (In Russ.)

Trofimov N. N., Golubev A. I., Smirnova N. K. Complex use of ores and overburden rocks of the Pudozhgorskoye deposit. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. P. 92–110. (In Russ.)

Tytyk V. M., Frolov P. V. Lobash molybdenum deposit: a big promising economic deposit in the Republic of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2014;1:56–62. (In Russ.)

Uskov M. Ch. (ed.). Geology, geochemistry and reference uranium deposits. Tashkent: NIIMR; 2016. 220 p. (In Russ.)

Velichkin V. I., Kushnerenko V. K., Tarasov N. N., Andreeva O. V., Kiseleva G. D., Krylova T. L., Doinikova O. A., Golubev V. N., Golovin V. A. Geology and formation conditions of the Karku unconformity-type deposit in the Northern Ladoga Region (Russia). *Geology of Ore Deposits.* 2005;47(2):87–112.

Zhuravlev V. A., Klyuchnikova G. N., Korovkin V. A., Rudenko D. G., Turyleva L. V. Subsoil of the North-West of the Russian Federation. St. Petersburg: VSEGEI; 2003. 754 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 24.07.2025; принята к публикации / accepted: 15.09.2025.
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, руководитель лаборатории

e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Shchiptsov, Vladimir

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, IG KarRC RAS; professor, PetrSU

Svetov, Sergei

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Director, Head of Laboratory

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 39–43
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 39–43
DOI: 10.17076/geo2154

УДК 552.321.5 : 551.71 : 550.93 (540)

NEOARCHEAN GABBROIDS OF THE SOUTHERN BUNDELKHAND TERRANE, BUNDELKHAND CRATON: NEW GEOCHRONOLOGY DATA AND GEODYNAMIC SETTINGS

A. Slabunov[1]*, A. Kervinen[1], S. Mishra[2], V. Singh[3]

*[1] Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *slabunov@krc.karelia.ru*
[2] Research Center in Applied Geosciences, Autonomous University of Coahuila (26830 Nueva Rosita, Coahuila de Zaragoza, México)
[3] Department of Geology, Institute of Earth Science, Bundelkhand University (284128 Jhansi, India)

Mafic magmatism is an important indicator of large-scale thermal events associated with the involvement of the mantle. It is also common in Archean cratons, including those of the Indian Shield, and is used for correlation of endogenic activity in them. Distinguished in the Bundelkhand Craton, which is part of a northern group of Indian Shield cratons, is Archean mafic magmatism, which took place before Neoarchean (2.5 Ga) cratonization, and Paleoproterozoic magmatism. The Lalitpur group of gabbroic rock massifs, which has not been studied previously, was revealed in the western South Bundelkhand terrane of the Bundelkhand Craton. The gabbroic rocks are cut by Neoarchean granites and are, therefore, Archean. The massifs consist of leucocratic amphibole gabbro to diorite, and display coarse-grained structure but no signs of layering. The gabbro contains zircon occurring as semi-transparent to transparent pale-brown crystals of elongated prismatic habit. The grains are very coarse, varying in size from 200 to 500 μm. Mineral inclusions in the zircon are abundant. They consist of amphibole, pyroxene, plagioclase, quartz and apatite. The zircon grains were dated using the laser ablation method (LA-ICP-MS). The isotopic age of the late stage in the formation of the massifs is 2551 ± 5 Ma. Neither individual grains nor older cores in the zircon grains analyzed have been found. Thus, the age of the gabbroic rocks in the Lalitpur group of massifs is comparable with that of subduction volcanism in the Central Bundelkhand terrane. The geochemical features of the gabbroic rocks suggest that their formation is also associated with subduction geodynamics. The above mafic intrusions were probably formed in the suprasubduction zone of an active continental margin.

Keywords: Bundelkhand Craton; Indian Shield; Neoarchean; zircon; gabbro

For citation: Slabunov A., Kervinen A., Mishra S., Singh V. Neoarchean gabbroids of the Southern Bundelkhand terrane, Bundelkhand Craton: new geochronology data and geodynamic settings. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 39–43. doi: 10.17076/geo2154

Funding. This study is a contribution to the studies under project FMEN-2023-0009 conducted by the Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS.

А. И. Слабунов[1]*, А. В. Кервинен[1], С. Мишра[2], В. К. Сингх[3].

НЕОАРХЕЙСКИЕ ГАББРОИДЫ ЮЖНО-БУНДЕЛКХАНДСКОГО ТЕРРЕЙНА БУНДЕЛКХАНДСКОГО КРАТОНА (ИНДИЯ): НОВЫЕ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

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

[2] Исследовательский центр прикладных наук о Земле, Университет Коауилы (Нуэва-Росита, Коауила де Сарагоса, Мексика, 26830)

[3] Геологический факультет Бунделкхандского университета (Джанси, Индия, 284128)

Основной магматизм является важным индикатором крупных термальных событий, связанных с вовлечением в петрогенезис мантии. Он обычен и в архейских кратонах, в том числе Индийского щита, и используется для корреляции проявления в них эндогенной активности. В пределах Бунделкхандского кратона, входящего в северную группу кратонов Индийского щита, выделяется архейский основной магматизм, проявлявшийся до неоархейской (2,5 млрд лет) кратонизации, и палеопротерозойский. В западной части Южно-Бунделкхандского террейна рассматриваемого кратона установлена ранее не исследованная Лалитпурская группа габброидных массивов. Эти габброиды секутся неоархейскими гранитами и, следовательно, относятся к архейским. Массивы сложены лейкократовыми амфиболовыми габбро до диоритов, характеризуются крупнозернистой структурой, признаков расслоенности в них не установлено. Габбро содержат цирконы. Они представлены прозрачными, полупрозрачными бледноокрашенными в коричневые тона кристаллами удлиненно-призматического габитуса. Зерна очень крупные, от 200 мкм, и некоторые достигают 500 мкм. Характерно большое количество минеральных включений в цирконе. Они представлены амфиболом, пироксеном, плагиоклазом, кварцем и апатитом. Датирование циркона проведено методом лазерной абляции (LA-ICP-MS). Изотопный возраст поздней магматической стадии становления массивов оценивается в 2551 ± 5 млн лет. Среди изученных цирконов не установлено ни отдельных зерен, ни ядер более древнего возраста. Таким образом, возраст габброидов Лалитпурской группы массивов сопоставим с таковым для субдукционного вулканизма в Центрально-Бунделкхандском террейне. С учетом геохимических особенностей габброидов их формирование также, вероятно, связано с субдукционной геодинамикой. Формирование рассмотренных основных интрузий, вероятно, происходило в надсубдукционной зоне активной континентальной окраины.

Ключевые слова: Бунделкхандский кратон; Индийский щит; неоархей; циркон; габбро

Для цитирования: Slabunov A., Kervinen A., Mishra S., Singh V. Neoarchean gabbroids of the Southern Bundelkhand terrane, Bundelkhand Craton: new geochronology data and geodynamic settings // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 39–43. doi: 10.17076/geo2154

Финансирование. Работа является вкладом в исследования ИГ КарНЦ РАН по теме FMEN-2023-0009.

Mafic magmatism is an important indicator of large-scale thermal events associated with the involvement of the mantle and its products into petrogenesis. It is an essential constituent of large igneous provinces (LIP) [Ernst, 2014]. It is also common in Archean cratons, including those of the Indian Shield, and is used for correlation of endogenic activity in them [Slabunov et al., 2024a].

The Indian Shield is a mosaic of cratonic blocks that divides the Central Indian tectonic zone into the Northern and Southern groups. The Western Dharwar, Eastern Dharwar, Singhbum and Bastar Cratons make up the southern group, and the Bundelkhand and Aravalli Cratons – the Northern Group (Fig. 1). The Bundelkhand Craton consists mainly of Neoarchean granites, with Paleo-to-Neoarcheane TTG-granitoids, amphibolites (Paleoarchean basic rocks), greenstone complexes, and layered mafic-ultramafic intrusions among them [Singh et al., 2021; Joshi et al., 2022]. The Bundelkhand Craton is further subdivided into the Northern-, Central- and Southern Bundelkhand terranes (Fig. 1) [Singh et al., 2021].

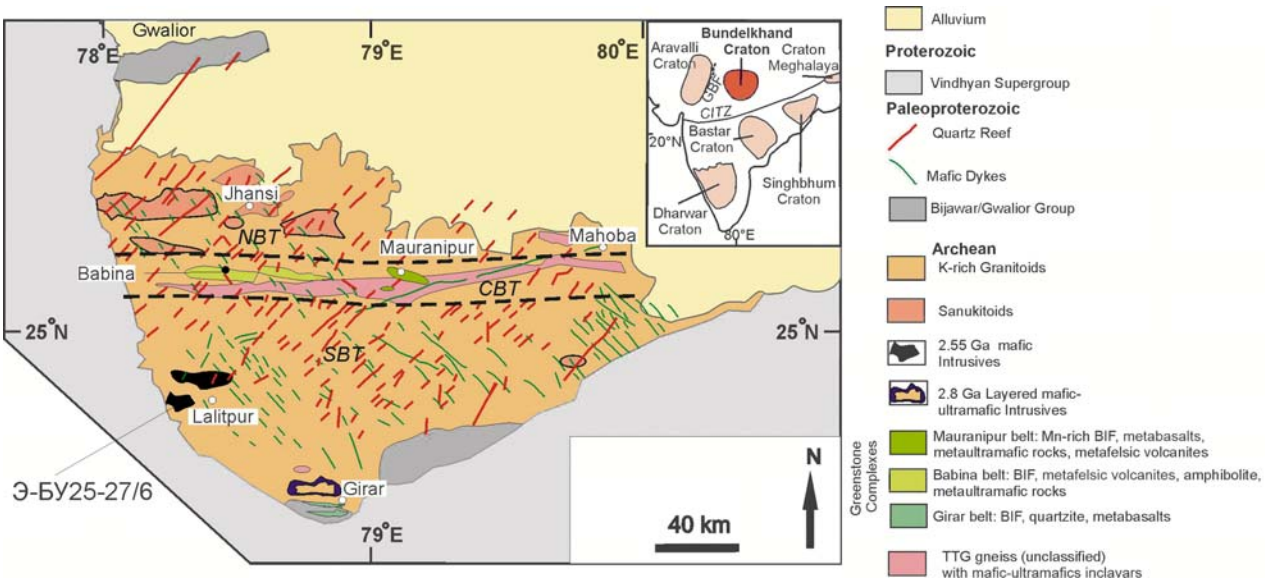


Fig. 1. Geological map of the Bundelkhand Craton [Singh et al., 2021; Slabunov et al., 2024b]. NBT, CBT, and SBT denote the Northern, Central, and Southern Bundelkhand terranes, respectively. The inset shows a tectonic map of the Indian Shield with the main cratons and Central Indian tectonic zone (CITZ)

Proterozoic mafic magmatism, represented by a system of dikes, is widespread in the craton [Pradhan et al., 2012]. Gabbroids and mafic-ultramafic intrusions are also common in the Southern Bundelkhand terrane (SBT) of the craton. The age of the large Ikauna mafic-ultramafic lopolith (Fig. 1) is 2798 ± 17 Ma [Slabunov et al., 2024a]. However, the age of the gabbroids near Lalitpur (Fig. 1) remains unknown.

The available geological record indicates that the gabbroic rock massifs in the western portion of the SBT are of Archean age, as they are crosscut by pink granites (Fig. 2, a) similar in composition to K-rich Bundelkhand granite.

The gabbroic rocks of the massifs exhibit coarse-grained to pegmatoid textures (Fig. 2, b), less commonly fine-grained textures, and correspond in composition to amphibole leucogabbro and normal-series diorites. Amphibole occurs as hornblende and actinolite, while plagioclase occurs as albite. Quartz, epidote and chlorite are also common (Fig. 2, c, d). Ore minerals include magnetite, ilmenite, titanite and minor pyrite. Apatite, zircon and rutile are present as accessories.

Zircon for geochronological studies was extracted from a 1 kg leucogabbro sample in the laboratory at the Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS. Zircon was dated by LA-Q-ICP-MS using equipment provided by Y. Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow: Agilent 7900 (quadrupole) mass spectrometer and MassHunter 5 software. Zircons 1) Plešovice ($^{206}Pb/^{238}U$ age – 337.1 ± 0.4 Ma) and 2) GJ-1 ($^{206}Pb/^{238}U$ – 601.9 ± 0.4 Ma, $^{207}Pb/^{206}Pb$ – 607.7 ± 0.7 Ma)

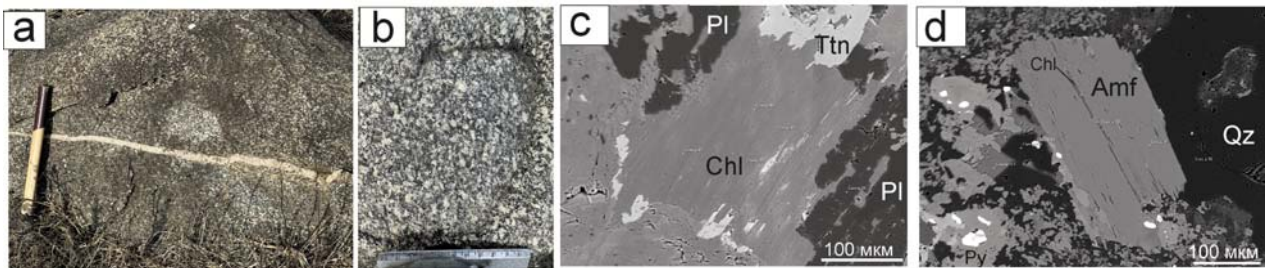


Fig. 2. Gabbroids of the Lalitpur Group of intrusions in outcrops (a, b) and thin sections (c, d):

a) Leucogabbro is cut by granite (scale: hammer handle 30 cm long); b) coarse-grained leucogabbro (scale: compass – 10 cm); c, d) BSE images of a leucogabbro thin section (Pl – plagioclase (albite), Amf – hornblende, Chl – chlorite, Qz – quartz, Ttn – titanite, Py – pyrite)

were used as standards. The median ages of the standards obtained during this study are the following: Plešovice – $^{206}Pb/^{238}U$ age – 339.1 ± 1.5 Ma; GJ-1 – $^{206}Pb/^{238}U$ – 605.5 ± 2.4 Ma, $^{207}Pb/^{206}Pb$ – 600.9 ± 22 Ma.

Zircons occur as transparent to semi-transparent, pale-brown elongate prismatic crystals (Fig. 3, a) ranging in size from 200 to 500 μm. Coarser crystals exhibit moderate to strong fracturing and contain abundant inclusions of amphibole (up to 150 μm), pyroxene, plagioclase, quartz, and apatite (Fig. 3, a). The distinctive internal structure of the zircons visible in translucent light was also observed when examining the zircons in BSE mode and cathodoluminescence (CL). Transparent portions of the grains show homogeneous structure in CL and well-defined zoning, while semi-transparent and opaque parts show heterogeneous CL patterns with mottled zoning. Most grains have non-transparent portions composed of metamict zircons. The features are characteristic of zircons from pegmatites, although similar textures also occur in gabbro [Volodichev et al., 2012].

The zircons were dated at 60 analytical points. Of these, 49 points showed a discordance of less than 2 % and corresponded to the age 2539 ± 3.4 Ma, based on the upper intercept with the Concordia curve. However, a more reliable age value for this group of zircons is estimated from 14 analytical points, enabling us to calculate a Concordia age of 2551 ± 5 Ma (Fig. 3, b).

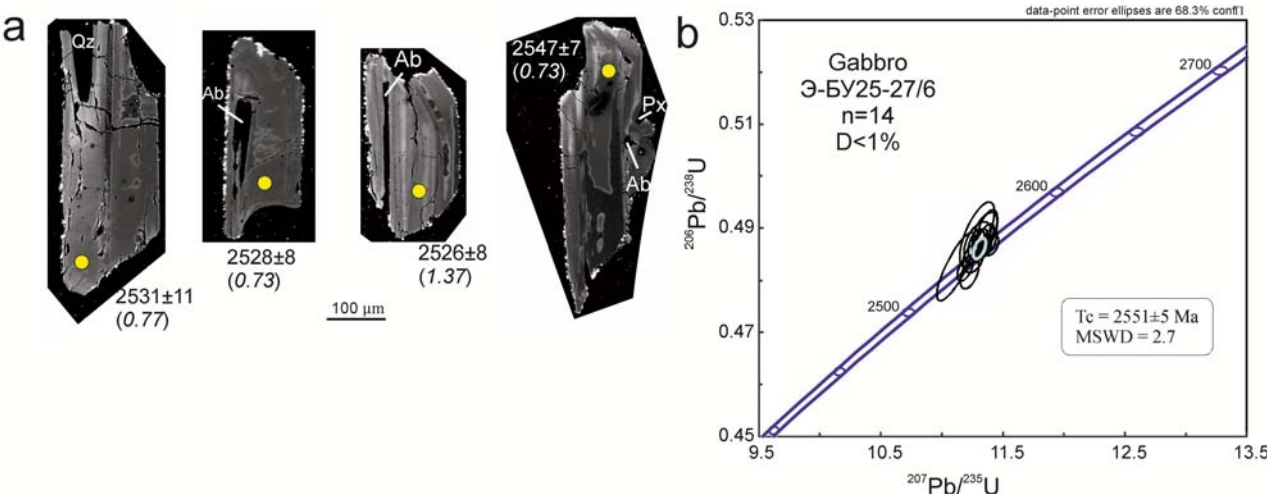


Fig. 3. Morphology and U-Pb age (by LA-ICP-MS) of zircon from gabbroids:

a) image of zircons in cathodoluminescence (CL) with the position of analytical points and their ^{207}Pb-^{206}Pb age values in Ma; shown in parentheses is Th/U ratio, with mineral inclusions (Ab – albite, Qz – quartz, Px – pyroxene); b) Concordia diagram (Tc – U-Pb Concordia age)

Thus, the age of Lalitpur-group gabbroic rocks is comparable to that of subduction-related volcanism, 2557 ± 33 – 2543 ± 17 [Singh, Slabunov, 2015; Slabunov, Singh, 2019], in the Central Bundelkhand terrane. Neither separate grains nor older cores were found in the zircons studied, in contrast to their presence in the Ikauna mafic-ultramafic lopolith [Slabunov et al., 2024a]. The geochemical signature of the gabbroic rocks, notably their low Nb and Zr contents, indicate their formation in supra-subduction zone of an active continental margin.

We thank to T. V. Kaulina (Apatity) and the 2nd anonymous reviewer for their valuable comments which helped improve this paper.

References

Ernst R. E. Large igneous provinces. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. P. 653.

Joshi K. B., Singh S. K., Halla J., Ahmad T., Rai V. K. Neodymium isotope constraints on the origin of TTGs and high-K granitoids in the Bundelkhand Craton: Central India, implications for Archaean crustal evolution. *Lithosphere*. 2022. ID 6956845. doi: 10.2113/2022/6956845

Pradhan V. R., Meert J. G., Pandit M. K., Kamenov G., Mondal M. E. A. Paleomagnetic and geochronological studies of the mafic dyke swarms of Bundelkhand Craton, Central India: implications for the tectonic evolution and paleogeographic reconstructions. *Precambr. Res.* 2012;198-199:51–76. doi: 10.1016/j.precamres.2011.11.011

Singh V. K., Slabunov A. I., Nesterova N. S., Singh M. M., Bhatt S. C. Tectonostratigraphic terranes of the Bundelkhand Craton (Indian Shield). *Geological and geo-environmental processes on Earth.* Springer Nature; 2021. P. 155–164. doi: 10.1007/978-981-16-4122-0_10

Singh V. K., Verma S. K., Singh P. K., Slabunov A. I., Mishra S., Chaudhary N. Archean crustal evolution of the Bundelkhand Craton: evidence from granitoid magmatism. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2020;489:235–259. doi: 10.1144/SP489-2018-72

Slabunov A. I., Egorova S. V., Singh V. K. Mesoarchaean mafic–ultramafic Ikauna layered intrusion, Bundelkhand Craton, India: geology, U–Th–Pb age (SHRIMP) and correlation. *Int. Geol. Rev.* 2024;66(22): 3814–3826. doi: 10.1080/00206814.2024.2361465

Slabunov A., Joshi K. B., Singh S. K., Rai V. K. Depositional age and formation conditions of Archean banded iron formations, Bundelkhand Craton, Central India: gechemistry, neodymium isotopes and U-Pb zircon geochronology. *Precambr. Res.* 2024;401:107254. doi: 10.1016/j.precamres.2023.107254

Singh V. K., Slabunov A. The Central Bundelkhand Archaean greenstone complex, Bundelkhand Craton, Central India: geology, composition, and geochronology of supracrustal rocks. *Int. Geol. Rev.* 2015;57: 1349–1364. doi: 10.1080/00206814.2014.919613

Slabunov I. I., Singh V. K. Meso-Neoarchaean crustal evolution of the Bundelkhand Craton, Indian Shield: new data from greenstone belts. *Int. Geol. Rev.* 2019;61:1409–1428. doi: 10.1080/00206814.2018.1512906

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

Поступила в редакцию / received: 04.08.2025; принята к публикации / accepted: 08.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Слабунов Александр Иванович
д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геологии и геодинамики докембрия
e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

Кервинен Анна Валерьевна
научный сотрудник
e-mail: kervinen@mail.ru

Мишра Сумит
доктор наук, исследователь
e-mail: smpsgeo@gmail.com

Сингх Винод Кумар
д-р наук, доцент
e-mail: vinodksingh@bujhansi.ac.in

CONTRIBUTORS:

Slabunov, Alexander
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Chief Researcher

Kervinen, Anna
Researcher

Mishra, Sumit
PhD, Researcher

Singh, Vinod
PhD, Associate Professor

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 44–48
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 44–48
DOI: 10.17076/geo2186

УДК 551.14, 550.93, 552.163 (99)

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ И ВОЗРАСТЕ ПОДЛЕДНИКОВОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ИЗ ЗОНЫ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ (ЗЕМЛЯ ПРИНЦЕССЫ ЕЛИЗАВЕТЫ, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

И. А. Абдрахманов[1]*, Г. Л. Лейченков[1,2], С. Г. Скублов[3], П. Г. Талалай[4,5], Л. И. Салимгараева[3], Н. Жан[4]

*[1] Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И. С. Грамберга (ФГБУ «ВНИИОкеангеология») (наб. р. Мойки, 120, Санкт-Петербург, Россия, 190121), *ilnur_01_95@mail.ru*
[2] Санкт-Петербургский государственный университет (пер. Декабристов, 16, Санкт-Петербург, Россия, 199155)
[3] Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034)
[4] Институт полярной науки и техники, Факультет строительной инженерии, Цзилиньский университет (Чанчунь, провинция Цзилинь, Китай, 130021)
[5] Факультет инженерии и технологий, Китайский университет наук о Земле (Пекин, Китай, 100190)

В ходе 69-й Российской антарктической экспедиции (2023–2024 гг.) в северо-западной части Земли Принцессы Елизаветы выполнен совместный российско-китайский проект подледникового бурения. Бурение было направлено на расшифровку геологической природы высокоамплитудной линейной магнитной аномалии, которая проходит параллельно побережью на протяжении более 500 км от Земли Принцессы Елизаветы до Земли Мак-Робертсона, пересекая рифтовую зону ледника Ламберта. Природа этой аномалии оставалась неизвестной, в работе приводятся первые данные о возрасте и составе коренного ложа, поднятого из-под ледника толщиной 541 м. В работе также показано, что мафические гранулиты, образованные по габброидам, являются источником этой аномалии. Протолит гранулитов сформировался в островодужной обстановке на рубеже 920 млн лет назад. Порода претерпела два этапа метаморфизма в период 890–800 млн лет. Оценка параметров метаморфизма свидетельствует о стабилизации региона после коллизии Протоиндии с Протоантарктидой и окончательной сборки суперконтинента Родиния.

Ключевые слова: Восточная Антарктида; магнитная аномалия; бурение льда; коренное ложе; Родиния

Для цитирования: Абдрахманов И. А., Лейченков Г. Л., Скублов С. Г., Талалай П. Г., Салимгараева Л. И., Жан Н. Первые данные о составе и возрасте подледниковой горной породы из зоны магнитной аномалии (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 44–48. doi: 10.17076/geo2186

Финансирование. Бурение выполнялось в рамках Федерального проекта «Геология. Возрождение легенды» и государственного задания Агентства «Роснедра». Исследование геохимии минералов выполнено в рамках темы НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0005).

I. A. Abdrakhmanov[1]*, G. L. Leitchenkov[1,2], S. G. Skublov[3], P. G. Talalay[4,5], L. I. Salimgaraeva[3], N. Zhang[4]. FIRST DATA ON THE COMPOSITION AND AGE OF SUBGLACIAL ROCK FROM A MAGNETIC ANOMALY ZONE (PRINCESS ELIZABETH LAND, EAST ANTARCTICA)

*[1] All-Russian Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources (VNIIOkeanologia) (120 Moika River Emb., 190121 St. Petersburg, Russia), *ilnur_01_95@mail.ru*
[2] Saint Petersburg State University (16 Dekabristov Lane, 199155 St. Petersburg, Russia)
[3] Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Makarova Emb., 199034 St. Petersburg, Russia)
[4] Institute of Polar Science and Engineering, College of Construction Engineering, Jilin University (130021 Changchun, Jilin Province, China)
[5] School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (100190 Beijing, China)

During the 69th field season of the Russian Antarctic Expedition in 2023–2024, a joint Russian-Chinese subglacial drilling project was carried out in the northwestern part of the Princess Elisabeth Land. The drilling was meant to decipher the geological nature of a high-amplitude linear magnetic anomaly that runs parallel to the coast for more than 500 km from Princess Elizabeth Land to Mac. Robertson Land, crossing the rift zone of the Lambert Glacier. The nature of this anomaly has remained unknown, while this paper provides the first facts on the age and composition of the bedrock raised from beneath the 541-meter-thick glacier. The findings show that mafic granulites formed on gabbroids are the source of this anomaly. The protolith of the granulites was formed in an island-arc environment at the turn of 920 million years ago. The rock underwent two stages of metamorphism in the 890–800 Ma period. Estimates of metamorphism parameters indicate stabilization of the region after the collision of Proto-India with Proto-Antarctica and the final assembly of the Rodinia supercontinent.

Keywords: East Antarctica; magnetic anomaly; ice drilling; bedrock; Rodinia

For citation: Abdrakhmanov I. A., Leitchenkov G. L., Skublov S. G., Talalay P. G., Salimgaraeva L. I., Zhang N. First data on the composition and age of subglacial rock from a magnetic anomaly zone (Princess Elizabeth Land, East Antarctica). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 44–48. doi: 10.17076/geo2186

Funding. Drilling was done within the federal project "Geology. The legend revived" and state assignment to the Federal Agency for Mineral Resources (Rosnedra). Mineral geochemistry was studied within a state-ordered research theme of IPGG RAS (# FMUW-2022-0005).

Более 99 % площади Антарктиды покрыто ледяным щитом, толщина которого может достигать почти 5 км. Несмотря на семидесятилетнюю историю регулярного изучения Антарктиды, целевое опробование коренного ложа путем бурения практически не проводилось и ограничивалось только опытными работами вблизи станций [Вторая..., 1960; Witze, 2019]. В работе приводятся результаты совместного российско-китайского проекта бурения, выполненного в северо-западной части Земли Принцессы Елизаветы в ходе 69-й Российской антарктической экспедиции (2023–2024 гг.).

Место бурения было выбрано на основе детальных магнитных и радиолокационных исследований, выполненных с межпрофильным расстоянием 1 км и с учетом логистических возможностей Российской антарктической экспедиции. Скважина располагалась в центре высокоамплитудной магнитной аномалии

[Geological..., 2018], которая протягивается с востока на запад более чем на 500 км, в точке с координатами 69,585591 ю. ш. 76,385165 в. д., на вершине локальной возвышенности коренного ложа [Лейченков и др., 2024]

Высота поверхности ледяного покрова в месте бурения составляет 680 м над уровнем моря. Температурные измерения свидетельствуют о том, что основание льда в месте бурения находится в мерзлом состоянии [Talalay et al., 2025]. Бурение проводилось с помощью электромеханического снаряда для льда и подстилающих пород (IBED), разработанного в Цзилиньском университете [Leitchenkov et al., 2024]. В результате проведения ледового бурения получено 17 см керна базального льда с мелкими обломками коренной породы и 48 см керна породы коренного ложа из-под ледника толщиной 541 м.

Согласно результатам петрографических исследований, керн коренного ложа представляет собой меланократовый ортопироксен-амфибол-биотитовый кристаллический сланец (мафический гранулит). Порода характеризуется нематогранобластовой мелко-среднезернистой структурой и сланцеватой текстурой. Ее количественный минеральный состав (об. %): Opx 20–25, Amp 15–25, Bt 5–10, Pl 35–45, Opq 5–7, Qz 3–4, Ap < 1, Carb < 1. Рудные минералы представлены пирротином, пиритом, халькопиритом, магнетитом и ильменитом. По химическому составу порода характеризуется содержанием (мас. %): SiO_2 – 49,36; Al_2O_3 – 15,18; TiO_2 – 0,86; Fe_2O_3 – 2,11; FeO – 10,98; MnO – 0,24; MgO – 7,06; CaO – 7,62; Na_2O – 2,99; K_2O – 1,38; P_2O_5 – 0,20; ППП – 1,62; сумма – 99,58.

На диаграмме Муана и Ля Роша (Fe+Ti+Al vs Ca+Mg) для определения протолита метаморфических пород точка состава попадает в поле первичных основных пород, а на классификационной TAS-диаграмме – в поле монцогаббро. Ортопироксен представлен энстатитом с низким содержанием алюминия, X_{En} = Mg/(Fe + Mg) находится в пределах 0,5–0,57, Al_2O_3 – в пределах 0,75–1,12 мас. %. Амфибол представлен ферро-чермакитом с содержанием TiO_2 1,6–2,3 мас. %. Биотит представляет собой флогопит (Mg# = Mg/(Mg + Fe) в пределах 0,61–0,65) с высоким содержанием TiO_2 4,8–6,3 мас. %. Плагиоклаз имеет составы андезин-лабрадора с X_{An} = 0,41–0,53, наблюдаются также локальные участки битовнита с X_{An} = 0,75–0,81 в контакте с карбонатным минералом (предположительно сидеритом) и кварцем, что указывает на позднее преобразование породы.

Для спектра распределения REE характерен «отрицательный» пологий наклон с отношением La_N/Yb_N = 5,7, сильнее проявленный в области LREE. Наличие заметной отрицательной Eu-аномалии (Eu/Eu* = 0,22) объясняется фракционированием плагиоклаза при образовании породы. На дискриминационных диаграммах Пирса (Th/Yb vs Nb/Yb) и Верма (IAB-CRB-OIB-MORB) фигуративные точки состава породы попадают в поле островодужных базальтов.

Всего было выполнено 12 геохронологических определений по 8 зернам циркона методом SHRIMP-II в институте им. Карпинского (Санкт-Петербург). Возраст кристаллизации магматического протолита для мафического гранулита составил около 920 млн лет. С использованием методов классической термобарометрии и метода изохимических диаграмм реконструированы два метаморфических события: ранний метаморфизм с возрастом ~ 890 млн лет и пиковыми параметрами 740–790 °C и 4,2–4,5 кбар; поздний метаморфизм с возрастом ~ 800 млн лет и параметрами около 650 °C и 3 кбар.

Таким образом, результаты выполненных исследований показывают, что высокоамплитудная магнитная аномалия в северо-западной части Земли Принцессы Елизаветы генерируется мафическими гранулитами, протолит которых формировался в островодужной обстановке породами габбрового состава на рубеже около 920 млн лет. В результате последующей эволюции породы претерпели два этапа метаморфизма: первый, гранулитовый, на рубеже около 890 млн лет (740–790 °C и 4,2–4,5 кбар); второй, с возрастом около 800 млн лет, протекал при параметрах амфиболитовой фации (около 650–670 °C и 3 кбар). Скорость остывания пород между метаморфическими событиями составила около 1 °C/млн лет, что свидетельствует о стабилизации региона после коллизии Протоиндии с Протоантарктидой и окончательной сборки суперконтинента Родиния.

Авторы благодарят Российскую и Китайскую антарктические экспедиции, а также руководство станций «Прогресс» и «Зонгсан» за логистическое обеспечение бурения. Авторы признательны АО «ПМГРЭ» за выполнение аэрогеофизической съемки, О. Л. Галанкиной (ИГГД РАН), С. Г. Симакину, Е. В. Потапову (ЯФ ФТИАН им. К. А. Валиева РАН) и коллективу Центра изотопных исследований Института Карпинского за значительную помощь при исследовании состава минералов.

Литература

Вторая континентальная экспедиция 1956–1958 гг. Общее описание / Под ред. А. Ф. Трешникова. Л.: Морской транспорт, 1960. 207 с.

Лейченков Г. Л., Талалай П. Г., Жан Н., Абдрахманов И. А., Воробьев М. А., Гон Д., Лиу Ю., Ли Я., Сун Ю., Лаврентьев И. И., Екайкин А. А., Халимов Д. Р., Ли Б., Липенков В. Я. Бурение льда на Земле Принцессы Елизаветы (Восточная Антарктида) для изучения геологии коренного ложа и позднечетвертичного климата // Лед и снег. 2024. Т. 64, № 2. С. 293–298. doi: 10.31857/S2076673424020125

Geological map of MacRobertson Land, Princess Elizabeth Land, and Prydz Bay (East Antarctica) in scale 1:1 000 000 (Map Sheet and Explanatory Notes) / Eds. E. V. Mikhalsky, G. L. Leitchenkov. St. Petersburg: VNIIOkeangeologia, 2018.

Leitchenkov G. L., Talalay P. G., Zhang N., Abdrakhmanov I. A., Gong D., Liu Y., Li Y., Sun Y., Vorobyev M., Li B. First targeted geological sampling beneath the East Antarctic ice sheet: Joint Russian-Chinese drilling project // Exploration & Protection of Mineral Resources. Sp. iss. 2024. P. 75–78.

Talalay P. G., Leitchenkov G., Lipenkov V., Sun Y., Zhang N., Gong D., Liu Y., Li Y., Sun Y., Abdrakhmanov I., Vorobyev M., Khalimov D., Fan X., Salamatin A., Ekaykin A., Li B. Rare ice-base temperature measurements in Antarctica reveal a cold base in contrast with predictions // Commun. Earth Environ. 2025. Vol. 6. P. 189–195. doi: 10.1038/s43247-025-02127-1

Witze A. Chinese crew extract first rock from beneath East Antarctic ice in 60 years // Nature. 2019. Vol. 567, no. 7747. P. 13–15. doi: 10.1038/d41586-019-00659-z

References

Mikhalsky E. V., Leitchenkov G. L. (eds.). Geological map of MacRobertson Land, Princess Elizabeth Land, and Prydz Bay (East Antarctica) in scale 1:1 000 000 (Map Sheet and Explanatory Notes). St. Petersburg: VNIIOkeangeologia; 2018.

Leitchenkov G. L., Talalay P. G., Zhang N., Abdrakhmanov I. A., Gong D., Liu Y., Li Y., Sun Y., Vorobyev M., Li B. First targeted geological sampling beneath the East Antarctic ice sheet: Joint Russian-Chinese drilling project. *Exploration & Protection of Mineral Resources Journal*. 2024;Sp. iss.:75–78.

Leitchenkov G. L., Talalay P. G., Zhang N., Abdrakhmanov I. A., Vorobyov M. A., Gong D., Liu Y., Li Y., Sun Y., Lavrentiev I. I., Ekaykin A. A., Khalimov D. R., Li B., Lipenkov V. Y. Ice drilling on Princess Elizabeth Land (East Antarctica) aimed to study bedrock and Late Quaternary paleoclimate. *Led i sneg = Ice and Snow.* 2024;64(2):293–298. (In Russ.). doi: 10.31857/S2076673424020125

Talalay P. G., Leitchenkov G., Lipenkov V., Sun Y., Zhang N., Gong D., Liu Y., Li Y., Sun Y., Abdrakhmanov I., Vorobyev M., Khalimov D., Fan X., Salamatin A., Ekaykin A., Li B. Rare ice-base temperature measurements in Antarctica reveal a cold base in contrast with predictions. *Commun. Earth Environ*. 2025;6:189–195. doi: 10.1038/s43247-025-02127-1

Treshnikov A. F. (eds.). The second continental expedition in 1956–1958. General description. Leningrad: Morskoi transport; 1960. 207 p. (In Russ.)

Witze A. Chinese crew extract first rock from beneath East Antarctic ice in 60 years. *Nature*. 2019;567(7747): 13–15. doi: 10.1038/d41586-019-00659-z

Поступила в редакцию / received: 05.08.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Абдрахманов Ильнур Альбертович

канд. геол.-мин. наук, ведущий инженер отдела геологии и минеральных ресурсов Антарктики

e-mail: ilnur_01_95@mail.ru

Лейченков Герман Леонидович

д-р геол.-минер. наук, зам. ген. директора, начальник отдела геологии и минеральных ресурсов Антарктики, ВНИИОкеангеология; профессор кафедры геофизики СПбГУ

e-mail: german_l@mail.ru

Скублов Сергей Геннадьевич

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник

e-mail: skublov@yandex.ru

Талалай Павел Григорьевич

д-р техн. наук, директор Института полярной науки и техники, Цзилиньский университет; профессор Китайского университета наук о Земле

e-mail: ptalalay@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Abdrakhmanov, Ilnur

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

Leitchenkov, German

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Deputy Director, Head of Department at VNIIOkeanologia; Professor at St. Petersburg State University

Skublov, Sergey

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

Talalay, Pavel

Dr. Sci. (Tech.), Director of the Institute for Polar Science and Engineering in Jilin University; Professor of the CUGB

Салимгараева Ляйсан Ильшатовна
канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник
e-mail: fluoritecaf2@mail.ru

Жан Нан
профессор
e-mail: znan@jlu.edu.cn

Salimgaraeva, Lyaisan
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher

Zhang, Nan
Professor

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 49–53
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 49–53
DOI: 10.17076/geo2183

УДК 552.141 : 552.142 : 552.143

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ МОЛАССОИДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ

А. В. Бакаева*, С. Ю. Чаженгина, С. А. Светов, А. В. Кервинен

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

Изучен вещественный состав палеопротерозойских полимиктовых конгломератов, расположенных в пределах Койкарской и Эльмусской структур Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (ВСЗП), Карельский кратон. Проведено разделение обломочного материала по петрографическим и петрохимическим признакам на доминирующие группы с последующей корреляцией обломков с породными комплексами, слагающими данную территорию. Установлено, что на состав обломочного материала и цемента полимиктовых конгломератов существенное влияние оказали породы, представленные в основании осадочных разрезов: породные ассоциации мезоархейского вулканогенно-осадочного комплекса ВСЗП, палеопротерозойские (сумийские) андезибазальтовые ассоциации и гранитоиды Эльмусской структуры. Выполнены геохронологические исследования детритовых цирконов из цемента конгломератов, согласно которым время формирования конгломератов Койкарской структуры – не позднее 2408 ± 9 млн лет, Эльмусской структуры – 2428 ± 19 млн лет, при этом в Койкарской структуре преобладает обломочный циркон с возрастом около 2810 ± 12 и 2880 ± 12 млн лет, а в конгломератах Эльмусской структуры доминируют цирконы с возрастом 2620 ± 24 – 2650 ± 27 и 2580 ± 27 млн лет. Нижним ограничением времени формирования осадочных разрезов служит возраст нижележащих вулканитов сумия (~2450 млн лет). На основании морфологической характеристики грубообломочных отложений и сравнительного анализа обломков с породными комплексами Койкарской и Эльмусской структур осадочные бассейны рассматриваются как палеопротерозойские молассоидные комплексы, сформировавшиеся в бассейнах пулл-апарт типа на протоплатформенной стадии развития Карельского кратона.

Ключевые слова: полимиктовые конгломераты; палеопротерозой; Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс; Карельский кратон

Для цитирования: Бакаева А. В., Чаженгина С. Ю., Светов С. А., Кервинен А. В. Палеопротерозойские молассоидные комплексы Центральной Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 49–53. doi: 10.17076/geo2183

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГ КарНЦ РАН (FMEN-2023-0009).

A. V. Bakaeva*, S. Yu. Chazhengina, S. A. Svetov, A. V. Kervinen.
PALEOPROTEROZOIC MOLASSOID COMPLEXES OF CENTRAL KARELIA

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *sashe-ku@yandex.ru*

This study focuses on Paleoproterozoic polymictic conglomerates recognized within the Koikary and Elmus domains of the Vedlozero-Segozero greenstone belt (VSGB), Karelian Craton. The detrital material was differentiated into dominant groups according to petrographic and petrochemical characteristics, and then the clasts were matched with the rock complexes composing this territory. It was found that the composition of the clastic material and cement of the polymictic conglomerates was significantly influenced by the underlying rocks: rock associations of the Mesoarchean volcanogenic-sedimentary complex of the VSGB, Paleoproterozoic (Sumian) andesibasalt associations and granitoids of the Elmus domain. Geochronological studies of detrital zircons from conglomerate cement were carried out. New records date the formation of polymictic conglomerates of the Koikary domain to 2408 ± 9 Ma and of the Elmus domain to 2428 ± 19 Ma, while the Koikary domain is dominated by clastic zircon aged ca. 2810 ± 12 and 2880 ± 12 Ma, and conglomerates of the Elmus domain are dominated by zircons aged 2620 ± 24 – 2650 ± 27 and 2580 ± 27 Ma. The lower time limit for the formation of sedimentary sections is the age of the underlying Sumian volcanics (~2450 Ma). Based on the morphological characteristics of coarse-grained sediments and the comparative analysis of clasts against rock complexes of the Koikary and Elmus domains, the sedimentary basins are recognized as Paleoproterozoic molassoid complexes formed in pull-apart basins during the proto-platform stage in the evolution of the Karelian craton.

Keywords: polymictic conglomerates; Paleoproterozoic; Vedlozero-Segozero greenstone belt; Karelian Craton

For citation: Bakaeva A. V., Chazhengina S. Yu., Svetov S. A., Kervinen A. V. Paleoproterozoic molassoid complexes of Central Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 49–53. doi: 10.17076/geo2183

Funding. The work was funded within state-ordered research theme of the IG KarRC RAS (FMEN-2023-0009).

Молассоидные комплексы Койкарской и Эльмусской структур расположены в районе озер Пальеозеро (п. Эльмус) и Яниш (д. Койкары) (Центральная Карелия) и представлены полимиктовыми конгломератами сариолийского возраста (2400–2300 млн лет). Формирование конгломератов происходило на протоплатформенной стадии развития Карельского кратона в рифтогенных впадинах пулл-апарт типа [Melezhik et al., 2013]. В основании осадочных разрезов представлены магматические и хемогенно-терригенные отложения мезоархейского комплекса ВСЗП, а также палеопротерозойские вулканиты сумийского возраста [Kolodyazhny et al., 2023].

По размеру обломков конгломераты относятся к валунно-галечным с размером валунов до 1 м. Степень окатанности обломочного материала варьирует от угловатых до слабоокатанных форм, что указывает на локальные источники и близкую транспортировку обломков [Кузнецов, 2007]. Состав обломочного материала в осадочных бассейнах зависит от типа пород, представленных в области сноса [Dickinson et al., 1983]. На основании проведенных петрографических и петрохимических исследований выполнено разделение обломочного материала по кремнекислотности на стандартные группы: основные, средние, кислые (табл.), включая метаморфические и осадочные типы обломков. Установлено, что в конгломератах Койкарской структуры среди обломков преобладают фрагменты кислых (дациты, плагиограниты, гранодиориты, плагиомикроклиновые граниты), метаморфических (амфиболитовые сланцы, кварциты) и в меньшей степени – основных (габброиды, базальты, миндалекаменные базальты, вариолиты) и средних (дациты, диориты) пород, а в конгломератах Эльмусской структуры существенно доминируют фрагменты средних пород (андезибазальты, андезиты, диориты), осадочных (силициты), основных, метаморфических и в меньшем количестве представлены обломки кислых пород. Разное соотношение обломочного материала в двух бассейнах является отражением контрастности составов подстилающих породных комплексов, находящихся в области эрозии.

Средние концентрации петрогенных элементов (мас. %) в обломках и цементе конгломератов Койкарской и Эльмусской структур

Average concentrations of petrogenic elements (wt. %) in clasts and cement of conglomerates of the Koikary and Elmus domains

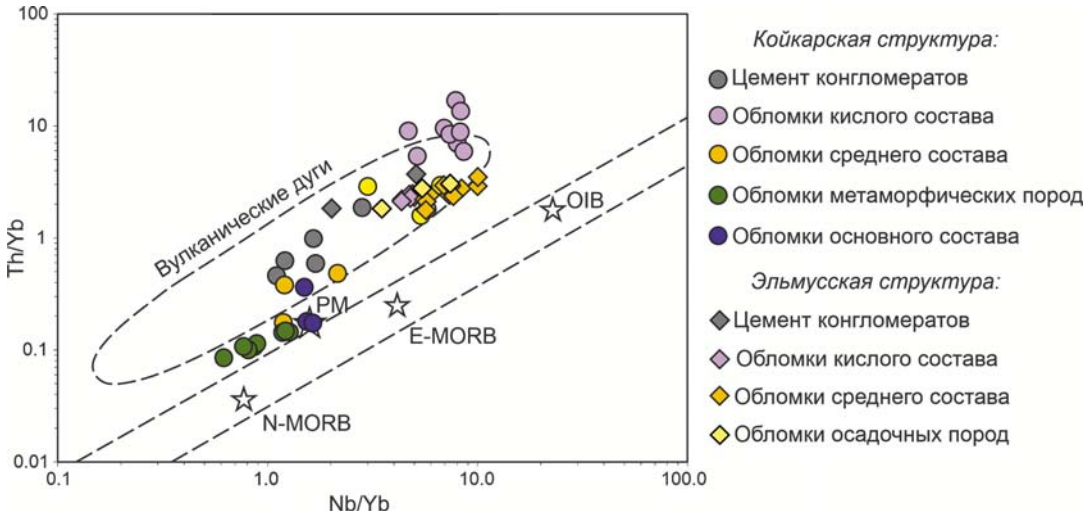
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_{3tot}	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	Сумма Sum
1	52,05	1,02	14,50	12,24	0,25	8,57	7,82	2,58	0,84	0,12	100
2	57,18	1,23	14,05	11,99	0,21	4,47	5,83	3,99	0,88	0,16	100
3	72,52	0,50	14,12	3,98	0,07	0,87	1,53	6,14	0,21	0,04	100
4	49,50	0,88	15,67	13,28	0,26	8,25	9,48	1,97	0,62	0,10	100
5	75,10	0,25	13,74	2,67	0,06	0,49	1,84	5,67	0,16	0,02	100
6	61,25	0,81	14,41	8,62	0,16	3,67	7,28	3,16	0,55	0,09	100

Примечание. 1 – обломки основного состава, 2 – обломки среднего состава, 3 – обломки кислого состава, 4 – обломки метаморфических пород, 5 – обломки осадочных пород, 6 – цемент.

Note. 1 – mafic clasts, 2 – intermediate clasts, 3 – felsic clasts, 4 – metamorphic clasts, 5 – sedimentary clasts, 6 – cement.

В Койкарской структуре в основании осадочного бассейна представлены вулканогенные и осадочные комплексы мезоархейской андезит-дацит-риолитовой (АДР) ассоциации и палеопротерозойские вулканиты андезибазальтовой ассоциации (сумий), в Эльмусской структуре конгломераты залегают на вулканитах андезибазальтовой ассоциации (сумий). Среди обломочного материала конгломератов Койкарской структуры также установлены фрагменты средних пород субщелочной серии ($Na_2O + K_2O$ = 6,5–7,3 вес. %), источники которых не установлены в пределах ВСЗП. Цемент полимиктовых конгломератов представлен лититовой и кварц-полевошпатовой грауваккой, тип цементации варьирует от контактового до базального, что свидетельствует о принадлежности конгломератов к проксимальным фациям: плотно упакованные с контактовым цементом относятся к коллювиальным и аллювиально-флювиальным склоновым фациям, а с базальным цементом – к образованиям временных потоков, возникновение которых связывается с тектоническим режимом в области бассейна седиментации.

Для определения потенциальных геодинамических обстановок формирования источников обломочного материала рассмотрены концентрации Nb, Th, Yb в обломках и представлены на дискриминационной диаграмме Дж. Пирса [Pearce, 2008] (рис.).



Вариационная диаграмма Th/Yb – Nb/Yb [Pearce, 2008] для обломков палеопротерозойских молассоидных комплексов Койкарской и Эльмусской структур

The Th/Yb – Nb/Yb variation diagram [Pearce, 2008] for clasts of the Paleoproterozoic molassoid complexes of the Koikary and Elmus domains

На диаграмме Th/Yb – Nb/Yb (рис.) положение фигуративных точек обломков среднего и кислого состава соответствует области обогащения Th относительно Nb, что может происходить в случае формирования исходных магматических пород в результате субдукционных процессов, контаминации первичными выплавками корового материала или определяться влиянием состава мантийного источника. Можно предположить, что наиболее вероятными обстановками формирования источников среднего и кислого материала являлись вулканические дуги. Положение точек обломочного материала основного состава и фрагментов метаморфических пород соответствует области обогащения Nb относительно Th и приурочено к полю мантийного расплава в промежутке между составами N-MORB и примитивной мантии (PM), что существенно отличается от островодужных образований и свидетельствует о формировании источников обломочного материала из магматических расплавов в зоне субдукции.

Результаты геохронологических исследований методом лазерной абляции (LA-ICP-MS) детритовых зерен цирконов, выделенных из цемента конгломератов, показывают, что в породах Койкарской структуры представлены зерна цирконов с возрастом от 2408 ± 9 до 2915 ± 9 млн лет, с преобладанием цирконов с возрастом 2810 ± 12 и 2880 ± 12 млн лет. В конгломератах Эльмусской структуры большая часть зерен имеет сходный возраст от 2428 ± 19 до 2913 ± 20 млн лет, но доминируют цирконы с возрастом от 2620 ± 24 до 2650 ± 27 и 2580 ± 27 млн лет. Таким образом, на основании полученных данных можно оценить время заложения осадочных комплексов, интервал формирования которых определяется самым молодым возрастом детритовых цирконов: 2408 ± 9 млн лет для Койкарской структуры и 2428 ± 19 млн лет для Эльмусской структуры и возрастом подстилающих комплексов – вулканитов сумия ~ 2450 млн лет [Светов и др., 2012].

Петрографическая и геохимическая характеристика обломочного материала, а также данные геохронологических исследований свидетельствуют о принадлежности пород к локальным источникам сноса, представленным мезоархейскими и палеопротерозойскими породами ВСЗП: габброидами и дацит-риолитовыми комплексами Койкарской структуры [Гоголев, 2018], гранитоидами Эльмусской площади [Дмитриева, 2016] и андезитовыми ассоциациями сумийского возраста Койкарско-Эльмусской площади [Светов и др., 2012]. На основании морфологической характеристики грубообломочных отложений, ранних структурных исследований осадочного бассейна [Kolodyazhny et al., 2023] и сравнительного анализа обломков с близлежащими породными комплексами осадочные бассейны рассматриваются как палеопротерозойские молассоидные комплексы, сформировавшиеся на протоплатформенном этапе развития Карельского кратона в условиях континентального рифтогенеза [Melezhik et al., 2013] в режиме транстенсии-транспрессии в бассейнах пулл-апарт типа [Онежская…, 2011; Melezhik et al., 2013].

Изучение обломочного материала конгломератов в бассейнах пулл-апарт типа, имеющих локальный перенос, позволяет актуализировать существующие геодинамические модели развития континентальной коры Карельского кратона и выявлять эродированные в современном эрозионном срезе магматические системы.

Литература

Дмитриева А. В. Металлогеническая специализация неоархейского умереннощелочного магматизма Центральной Карелии: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Петрозаводск, 2016. 160 с.

Гоголев М. А. Геохимическая типизация дацит-риолитового магматизма центральной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Карельский кратон) // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 11. С. 82–95. doi: 10.17076/geo757

Кузнецов В. Г. Литология. Осадочные горные породы и их изучение: Учеб. пособие для вузов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 511 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.

Светов С. А., Светова А. И., Назарова Т. Н. Сумийские андезибазальты Койкарско-Эльмусской площади: литогеохимическая характеристика и условия формирования // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 15. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 5–27.

Dickinson W. R., Beard L. S., Brakenridge G. R., Erjavec J. L., Ferguson R. C., Inman K. F., Knepp R. A., Lindberg F. A., Ryberg P. T. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting // Geological Society of America Bulletin. 1983. Vol. 94. P. 222–235. doi: 10.1130/0016-7606(1983)94<222:PONAPS>2.0.CO;2

Kolodyazhny S. Yu., Kuznetsov N. B., Poleshchuk A. V., Zykov D. S., Shalaeva E. A. Paleoproterozoic tectonics and evolutionary model of the Onega synclinorium // Geodynamics & Tectonophysics. 2023. Vol. 14, no. 4. Art. 0709. doi: 10.5800/GT-2023-14-4-0709

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 for the Fennoscandian Arctic Russia - Drilling Early Earth Project / Eds. V. A. Melezhik, A. R. Prave, E. J. Hanski, A. E. Fallick, A. Lepland, L. R. Kump, H. Strauss. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. P. 387–490. doi: 10.1007/978-3-642-29682-6_9

Pearce J. A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // Lithos. 2008. Vol. 100(1-4). P. 14–48. doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.016

References

Dickinson W. R., Beard L. S., Brakenridge G. R., Erjavec J. L., Ferguson R. C., Inman K. F., Knepp R. A., Lindberg F. A., Ryberg P. T. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin.* 1983;94:222–235. oi: 10.1130/0016-7606(1983)<222:PONAPS>2.0.CO;2

Dmitrieva A. V. Metallogenic specialization of Neoarchean temperate alkaline magmatism in Central Karelia: PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. Petrozavodsk; 2016. 160 p. (In Russ.)

Glushanin L. V., Sharov N. V., Shchiptsov V. V. (eds.). Palaeoproterozoic Onega Structure (geology, tectonics, deep structure and mineralogeny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 431 p.

Gogolev M. A. Geochemical types of subvolcanic dacite – rhyolite complexes from the central part of the Vedlozero-Segozero greenstone belt (Karelian Craton). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;11: 82–95. (In Russ.). doi: 10.17076/geo757

Kolodyazhny S. Yu., Kuznetsov N. B., Poleshchuk A. V., Zykov D. S., Shalaeva E. A. Paleoproterozoic tectonics and evolutionary model of the Onega synclinorium. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2023;14(4):0709. doi: 10.5800/GT-2023-14-4-0709

Kuznetsov V. G. Lithology. Sedimentary rocks and their study: a university textbook. Moscow: Nedra-Biznestsentr; 2007. 511 p. (In Russ.)

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 for the Fennoscandian Arctic Russia - Drilling Early Earth Project*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2013. P. 387–490. doi: 10.1007/978-3-642-29682-6_9

Pearce J. A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*. 2008;100 (1-4):14–48. doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.016

Svetov S. A., Svetova A. I., Nazarova T. N. Sumian andesibasalts of the Koikary-Elmus locality: lithogeochemical characteristics and conditions of formation. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia.* Iss. 15. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. P. 5–27. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 04.08.2025; принята к публикации / accepted: 08.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Бакаева Александра Владимировна
младший научный сотрудник
e-mail: sashe-ku@yandex.ru

Чаженгина Светлана Юрьевна
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: chazhengina@mail.ru

Светов Сергей Анатольевич
д-р геол.-мин. наук, директор
e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

Кервинен Анна Валерьевна
научный сотрудник
e-mail: kervinen@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Bakaeva, Alexandra
Junior Researcher

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

Svetov, Sergei
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Director

Kervinen, Anna
Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 54–57
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 54–57
DOI: 10.17076/geo2165

УДК 551.248.1

ОБ ИЗМЕНЕНИИ РАЗМЕРОВ И ЧИСЛА КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ БЛОКОВ В ЭВОЛЮЦИИ СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ

Н. А. Божко

Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119234)

На основании анализа опубликованных данных рассматривается изменение размеров континентальных блоков и их числа в процессе глобальной суперконтинентальной цикличности. Выявлена направленность этих изменений, состоящая в увеличении начиная с раннего архея площадей континентальных блоков, принимающих участие в сборке суперконтинентов до размеров мегаконтинентов при уменьшении их общего количества. Отмечается связь этого процесса с тепловым состоянием мантии и фазами суперконтинентального цикла. Указанные изменения происходят на фоне чередования относительно горячего и холодного состояний мантии на фоне ее общего охлаждения. Рассматривается предлагаемое некоторыми исследователями объяснение постепенного увеличения размера плит за счет изменения тесселяции (разбиения сферы определенным количеством правильных многоугольников) в стадию разобщенных континентов при относительно горячей мантии и быстром и значительном корообразовании, направленном на сборку суперконтинента. В стадию собранного суперконтинента такое увеличение замедляется ввиду низких темпов образования континентальной коры при относительно холодном состоянии мантии. Процесс изменения размера и числа плит в ходе суперконтинентальной цикличности не являлся монотонным, но имел эпизодический характер, приобретая новые особенности в своем развитии. Некоторые рубежи таких обновлений намечаются в архее с появлением двух типов суперконтинентальных циклов, раннем-среднем протерозое с появлением мегаконтинентов ограниченного числа и неопротерозое-фанерозое при доминировании мегаконтинентов, достигающих размера шириной в десяток тысяч километров.

Ключевые слова: суперконтинент; суперконтинентальная цикличность; мантия Земли; континентальный блок; мегаконтинент; увеличение размера; уменьшение количества; эпизодичный характер; архей; протерозой; фанерозой

Для цитирования: Божко Н. А. Об изменении размеров и числа континентальных блоков в эволюции суперконтинентальной цикличности // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 54–57. doi: 10.17076/geo2165

N. A. Bozhko. ON THE CHANGE IN THE SIZE AND NUMBER OF CONTINENTAL BLOCKS IN THE EVOLUTION OF THE SUPERCONTINENTAL CYCLE

Lomonosov Moscow State University, Department of Geology (1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia)

The change in the size of continental blocks and their number in the process of global supercontinental cycling is considered based on the analysis of published data. These changes were found to be towards an increase in the size of continental blocks involved in the assembly of supercontinents into megacontinents starting from the Early Archean, while their total number decreased. This process is associated with the thermal state of the mantle and the phases of the supercontinental cycle. The background for these changes was alternation of relatively hot and cold states of the mantle in the process of its general cooling. The explanation proposed by some researchers that the plate size increased gradually due to a change in tessellation (splitting of the sphere with a certain number of regular polygons) during the stage of disconnected continents in the settings of a relatively hot mantle and rapid and significant crust formation leading to supercontinent assembly is examined. During the assembled supercontinent stage, this increase slowed down due to the low rate of continental crust formation as the mantle was in a relatively cold state. The change in the size and number of plates during the supercontinental cycle was not a monotonous process, but had an episodic pattern, acquiring new features over time. Some frontiers of such updates appeared in the Archean with the rise of two types of supercontinental cycles, in the Early-Middle Proterozoic with the formation of a limited number of megacontinents, and in the Neoproterozoic-Phanerozoic with the dominance of megacontinents up to tens of thousands of kilometers wide.

Keywords: Supercontinent; supercontinental cyclicity; Earth mantle; continental block; megacontinent; increase in size; decrease in quantity; episodic character; Archaean; Proterozoic; Phanerozoic

For citation: Bozhko N. A. On the change in the size and number of continental blocks in the evolution of the supercontinental cycle. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 54–57. doi: 10.17076/geo2165

Изменение размеров континентальных блоков, принимающих участие в сборке суперконтинентов, является важным для понимания роста континентальной коры в тектонической эволюции Земли. Из простого обзора имеющихся данных можно сделать, и делается некоторыми исследователями, заключение об увеличении во времени площадей таких блоков. Вместе с тем в связи с этим встает ряд вопросов: происходило ли это увеличение, если оно имело место, непрерывно и однообразно, что являлось его первопричиной, происходило ли при этом изменение количества континентов и другие. В последние годы данная проблема прямо или косвенно затрагивалась в работах, посвященных росту континентальной коры [Rogers, Santosh, 2003; Komiya, 2011; Evans, 2013; Dhuime et al., 2018; Korenaga, 2018 и др.].

Автором [Божко, 2011] было отмечено проявление с позднего архея двух типов суперконтинентальных циклов (СЦ). СЦ первого типа характеризуются рассредоточенным и относительно равномерным по площади глобальным распадом существующего суперконтинента с образованием относительно многочисленных континентов и океанов. СЦ второго типа характеризуются неравномерным распадом суперконтинента, локализующимся попеременно в каком-то сегменте Южного или Северного полушария, тогда как значительная его площадь остается вне распада. При этом было отмечено, что начиная с суперконтинента Колумбии процесс образования суперконтинентов происходил в два этапа с поочередного создания крупных континентов (мегаконтинентов), приближающихся по размеру к полусферам типа Атлантиса, Нена, Гондваны, Лавразии и последующего их слияния в суперконтинент. Отмечалось также, что с рубежа около 700 млн лет в этом процессе происходило только участие крупных мегаконтинентов типа Гондваны, и это хорошо видно на примере формирования Пангеи.

На основании изучения обломочных осадочных пород, в особенности кварцевых песчаников, Х. Савада [Sawada, 2020] оценивает ширину и длину континентальных блоков хедия – раннего архея до 3,5 млрд лет в 200–500 км.

К 3,5 млрд лет появились континентальные блоки шире 500 км, а в период 3,3–2,5 млрд лет – более 1000 км. С рубежа 2,4 млрд лет появляются континенты с шириной и длиной около 10 000 км, подобные современной Северной Америке.

В работе [Van Kranendonk, Kirkland, 2016] суперконтинентальный цикл Земли в геологической летописи изучен на основании анализа изотопов гафния и кислорода в датированных кристаллах циркона, а также несовместимых элементов (Zr, Th) в магматических породах. Состояние разделенных континентов характеризуется высоким содержанием в мантии летучих веществ, повышенной рециркуляцией земной коры во время глобальной субдукции и быстрым ростом континентальной коры, что приводит к ступенчатому увеличению размеров плит за счет изменения геометрии тесселяции – разбиения сферы определенным количеством правильных многоугольников во время распада суперконтинентов.

Ч. Ванг и соавторы [Wang et al., 2021] подчеркивают роль мегаконтинентов как необходимых предшественников сборки суперконтинентов, подобно тому, как суперконтиненту Пангея предшествовало образование Гондваны, мегаконтинента размером примерно в половину Пангеи. Каждому из последних трех циклов формирования суперконтинентов (Колумбии, Родинии и Пангеи) за 200 миллионов лет предшествовало образование мегаконтинента. При этом Евразия рассматривается как предшественник будущей Амазии.

Результаты только приведенных работ позволяют заключить, что в течение глобальной суперконтинентальной цикличности размер континентальных плит увеличивался, а количество их уменьшалось. Размер архейской Ваалбары, даже допуская существование кроме нее других аналогичных одновозрастных континентальных фрагментов, несоизмерим с более значительной площадью неопротерозойского мегаконтинента Гондваны.

Природа этой направленности тесно связана с изменениями теплового состояния мантии и происходит на фоне ее общего охлаждения при чередовании периодов относительно холодной мантии собранного суперконтинента и горячей мантии его сборки.

Можно также сделать вывод, что процесс изменения размера и числа плит в ходе суперконтинентальной цикличности не являлся монотонным, но имел эпизодический характер. Некоторые рубежи таких изменений приблизительно намечаются в архее с появлением СЦ двух типов с многочисленными континентальными блоками, раннем-среднем протерозое с появлением мегаконтинентов ограниченного числа и неопротерозое-фанерозое при доминировании мегаконтинентов, достигающих размера шириной в десяток тысяч километров.

Для получения более полной картины по означенной теме необходимы дальнейшие исследования.

Литература

Божко Н. А. О двух типах суперконтинентальных циклов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 5. С. 15–23.

Dhuime B., Hawkesworth C. J., Delavault H., Cawood P. A. Rates of generation and destruction of the continental crust: implications for continental growth // Philos. Trans. R. Soc. A. 2018. Vol. 376. Art. 20170403. doi: 10.1098/rsta.2017.0403

Evans D. A. D. Reconstructing pre-Pangean supercontinents // Geol. Soc. Am. Bull. 2013. Vol. 125. P. 1735–1751. doi: 10.1130/B30950.1

Komiya T. Continental recycling and true continental growth // Russ. Geol. Geophys. 2011. Vol. 52(12). P. 1516–1529. doi: 10.1016/j.rgg.2011.11.001

Korenaga J. Estimating the formation age distribution of continental crust by unmixing zircon ages // Earth Planet Sci. Lett. 2018. Vol. 482. P. 388–395. doi: 10.1016/j.epsl.2017.11.039

Rogers J. J., Santosh M. Supercontinents in Earth history // Gondwana Res. 2003. Vol. 63. P. 357–368. doi: 10.1016/S1342-937X(05)70993-X

Sawada H. Estimation of secular change in the size of continents for understanding early crustal development // Front. Earth Sci. 2020. Vol. 8. P. 1–16. doi: 10.3389/feart.2020.541094

Van Kranendonk M. J., Kirkland C. L. Conditioned duality of the Earth system: geochemical tracing of the supercontinent cycle through Earth history // Earth-Science Rev. 2016. Vol. 160. P. 171–187. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.05.009

Wang C., Mitchell R. N., Murphy J. B., Peng P., Spencer C. J. The role of megacontinents in the supercontinent cycle // Geology. 2021. Vol. 49(4). P. 402–406. doi: 10.1130/G47988.1

References

Bozhko N. A. On two types of supercontinental cycles. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 4. Geologiya = Moscow University Bulletin. Series 4: Geology.* 2011;5:15–23. (In Russ.)

Dhuime B., Hawkesworth C. J., Delavault H., Cawood P. A. Rates of generation and destruction of the continental crust: implications for continental growth. *Philos. Trans. R. Soc. A.* 2018;376:20170403. doi: 10.1098/rsta.2017.0403

Evans D. A. D. Reconstructing pre-Pangean supercontinents. *Geol. Soc. Am. Bull.* 2013;125:1735–1751. doi: 10.1130/B30950.1

Komiya T. Continental recycling and true continental growth. *Russ. Geol. Geophys.* 2011;52(12):1516–1529. doi: 10.1016/j.rgg.2011.11.001

Korenaga J. Estimating the formation age distribution of continental crust by unmixing zircon ages. *Earth Planet Sci. Lett.* 2018;482:388–395. doi: 10.1016/j.epsl.2017.11.039

Rogers J. J., Santosh M. Supercontinents in Earth history. *Gondwana Res.* 2003;63:357–368. doi: 10.1016/S1342-937X(05)70993-X

Sawada H. Estimation of secular change in the size of continents for understanding early crustal development. *Front. Earth Sci.* 2020;8:1–16. doi: 10.3389/feart.2020.541094

Van Kranendonk M. J., Kirkland C. L. Conditioned duality of the Earth system: geochemical tracing of the supercontinent cycle through Earth history. *Earth-Science Rev.* 2016;160:171–187. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.05.009

Wang C., Mitchell R. N., Murphy J. B., Peng P., Spencer C. J. The role of megacontinents in the supercontinent cycle. *Geology*. 2021;49(4):402–406. doi: 10.1130/G47988.1

Поступила в редакцию / received: 29.07.2025; принята к публикации / accepted: 02.09.2025.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Божко Николай Андреевич

д-р геол.-мин. наук, профессор кафедры динамической геологии

e-mail: bozhko@yandex.ru

CONTRIBUTOR:

Bozhko, Nikolai

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 58–63
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 58–63
DOI: 10.17076/geo2184

УДК 551.82 : 551.72

РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ОРОГЕННЫЕ ПОЯСА ЮЖНОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТЕЙ СИБИРСКОГО КРАТОНА – ИНДИКАТОРЫ СТАНОВЛЕНИЯ ЕГО СТРУКТУРЫ

Т. В. Донская[1]*, Д. П. Гладкочуб[1], О. М. Туркина[2], У. С. Ефремова[1]

*[1] Институт земной коры СО РАН (ул. Лермонтова, 128, Иркутск, Россия, 664033), *tatiana_donskaya@mail.ru*
[2] Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090)

Проведено детальное изучение раннепротерозойских Акитканского и Транссибирского орогенных поясов в южной и центральной частях Сибирского кратона. В каждом поясе зафиксированы фрагменты доаккреционных породных комплексов, которые не связаны с эволюцией орогенных поясов. В структуре Акитканского пояса это гранитоиды с возрастом 2,88 и 2,15 млрд лет, а также метаморфизованные осадочные породы, накопление которых происходило в интервале от 2,15 до 1,95 млрд лет. В Транссибирском орогенном поясе к доаккреционным образованиям относятся амфибол-биотитовые гнейсы с возрастом гранитоидного протолита 2,25 млрд лет, гранатсодержащие парагнейсы с накоплением терригенных субстратов около 2,0 млрд лет назад и, возможно, фрагменты архейских породных комплексов. Индикаторами становления собственно орогенных поясов являются магматические образования, преимущественно гранитоиды с возрастом 2,02–1,97 млрд лет, характеризующиеся разнообразными химическими составами, формирование которых могло происходить в пределах аккреционных орогенов. Дальнейшая эволюция орогенных поясов связана с развитием осадочных бассейнов в обстановке растяжения, в которых накапливались моласоидные терригенные породы за счет разрушения орогенной постройки, а также с последующим внедрением постколлизионных магматических пород в интервале 1,88–1,85 млрд лет. В результате исследований установлено, что формирование Акитканского и Транссибирского орогенных поясов происходило по одинаковому сценарию, а их эволюция была достаточно длительной, с 2,02 до 1,85 млрд лет, что позволяет рассматривать данные раннепротерозойские орогенные пояса как индикаторы становления структуры Сибирского кратона.

Ключевые слова: магматические породы; терригенные породы; орогенные пояса; ранний протерозой; Сибирский кратон

Для цитирования: Донская Т. В., Гладкочуб Д. П., Туркина О. М., Ефремова У. С. Раннепротерозойские орогенные пояса южной и центральной частей Сибирского кратона – индикаторы становления его структуры // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 58–63. doi: 10.17076/geo2184

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-17-00196.

T. V. Donskaya[1]*, D. P. Gladkochub[1], O. M. Turkina[2], U. S. Efremova[1].

EARLY PROTEROZOIC OROGENIC BELTS OF THE SOUTHERN AND CENTRAL PARTS OF THE SIBERIAN CRATON AS INDICATORS OF ITS FORMATION

*[1] Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia), *tatiana_donskaya@mail.ru*

[2] V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Academician Koptyug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)

The paper presents the results of a detailed study of the Early Proterozoic Akitkan and Trans-Siberian orogenic belts in the southern and central parts of the Siberian Craton. Each belt contains fragments of pre-accretionary rocks not associated with the evolution of orogenic belts. In the Akitkan belt, these are 2.88 and 2.15 Ga granitoids, as well as metamorphosed sedimentary rocks accumulated from 2.15 to 1.95 Ga. Pre-accretionary rocks in the Trans-Siberian orogenic belt include amphibole-biotite gneisses with the granitoid protolith age at 2.25 Ga, garnet-bearing paragneisses with the accumulation of terrigenous substrates at about 2.0 Ga, and, possibly, fragments of Archean rocks. Indicators of the formation of orogenic belts are igneous rocks, mainly granitoids of varying chemical composition aged 2.02–1.97 Ga, which could have been generated within accretionary orogens. Further evolution of the orogenic belts is related to the development of sedimentary basins in an extension setting, in which molassoid terrigenous rocks accumulated due to the destruction of the orogens, as well as to the intrusion of post-collisional igneous rocks in the time interval from 1.88 to 1.85 Ga. The formation of the Akitkan and Trans-Siberian orogenic belts followed the same scenario, and their evolution timeframe was quite extensive, from 2.02 to 1.85 Ga, which allows us to consider these Early Proterozoic orogenic belts as indicators of the formation of the Siberian Craton.

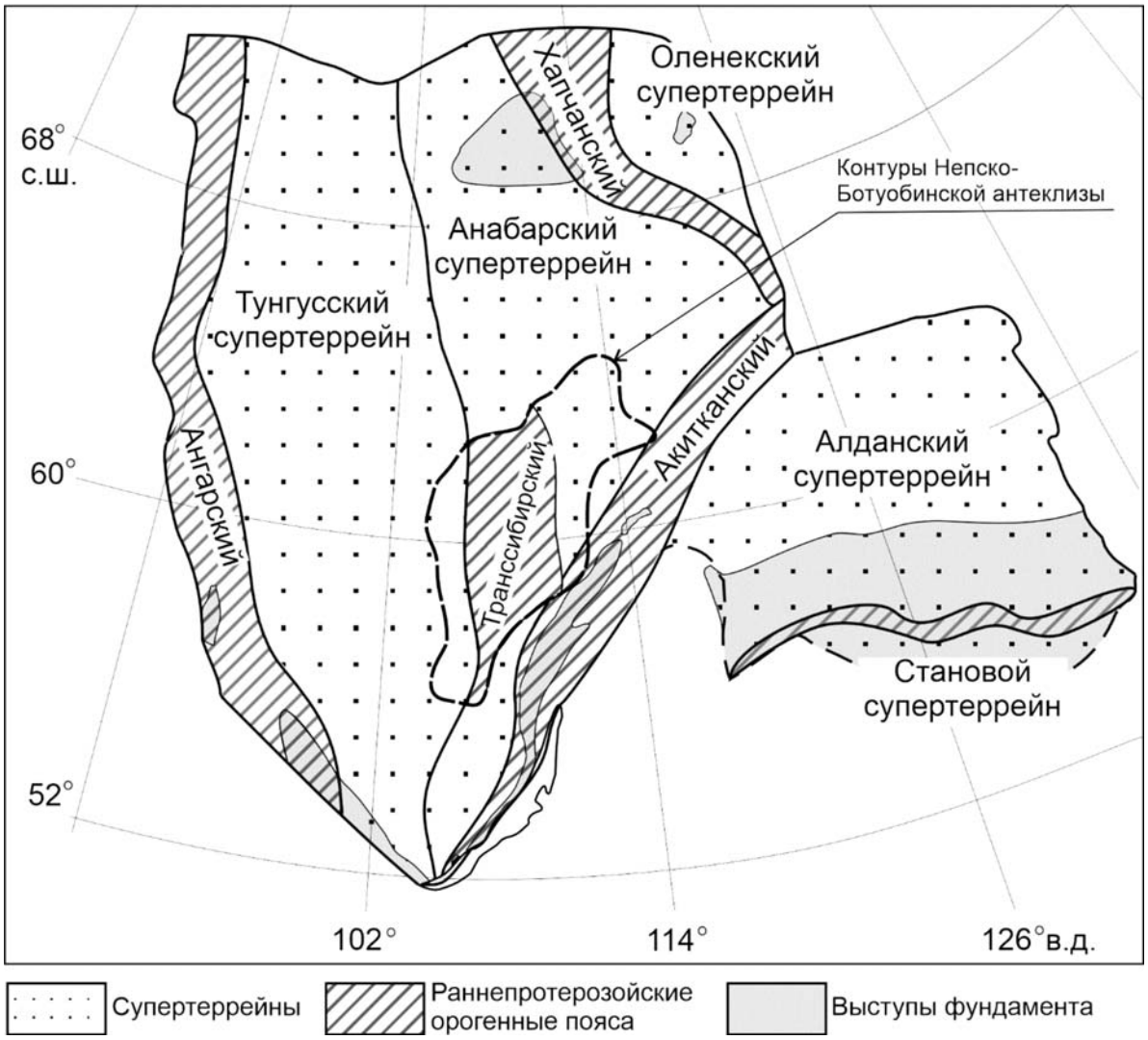
Keywords: igneous rocks; terrigenous rocks; orogenic belts; Early Proterozoic; Siberian Craton

For citation: Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Turkina O. M., Efremova U. S. Early Proterozoic orogenic belts of the southern and central parts of the Siberian Craton as indicators of its formation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 58–63. doi: 10.17076/geo2184

Funding. The research was supported by Russian Science Foundation grant No. 23-17-00196.

Сибирский кратон представляет собой структуру, состоящую из архейских и раннепротерозойских супертеррейнов, разделенных раннепротерозойскими орогенными поясами и шовными зонами [Розен, 2003; Gladkochub et al., 2006; Donskaya, 2020; Priyatkina et al., 2020 и др.]. Расшифровать особенности становления структуры кратона позволяет детальное изучение эволюции орогенных поясов и шовных зон. Данная работа посвящена рассмотрению эволюции Акитканского и Транссибирского орогенных поясов в южной и центральной частях Сибирского кратона (рис.) с целью реконструировать основные этапы становления его структуры.

Акитканский орогенный пояс, разделяющий, согласно нескольким схемам строения кратона, архейские Анабарский и Алданский супертеррейны (рис.), хорошо изучен в южной части, где породы пояса выходят на поверхность в пределах Байкальского выступа фундамента. В структуре Акитканского орогенного пояса отмечаются фрагменты пород, не связанные с его эволюцией, в том числе гранитоиды тоналит-трондьемит-гранодиоритовой серии с возрастом 2,88 млрд лет [Donskaya et al., 2009], граниты с возрастом 2,15 млрд лет [Донская и др., 2016], метаморфизованные осадочные породы, накопление которых имело место в период 2,15–1,95 млрд лет [Ефремова и др., 2024а]. Формирование собственно Акитканского орогенного пояса, по-видимому, началось с субдукции под южную часть Анабарского супертеррейна и с развитием здесь активной континентальной окраины с сопряженными островными дугами. Индикаторами этих событий являются магматические породы с возрастом около 2,02 млрд лет, имеющие надсубдукционные геохимические характеристики и положительные значения $\varepsilon_{Nd}(t)$, сформированные за счет плавления ювенильной ранне-



Упрощенная схема тектонического строения фундамента Сибирского кратона (модифицированная после [Розен, 2003; Gladkochub et al., 2006; Донская и др., 2025])

Simplified tectonic scheme of the Siberian Craton (modified after [Rosen, 2003; Gladkochub et al., 2006; Donskaya et al., 2025])

протерозойской коры [Неймарк и др., 1998; Донская и др., 2013, 2016]. Становление аккреционного Акитканского орогенного пояса продолжалось в условиях смены субдукционного режима на коллизионный в интервале 2,00–1,95 млрд лет, что фиксируется возрастом основных метаморфических событий в пределах этого пояса [Донская и др., 2016; Савельева и др., 2019]. Дальнейшая эволюция Акитканского пояса связана с развитием осадочных бассейнов в обстановке растяжения на временном интервале 1,95–1,91 млрд лет [Ефремова и др., 2024б] и с последующим внедрением пород Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса на интервале 1,88–1,84 млрд лет [Donskaya, Gladkochub, 2021].

Транссибирский (Восточно-Тунгусский, Маганский) орогенный пояс, разделяющий архейские Анабарский и Тунгусский супертеррейны, расположен в центральной части Сибирского кратона (рис.). Раннедокембрийские породы этого орогенного пояса полностью перекрыты осадочным чехлом, поэтому его конфигурация до сих пор остается неоднозначной. На некоторых тектонических схемах выделялся даже не орогенный пояс, а очень узкая раннепротерозойская шовная зона [Розен, 2003; Gladkochub et al., 2006; Donskaya, 2020], а на других отмечался очень широкий орогенный пояс в размерах Маганского террейна Анабарского супертеррейна [Priyatkina et al., 2020]. Полученные новые данные по породам из керна глубоких

скважин, вскрывающих породы докембрийского фундамента Сибирского кратона, позволили приблизиться к реконструкции конфигурации и основных этапов эволюции этого раннепротерозойского пояса в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы (рис.). Подобно Акитканскому поясу, в структуре Транссибирского орогенного пояса присутствуют фрагменты пород, не связанные с его эволюцией, а именно амфибол-биотитовые гнейсы с возрастом гранитоидного протолита 2,25 млрд лет [Донская и др., 2025], гранатсодержащие парагнейсы, накопление терригенных субстратов которых имело место около 2,0 млрд лет назад, и, возможно, фрагменты архейских породных комплексов. Основной этап формирования Транссибирского орогенного пояса отвечает временному интервалу 2,00–1,97 млрд лет и фиксируется гранитоидами этого возраста, характеризующимися разнообразными химическими составами, близкими к гранитам *I*- и *S*-типов, и Nd-модельным возрастом 2,6–2,4 млрд лет [Попов и др., 2015; Туркина и др., 2024; Донская и др., 2025]. Эти данные свидетельствуют о том, что формирование гранитоидов могло происходить в пределах аккреционного орогена, объединяющего в себе блоки с архейской и ювенильной раннепротерозойской корой [Туркина и др., 2024]. Формирование Транссибирского орогенного пояса, вероятно, завершилось так же, как и Акитканского пояса, когда в осадочных бассейнах растяжения начали накапливаться молассоидные терригенные породы за счет разрушения орогенной постройки. В качестве подобных образований в Транссибирском орогенном поясе можно рассматривать протолиты гранат-биотитовых парагнейсов (метаграувакк) с возрастом детритового циркона преимущественно в интервале 2,12–1,98 млрд лет [Самсонов и др., 2023]. Финальной стадией эволюции Транссибирского орогенного пояса является внедрение гранитоидов с возрастом 1,88 млрд лет [Туркина и др., 2024], что отвечает времени формирования пород Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса.

Таким образом, проведенные исследования показали, что становление Акитканского орогенного пояса в южной части Сибирского кратона и Транссибирского орогенного пояса в его центральной части происходило по одинаковому сценарию, а их эволюция была достаточно длительной, продолжаясь с 2,02 до 1,85 млрд лет, что позволяет рассматривать эти раннепротерозойские орогенные пояса как индикаторы становления структуры Сибирского кратона.

Литература

Донская Т. В., Гладкочуб Д. П., Мазукабзов А. М., Пресняков С. Л., Баянова Т. Б. Палеопротерозойские гранитоиды чуйского и кутимского комплексов (юг Сибирского кратона): возраст, петрогенезис и геодинамическая природа // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 3. С. 371–389.

Донская Т. В., Гладкочуб Д. П., Мазукабзов А. М., Лепехина Е. Н. Возраст и источники палеопротерозойских дометаморфических гранитоидов Голоустенского блока Сибирского кратона: геодинамические следствия // Петрология. 2016. Т. 24, № 6. С. 587–606. doi: 10.7868/S0869590316050046

Донская Т. В., Гладкочуб Д. П., Сукнева М. О., Ефремова У. С., Туркина О. М., Вахромеев А. Г., Демонтерова Е. И. Раннепротерозойские гранитоиды центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы – индикаторы становления Транссибирского орогенного пояса Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2025. doi: 10.15372/GiG2025155

Ефремова У. С., Донская Т. В., Гладкочуб Д. П., Мазукабзов А. М., Иванов А. В., Брянский Н. В. Разделение раннепротерозойской харгитуйской свиты сарминской серии (Акитканский орогенный пояс, Сибирский кратон) на разновозрастные толщи на основании результатов U-Pb-изотопного анализа циркона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024а. Т. 517, № 1. С. 707–715. doi: 10.31857/S2686739724070059

Ефремова У. С., Донская Т. В., Гладкочуб Д. П., Мазукабзов А. М., Иванов А. В., Брянский Н. В. Раннепротерозойские отложения иликтинской свиты как индикаторы эволюции Акитканского орогена (юг Сибирского кратона) // Геология и геофизика. 2024б. Т. 65, № 5. С. 631–654. doi: 10.15372/GiG2023203

Неймарк Л. А., Ларин А. М., Немчин А. А., Овчинникова Г. В., Рыцк Е. Ю. Геохимические, геохронологические (U-Pb) и изотопные (Pb, Nd) свидетельства анорогенного характера магматизма Северо-Байкальского вулкано-плутонического пояса // Петрология. 1998. Т. 6, № 4. С. 139–164.

Попов Н. В., Сафонова И. Ю., Постников А. А., Терлеев А. А., Комия Ц., Токарев Д. А. Палеопротерозойские гранитоиды из фундамента центральной части Сибирской платформы (скважина Могдинская-6): U-Pb возраст и состав // ДАН. 2015. Т. 461, № 5. С. 558–562. doi: 10.7868/S0869565215110201

Розен О. М. Сибирский кратон: тектоническое районирование, этапы эволюции // Геотектоника. 2003. № 3. С. 3–21.

Савельева В. Б., Данилова Ю. В., Шумилова Т. Г., Иванов А. В., Данилов Б. С., Базарова Е. П. Эпигенетическая графитизация в фундаменте Сибирского кратона – свидетельство миграции обогащенных углеводородами флюидов в палеопротерозое // ДАН. 2019. Т. 486, № 2. С. 217–222. doi: 10.31857/S0869-56524862217-222

Самсонов А. В., Ерофеева К. Г., Постников А. В., Спиридонов В. А., Ларионова Ю. О., Ларионов А. Н., Терехов А. В., Сабиров И. А., Спиридонов И. В., Дубенский А. С. Палеопротерозойский Таймыро-

Байкальский ороген в южной части Сибирского кратона: границы, состав и история формирования по изучению керна скважин // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2023: Мат-лы LIV Тектонического совещания. Т. 2. М.: Геос, 2023. С. 168–171.

Туркина О. М., Плюснин А. В., Донская Т. В., Афонин И. О., Санин С. С. Гнейсы и гранитоиды фундамента Непско-Ботуобинской антеклизы: ограничения на распространение архейской и палеопротерозойской коры в зоне сочленения Тунгусского супертеррейна и Маганского террейна (юг Сибирского кратона) // Петрология. 2024. Т. 32, № 4. С. 446–470. doi: 10.31857/S0869590324040024

Donskaya T. V. Assembly of the Siberian Craton: constraints from Paleoproterozoic granitoids // Precambr. Res. 2020. Vol. 348. Art. 105869. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105869

Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Pisarevsky S. A., Poller U., Mazukabzov A. M., Bayanova T. B. Discovery of Archaean crust within the Akitkan orogenic belt of the Siberian Craton: new insight into its architecture and history // Precambr. Res. 2009. Vol. 170. P. 61–72. doi: 10.1016/j.precamres.2008.12.003

Donskaya T. V., Gladkochub D. P. Post-collisional magmatism of 1.88–1.84 Ga in the southern Siberian Craton: an overview // Precambr. Res. 2021. Vol. 367. Art. 106447. doi: 10.1016/j.precamres.2021.106447

Gladkochub D. P., Pisarevsky S. A., Donskaya T. V., Natapov L. M., Mazukabzov A. M., Stanevich A. M., Sklyarov E. V. Siberian Craton and its evolution in terms of Rodinia hypothesis // Episodes. 2006. Vol. 29, no. 3. P. 169–174. doi: 10.18814/epiiugs/2006/v29i3/00

Priyatkina N., Ernst R. E., Khudoley A. K. A preliminary reassessment of the Siberian cratonic basement with new U-Pb-Hf detrital zircon data // Precambr. Res. 2020. Vol. 340. Art. 105645. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105645

References

Donskaya T. V. Assembly of the Siberian Craton: constraints from Paleoproterozoic granitoids. *Precambr. Res.* 2020;348:105869. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105869

Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Mazukabzov A. M., Presnyakov S. L., Bayanova T. B. Paleoproterozoic granitoids of the Chuya and Kutima complexes (southern Siberian Craton): age, petrogenesis, and geodynamic setting. *Russ. Geol. Geophys.* 2013;54(3): 283–296. doi: 10.1016/j.rgg.2013.02.004

Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Mazukabzov A. M., Lepekhina E. N. Age and sources of the Paleoproterozoic premetamorphic granitoids of the Goloustnaya Block of the Siberian Craton: geodynamic applications. *Petrology.* 2016;24(6):543–561. doi: 10.1134/S0869591116050040

Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Pisarevsky S. A., Poller U., Mazukabzov A. M., Bayanova T. B. Discovery of Archaean crust within the Akitkan orogenic belt of the Siberian Craton: new insight into its architecture and history. *Precambr. Res.* 2009;170:61–72. doi: 10.1016/j.precamres.2008.12.003

Donskaya T. V., Gladkochub D. P. Post-collisional magmatism of 1.88–1.84 Ga in the southern Siberian Craton: an overview. *Precambr. Res.* 2021;367:106447. doi: 10.1016/j.precamres.2021.106447

Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Sukneva M. O., Efremova U. S., Turkina O. M., Vakhromeev A. G., Demonterova E. I. Early Proterozoic granitoids of the central part of the Nepa-Botuoba anteclise as indicators of the formation of the Trans-Siberian orogenic belt of the Siberian Craton. *Russ. Geol. Geophys*. 2025. (In Russ.). doi: 10.15372/GiG2025155

Efremova U. S., Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Mazukabzov A. M., Ivanov A. V., Bryansky N. V. Division of the Early Proterozoic Khargitui Formation of the Sarma Group (Akitkan Orogenic Belt, Siberian Craton) into different age sequences based on the results of U–Pb isotopic analysis of zircon. *Doklady Earth Sci.* 2024;517(1):1119–1125. doi: 10.1134/S1028334X24601913

Efremova U. S., Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Mazukabzov A. M., Ivanov A. V., Bryansky N. V. Early Proterozoic Ilikta Formation: a record of the Akitkan Orogen evolution (southern Siberian Craton). *Russ. Geol. Geophys*. 2024;65(5):559–578. doi: 10.2113/RGG20234675

Gladkochub D. P., Pisarevsky S. A., Donskaya T. V., Natapov L. M., Mazukabzov A. M., Stanevich A. M., Sklyarov E. V. Siberian Craton and its evolution in terms of Rodinia hypothesis. *Episodes*. 2006;29(3):169–174. doi: 10.18814/epiiugs/2006/v29i3/00

Neymark L. A., Larin A. M., Nemchin A. A., Ovchinnikova G. V., Rytsk E. Yu. Anorogenic nature of magmatism in the Northern Baikal volcanic belt: evidence from geochemical, geochronological (U–Pb), and isotopic (Pb, Nd) data. *Petrology*. 1998;6(2): 124–148.

Popov N. V., Safonova I. Yu., Postnikov A. A., Terleev A. A., Komiya T., Tokarev D. A. Paleoproterozoic granitoids from the basement of the central Siberian Platform (borehole Mogdinskaya-6): U-Pb age and composition. *Doklady Earth Sci*. 2015;461(2):334–338. doi: 10.1134/S1028334X15040145

Priyatkina N., Ernst R. E., Khudoley A. K. A preliminary reassessment of the Siberian cratonic basement with new U-Pb-Hf detrital zircon data. *Precambr. Res.* 2020;340:105645. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105645

Rosen O. M. Siberian Craton: tectonic zonation and evolution stages. *Geotectonics*. 2003;37(3): 175–192.

Samsonov A. V., Erofeeva K. G., Postnikov A. V., Spiridonov V. A., Larionova Yu. O., Larionov A. N., Terekhov A. V., Sabirov I. A., Spiridonov I. V., Dubensky A. S. Paleoproterozoic Taimyr-Baikal Orogen in the southern part of the Siberian Craton: boundaries, composition, and formation history based on well core studies. *Tektonika i geodinamika zemnoi kory i mantii: fundamental'nye problemy-2023: Mat-ly LIV Tektonicheskogo soveshchaniya = Tectonics and geodynamics of the Earth's crust and mantle: fundamental problems-2023: Proceedings of the LIV tectonic conference*. Vol. 2. Moscow: GEOS; 2023. P. 168–171. (In Russ.)

Savelyeva V. B., Danilova Yu. V., Shumilova T. G., Ivanov A. V., Danilov B. S., Bazarova E. P. Epigenetic graphitization in the basement of the Siberian Craton as evidence of the migration of hydrocarbon-enriched fluids in the Paleoproterozoic. *Doklady Earth Sci*. 2019;486(1):498–502. doi: 10.1134/S1028334X19050155

Turkina O. M., Plyusnin A. V., Donskaya T. V., Afonin I. V., Sanin S. S. Gneisses and granitoids of the basement of the Nepa-Botuoba anteclise: constraints for relation of the Archean and Paleoproterozoic crust in the boundary zone between the Tungus Superterrane and Magan Terrane (South Siberian Craton). *Petrology*. 2024;32(4):569–593. doi: 10.1134/S0869591124700139

Поступила в редакцию / received: 05.08.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Донская Татьяна Владимировна
чл.-корр. РАН, д-р геол.-мин. наук,
главный научный сотрудник
e-mail: tatiana_donskaya@mail.ru

Гладкочуб Дмитрий Петрович
чл.-корр. РАН, д-р геол.-мин. наук, профессор, директор
e-mail: gladkochub@mail.ru

Туркина Ольга Михайловна
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: turkina@igm.nsc.ru

Ефремова Ульяна Сергеевна
канд. геол.-мин. наук, младший научный сотрудник
e-mail: ulianavolpe@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Donskaya, Tatiana
RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher

Gladkochub, Dmitry
RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Director

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

Efremova, Uliana
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Junior Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 64–68
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 64–68
DOI: 10.17076/geo2156

УДК 551.243.6:(268.5)

САРИОЛИЙСКАЯ КРУПНАЯ МАГМАТИЧЕСКАЯ ПРОВИНЦИЯ НА ФЕННОСКАНДИНАВСКОМ ЩИТЕ: СОСТАВ, ЛАТЕРАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ, ИСТОЧНИКИ РАСПЛАВОВ

С. В. Егорова[1]*, **А. В. Степанова**[1], **К. Г. Ерофеева**[2]

*[1] Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *zumlic@mail.ru*
[2] Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017)

В работе обсуждается характер распространения базитов с возрастом 2,4 млрд лет в пределах Фенноскандинавского щита. В Кольской провинции установлены дайки оливиновых долеритов и дифференцированные силлы пикродолеритов, в Мурманском и Карельском кратонах – дайки долеритов. Возраст кристаллизации вулканитов Ветреного пояса также оценивается в 2407 млн лет. Базиты с возрастом 2,4 млрд лет надежно датированы в пределах Беломорской провинции и представлены дайками оливиновых габброноритов и дифференцированными массивами. Таким образом, базиты с возрастом 2400 ± 10 млн лет широко распространены на Фенноскандинавском щите и могут рассматриваться в составе обособленной крупной магматической провинции. Оценки потенциальных температур и состава мантийного источника, выполненные для даек и силлов с возрастом 2,4 млрд лет Кольской провинции, предполагают его гарцбургитовый состав и значения $T_P > 1500$ °C, $P > 2{,}3$ GPa. Полученные оценки предполагают плюмовую природу расплавов крупной магматической провинции с возрастом 2,4 млрд лет на Фенноскандинавском щите.

Ключевые слова: базитовые дайки; палеопротерозой; крупные магматические провинции; Фенноскандинавский щит

Для цитирования: Егорова С. В., Степанова А. В., Ерофеева К. Г. Сариолийская крупная магматическая провинция на Фенноскандинавском щите: состав, латеральная зональность, источники расплавов // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 64–68. doi: 10.17076/geo2156

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геологии КарНЦ РАН (FMEN-2023-0009).

S. V. Egorova[1]*, A. V. Stepanova[1], K. G. Erofeeva[2]. SARIOLA LARGE IGNEOUS PROVINCE IN THE FENNOSCANDIAN SHIELD: COMPOSITION, LATERAL ZONING, MELT SOURCES

*[1] Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *zumlic@mail.ru*
[2] Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (35 Staromonetniy Per., 119017 Moscow, Russia)

The paper discusses the distribution of basites aged 2.4 Ga within the Fennoscandian Shield. In the Kola Province, olivine-bearing dolerite dykes and differentiated sills of picritic dolerite have been recognized. Meanwhile, in both the Murmansk and Karelia Cratons there occur doleritic dykes. Additionally, volcanics from the Vetreny Belt show similar ages (2407 Ma). Within the Belomorian Province, olivine gabbro-norite dykes and differentiated intrusive bodies also formed at ~ 2.4 Ga. Hence, basites of 2.4 Ga age are widely distributed across the Fennoscandian Shield. Potential temperature conditions and composition analyses of 2.4 Ga dykes and sills within the Kola Province indicate their formation occurred under T > 1500 °C and P > 2.3 GPa, implying a possible mantle-plume origin.

Keywords: basic dykes; Paleoproterozoic; large igneous provinces; Fennoscandian Shield

For citation: Egorova S. V., Stepanova A. V., Erofeeva K. G. Sariola large igneous province in the Fennoscandian Shield: composition, lateral zoning, melt sources. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 64–68. doi: 10.17076/geo2156

Funding. The work was funded within state-ordered research theme of the IG KarRC RAS (FMEN-2023-0009).

Крупные магматические провинции (КМП), образование которых связывается с подъемом мантийных плюмов, являются важным источником информации при расшифровке состава и условий плавления мантии. Формирование КМП происходило на протяжении всей геологической истории Земли, поэтому они могут быть использованы для изучения эволюции источников магм начиная с самых ранних этапов развития планеты. Докембрийские КМП, как правило, глубоко эродированы и представлены дайковыми роями, силлами и расслоенными интрузиями, значительно реже сохраняются вулканогенно-осадочные комплексы.

Реликты КМП с возрастом 2400 млн лет к настоящему времени установлены на многих кратонах мира: на кратонах Сьюпериор, Зимбабве и Илгарн, в Льюисском комплексе (Шотландия) [Ciborowski et al., 2014; Davies, Heaman, 2014]. В пределах Фенноскандинавского щита рои базитовых даек, силлы и вулканиты с возрастом 2400 ± 10 млн лет, отвечающие в региональной стратиграфической шкале сариолийскому надгоризонту, установлены в центральной части Карельского кратона, где они представлены дайками долеритов [Vuollo, Huhma, 2005; Stepanova et al., 2017], и в восточной части кратона, где к этапу магматизма 2400 млн лет относятся вулканиты и интрузии кряжа Ветреный пояс [Puchtel et al., 2016]. В Беломорской провинции событие 2400 млн лет связано с формированием даек оливиновых габброноритов, датированных в районе с. Гридино, и дифференцированных интрузивов [Stepanova et al., 2017 и ссылки в этой работе; Salnikova et al., 2022]. В Кольской провинции компоненты КМП представлены дайками и силлами пикродолеритов [Salnikova et al., 2020], а в Мурманском кратоне дайками долеритов. Прецизионные геохронологические данные свидетельствуют в пользу обособленного от эпизода 2450 млн лет события, а значительный объем и площадь распространения базитов с возрастом 2400 млн лет на Фенноскандинавском щите определяет его как крупную магматическую провинцию.

По составу базиты с возрастом 2400 млн лет на Фенноскандинавском щите широко варьируют: в дайках долеритов Карельского и Мурманского кратонов содержание MgO не превышает 7 мас. % (в среднем составляя 3–5 мас. %), а в дайках Кольской и Беломорской провинций содержания MgO укладываются в диапазон от 14 до 18 мас. %. В вулканитах Ветреного пояса, дифференцированных силлах и интрузивах Кольской и Беломорской провинций MgO варьирует от 6 до 26 мас. %.

Характерно дифференцированное распределение РЗЭ, обеднение Nb и обогащение LILE. Предполагается, что высокомагнезиальные и низкомагнезиальные компоненты сариолийской КМП с возрастом 2400 млн лет связаны не только сочетанием процессов дифференциации и коровой контаминации, но и могут быть производными разных мантийных источников [Kullerud et al., 2006; Stepanova et al., 2017]. Широкие вариации состава пород ставят вопрос о составе первичных расплавов и их природе. Высоко-Mg состав базитов свидетельствует в пользу плюмовой природы расплавов, однако в большинстве случаев обусловлен их кумулятивной природой, а первичные оливины часто изменены или переуравновешены в результате диффузии. Наличие сохранных даек и силлов с оливином в зонах закалки и включениями в них позволяет оценить состав первичных расплавов и условия их кристаллизации.

Одна из хорошо сохранившихся даек расположена в центральной части Кольской провинции в районе ст. Лапландия. Породы дайки характеризуются высоким содержанием MgO (18,7 мас. % в зоне закалки) и сопоставимы с пикродолеритами силлов Кольской провинции и габброноритами интрузивов Беломорской провинции [Salnikova et al., 2020, 2022]. Породы дайки характеризуются отличной сохранностью как в центре тела, так и в зоне закалки, что делает данный объект благоприятным для оценки состава первичных расплавов и истории их эволюции.

Минералого-петрографическое изучение пород и оценка PT-условий формирования (с использованием геотермометра [Coogan et al., 2014] и Cpx геотермобарометра [Wang et al., 2021]) позволили выделить в истории кристаллизации расплавов следующие этапы: 1) кристаллизация в магматической камере *in situ* маркируется формированием пироксенов основной массы и краевых частей микрофенокристов пироксенов при T_{CPx3-4} = 1150–1200 °C и P_{CPx3-4} = 2–6 кбар; 2) в промежуточной камере происходила кристаллизация высоко-Mg ядер фенокристов пироксена при T_{CPx1-2} = 1270–1290 °C и P_{CPx1-2} = 7–10 кбар. Особенности строения и состава ядер пироксенов предполагают поступление в промежуточную камеру новых порций расплава; 3) кристаллизация наиболее высокотемпературных фаз – оливина и хромшпинели происходила при T_{Ol-Spl} > 1400 °C. Расчет потенциальных температур мантийного источника с использованием полученной температуры кристаллизации оливина [Putirka, 2008] показал, что значения T_P составляли около 1500 °C. А особенности состава фенокристаллов оливина (высокие концентрации Ni и низкие содержания Mn) могут являться свидетельством в участии процессов магмообразования пироксенитового источника [Sobolev et al., 2007].

Оценки потенциальных температур и состава мантийного источника, выполненные для даек и силлов Кольской провинции с использованием PRIMELT3 P [Herzberg et al., 2023], предполагают значения T_P > 1500 °C, P = 3,6 GPa. Близкие значения T_P были получены с использованием Fractionate-PT [Lee et al., 2009]: T_P = 1500–1570 °C и P = 2,3–3,1 GPa. Полученные оценки потенциальных температур мантийного источника превышают температуры «нормальной» мантии для раннего палеопротерозоя [Herzberg et al., 2010] и предполагают плюмовую природу расплавов. Модельный состав расплавов, сформировавших наиболее магнезиальные дайки Кольской провинции, вероятно, близок к первичным расплавам сариолийской КМП.

Таким образом, полученные данные позволяют предполагать, что сариолийская КМП с возрастом 2400 млн лет была сформирована в результате подъема мантийного плюма. В характере пространственного распространения базитов сариолийской КМП в пределах Фенноскандинавского щита отчетливо проявлена зональность: внедрение наиболее магнезиальных (более высокотемпературных) расплавов происходило вдоль траверса Лиинахамари – Ветреный пояс, а менее магнезиальные внедрялись на флангах – к юго-западу и северо-востоку.

Литература

Ciborowski T. J. R., Kerr A. C., Mcdonald I., Ernst R. E., Hughes H. S., Minifie M. The geochemistry and petrogenesis of the Paleoproterozoic du Chef dyke swarm, Québec, Canada // Precambr. Res. 2014. Vol. 250. P. 151–166. doi: 10.1016/j.precamres.2014.05.008

Coogan L. A., Saunders A. D., Wilson R. N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // Chem. Geol. 2014. Vol. 368. P. 1–10. doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.01.004

Davies J. H. F. L., Heaman L. M. New U-Pb baddeleyite and zircon ages for the Scourie dyke swarm: a long-lived large igneous province with implications for the Paleoproterozoic evolution of NW Scotland // Precambr. Res. 2014. Vol. 249. P. 180–198. doi: 10.1016/j.precamres.2014.05.007

Herzberg C. T., Asimow P. D., Hernández-Montenegro J. D. The meaning of pressure for primary magmas: new insights from PRIMELT3-P // Geochem.

Geophys. Geosyst. 2023. No. 1(24). e2022GC010657. doi: 10.1029/2022GC010657

Herzberg C., Condie K., Korenaga J. Thermal history of the Earth and its petrological expression // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. No. 1–2(292). P. 79–88. doi: 10.1016/j.epsl.2010.01.022

Kullerud K., Skjerlie K. P., Corfu F., de la Rosa J. D. The 2.40 Ga Ringvassøy mafic dykes, West Troms Basement Complex, Norway: the concluding act of early Paleoproterozoic continental breakup // Precambr. Res. 2006. Vol. 150. P. 183–200. doi: 10.1016/j.precamres.2006.08.003

Lee C. T. A., Luffi P., Plank T., Dalton H., Leeman W. P. Constraints on the depths and temperatures of basaltic magma generation on Earth and other terrestrial planets using new thermobarometers for mafic magmas // Earth Planet. Sci. Lett. 2009. No. 1–2(279). P. 20–33. doi: 10.1016/j.epsl.2008.12.020

Puchtel I. S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R. J., Brandon A. D., Nicklas R. W., Kulikov V. S., Samsonov A. V. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean-Proterozoic boundary: evidence from 2.4 Ga komatiites // Geochim. Cosmochim. Acta. 2016. Vol. 180. P. 227–255. doi: 10.1016/j.gca.2016.02.027

Putirka K. Thermometers and barometers for volcanic systems // Rev. Mineral. Geochem. 2008. Vol. 69. P. 61–120. doi: 10.2138/rmg.2008.69.3

Salnikova E. B., Samsonov A. V., Stepanova A. V., Veselovskiy R. V., Egorova S. V., Arzamastsev A. A., Erofeeva K. G. Fragments of Paleoproterozoic large igneous provinces in Northern Fennoscandia: baddeleyite U–Pb age data for mafic dykes and sills // Doklady Earth Sciences. 2020. Vol. 491. P. 227–230. doi: 10.1134/S1028334X20040145

Salnikova E. B., Stepanova A. V., Azimov P. Y., Sukhanova M. A., Kotov A. B., Egorova S. V., Plotkina Yu. V., Tolmacheva E. V., Kervinen A. V., Rodionov N. V., Stepanov V. S. A history of coronitic metagabbronorites in the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: U-Pb (CA-ID-TIMS) dating of zircon–baddeleyite aggregates // Petrology. 2022. Vol. 30 P. 567–590. doi: 10.1134/S0869591122060066

Sobolev A. V., Hofmann A. W., Kuzmin D. V., Yaxley G. M., Arndt N. T., Chung S.-L., Danyushevsky L. V., Elliott T., Frey F. A., Garcia M. O., Gurenko A. A., Kamenetsky V. S., Kerr A. C., Krivolutskaya N. A., Matvienkov V. V., Nikogosian I. K., Rocholl A., Sigurdsson I. A., Sushchevskaya N. M., Teklay M. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // Science. 2007. Vol. 316, no. 5823. P. 412–417. doi: 10.1126/science.1138113

Stepanova A. V., Sal'nikova E. B., Samsonov A. V., Larionova Yu. O., Egorova S. V., Savatenkov V. M. The 2405 Ma doleritic dykes in the Karelian Craton: a fragment of a Paleoproterozoic large igneous province // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 472, iss. 2. P. 72–77. doi: 10.1134/S1028334X17010196

Vuollo J., Huhma H. Paleoproterozoic mafic dikes in NE Finland / Eds. M. Lehtinen, P. A. Nurm, O. T. Ramo. The Precambrian geology of Finland – key to the evolution of the Fennoscandian Shield. Developments in Precambrian geology 14. Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 195–236.

Wang X., Hou T., Wang M., Zhang C., Zhang Z., Pan R., Marxer F., Zhang H. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems // Eur. J. Mineral. 2021. Vol. 33(5). P. 621–637. doi: 10.5194/ejm-33-621-2021

References

Ciborowski T. J. R., Kerr A. C., Mcdonald I., Ernst R. E., Hughes H. S., Minifie M. The geochemistry and petrogenesis of the Paleoproterozoic du Chef dyke swarm, Québec, Canada. *Precambr. Res.* 2014;250: 151–166. doi: 10.1016/j.precamres.2014.05.008

Coogan L. A., Saunders A. D., Wilson R. N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces. *Chem. Geol.* 20144368:1–10. doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.01.004

Davies J. H. F. L., Heaman L. M. New U-Pb baddeleyite and zircon ages for the Scourie dyke swarm: a long-lived large igneous province with implications for the Paleoproterozoic evolution of NW Scotland. *Precambr. Res.* 2014;249:180–198. doi: 10.1016/j.precamres.2014.05.007

Herzberg C. T., Asimow P. D., Hernández-Montenegro J. D. The meaning of pressure for primary magmas: new insights from PRIMELT3-P. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2023;1(24):e2022GC010657. doi: 10.1029/2022GC010657

Herzberg C., Condie K., Korenaga J. Thermal history of the Earth and its petrological expression. *Earth Planet. Sci. Lett*. 2010;1–2(292):79–88. doi: 10.1016/j.epsl.2010.01.022

Kullerud K., Skjerlie K. P., Corfu F., de la Rosa J. D. The 2.40 Ga Ringvassøy mafic dykes, West Troms Basement Complex, Norway: the concluding act of early Paleoproterozoic continental breakup. *Precambr. Res.* 2006;150:183–200. doi: 10.1016/j.precamres.2006.08.003

Lee C. T. A., Luffi P., Plank T., Dalton H., Leeman W. P. Constraints on the depths and temperatures of basaltic magma generation on Earth and other terrestrial planets using new thermobarometers for mafic magmas. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009;1–2(279):20–33. doi: 10.1016/j.epsl.2008.12.020

Puchtel I. S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R. J., Brandon A. D., Nicklas R. W., Kulikov V. S., Samsonov A. V. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean-Proterozoic boundary: evidence from 2.4 Ga komatiites. *Geochim*. *Cosmochim. Acta.* 2016;180:227–255. doi: 10.1016/j.gca.2016.02.027

Putirka K. Thermometers and barometers for volcanic systems. *Rev. Mineral*. *Geochem*. 2008;69:61–120. doi: 10.2138/rmg.2008.69.3

Salnikova E. B., Samsonov A. V., Stepanova A. V., Veselovskiy R. V., Egorova S. V., Arzamastsev A. A., Erofeeva K. G. Fragments of Paleoproterozoic large igneous provinces in Northern Fennoscandia: baddeleyite U–Pb age data for mafic dykes and sills. *Dokl*. *Earth Sci.* 2020;491:227–230. doi: 10.1134/S1028334X20040145

Salnikova E. B., Stepanova A. V., Azimov P. Y., Sukhanova M. A., Kotov A. B., Egorova S. V., Plotkina Yu. V., Tolmacheva E. V., Kervinen A. V., Rodionov N. V., Stepanov V. S. A history of coronitic metagabbronorites in the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: U-Pb (CA-ID-TIMS) dating of zircon–baddeleyite aggregates. *Petrology*. 2022;30: 567–590. doi: 10.1134/S0869591122060066

Sobolev A. V., Hofmann A. W., Kuzmin D. V., Yaxley G. M., Arndt N. T., Chung S.-L., Danyushevsky L. V., Elliott T., Frey F. A., Garcia M. O., Gurenko A. A., Kamenetsky V. S., Kerr A. C., Krivolutskaya N. A., Matvienkov V. V., Nikogosian I. K., Rocholl A., Sigurdsson I. A., Sushchevskaya N. M., Teklay M. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science*. 2007;316(5823):412–417. doi: 10.1126/science.1138113

Stepanova A. V., Sal'nikova E. B., Samsonov A. V., Larionova Yu. O., Egorova S. V., Savatenkov V. M. The 2405 Ma doleritic dykes in the Karelian Craton: a fragment of a Paleoproterozoic large igneous province. *Doklady Earth Sciences*. 2017;472(2):72–77. doi: 10.1134/S1028334X17010196

Vuollo J., Huhma H. Paleoproterozoic mafic dikes in NE Finland. *The Precambrian geology of Finland – key to the evolution of the Fennoscandian Shield. Developments in Precambrian geology 14*. Amsterdam: Elsevier; 2005. P. 195–236.

Wang X., Hou T., Wang M., Zhang C., Zhang Z., Pan R., Marxer F., Zhang H. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems. *Eur. J. Mineral.* 2021;33(5):621–637. doi: 10.5194/ejm-33-621-2021

Поступила в редакцию / received: 28.07.2025; принята к публикации / accepted: 02.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Егорова Светлана Валерьевна
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: zumlic@mail.ru

Степанова Александра Владимировна
канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: stepanov@krc.karelia.ru

Ерофеева Ксения Геннадьевна
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: xenin.erofeeva@ya.ru

CONTRIBUTORS:

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

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

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

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 69–73
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 69–73
DOI: 10.17076/geo2179

УДК 551.242 : 553.06 (470.22)

МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ И РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОЙ СТРУКТУРЫ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

В. И. Иващенко

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

Современное строение Ладожской структуры (ЛС) является результатом длительного развития (2,1–1,3 млрд лет), включавшего континентальный и окраинно-океанский рифтогенез с раскрытием Свекофеннского океана и последующим конвергентным взаимодействием новообразованной океанической коры с архейским кратоном. Завершилось геологическое развитие структуры внутриплитным дискретным магматизмом (Салминский батолит, Валаамский силл, Хопунваарский некк) и локально (Вялимяки, Иокиранта, Алатту-Пякюля) проявлением каледонской эндогенной активизации. Рудоносность ЛС определяется двумя группами металлогенических систем (МС), развивавшихся в свекофеннский (2,1–1,65 млрд лет) и готский (1,65–1,20 млрд лет) тектоно-магматические циклы (ТМЦ). Всего выделяется 7 МС, связанных с соответствующим числом литогеодинамических комплексов и 15 рудообразующих систем. Самой ранней свекофеннской МС является континентально-рифтогенная в краевой части Карельского кратона – черные сланцы и базальты с V, Mo, Pd, Au. В условиях активной континентальной окраины проявлен раннеорогенный магматизм, сопровождающийся Cu-Ni-Pt-Pd-Au-Sc (Кааламо) и Fe-Ti-V (Вялимяки) оруденением. Коллизионная МС представлена скарноидами с W, Pb, Zn в обрамлениях гнейсогранитных куполов и низкотемпературными рудоносными (Au, Ag As, Sb, Te, Bi, Pd, Pt) метасоматитами в сдвиговых зонах (Алатту-Пякюля, Янис, Кааламо). Рудопродуктивность постколлизионной МС определялась внедрением шошонитовых интрузий (Элисенваара: P, La, Ce) и лейкогранитов (Латвасюрья: W, Pb, Zn, Be, Bi; Иокиранта: Li, Ta, Nb). Главная МС Готского ТМЦ в Приладожье континентально-рифтогенная в связи с анортозит-рапакивигранитным комплексом характеризуется наиболее широким рудным (Sn, Zn, In, Be, Cu, Fe, Ag, Au, Pt, Ta, Nb, Li, REE, Ti, P, флюорит, графит) спектром. МС структурно-формационного несогласия представлена месторождением урана Карку. К МС приразломных метасоматитов относятся урановое месторождение Мраморная горка и несколько проявлений с U-Pb-Zn-(±As, Au)-оруденением в Рускеальско-Салминской тектонической зоне. Наиболее перспективными в Ладожской структуре являются три МС – активной континентальной окраины (Pt, Pd, Au, As), коллизионная (Pt, Pd, Au, As) и континентально-рифтогенная (Sn, Zn, In, Be, Nb).

Ключевые слова: металлогеническая система; рудообразующая система; литогеодинамический комплекс; Ладожская структура; Фенноскандинавский щит

Для цитирования: Иващенко В. И. Металлогенические и рудообразующие системы Ладожской структуры Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 69–73. doi: 10.17076/geo2179

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

V. I. Ivashchenko. METALLOGENIC AND ORE-FORMING SYSTEMS OF THE LADOGA STRUCTURE OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD

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

The modern structure of the Ladoga structure (LS) is the result of long-term development (2.1–1.3 Ga), including continental and marginal-oceanic rifting with the opening of the Svecofennian Ocean and subsequent convergent interaction of the newly formed oceanic crust with an Archean craton. The geological development of the structure ended with intraplate discrete magmatism (Salma batholith, Valaam sill, Khopunvaar neck) and locally (Välimäki, Iokiranta, Alattu-Päkülä) with Caledonian endogenous activation. The ore-bearing capacity of the structure is underpinned by two groups of metallogenic systems (MS) which developed during the Svecofennian (2.1–1.65 Ga) and Gothian (1.65–1.2 Ga) tectonic-magmatic cycles (TMC). In total, seven MSs are distinguished, associated with the corresponding number of lithogeodynamic complexes and 15 ore-forming systems. Of these, the most promising are three MSs – active continental margin (Pt, Pd, Au, As), collisional (Pt, Pd, Au, As, W), and continental-riftogenic (Sn, Zn, In, Be, Nb). The continental-rift-related system at the Karelian Craton margin (black shales and basalts with V, Mo, Pd and Au) is the earliest Svecofennian MS. Early orogenic magmatism, accompanied by Cu-Ni-Pt-Pd-Au-Sc (Kaalamo) and Fe-Ti-V (Välimäki) mineralization, occurred in an active continental margin environment. The collisional MS consists of skarnoids with W, Pb, Zn at the margins of gneissose granite domes and low-temperature ore-bearing (Au, Ag As, Sb, Te, Bi, Pd and Pt) metasomatic rocks in shear zones (Alattu-Päkülä, Janis, Kaalamo). The ore productivity of the post-collisional MS was controlled by the emplacement of shoshonite intrusions (Elisenvaara: P, La, Ce) and leycogranites (Latvasurja: W, Pb, Zn, Be, Bi; Iokiranta: Li, Ta and Nb). The main MS of the Gothian TMC in the Lake Ladoga area is continental-rift-related, linked with an anorthosite-rapakivi granite complex, and displaying a wider ore spectrum (Sn, Zn, In, Be, Cu, Fe, Ag, Au, Pt, Ta, Nb, Li, REE, Ti, P, fluorite and graphite) (Pitkäranta). The metallogenic structural-formational unconformity system is represented by the Karku uranium deposit. The metallogenic near-fault metasomatic rock system comprises the Mramornaya Gorka uranium deposit and several occurrences with U-Pb-Zn-(±As, Au) mineralization in the Ruskeala-Salmi tectonic zone. Three MSs hold the greatest promise within the Ladoga structure – the active continental margin MS (Pt, Pd, Au, As), collisional MS (Pt, Pd, Au, As, W), and continental-riftogenic MS (Sn, Zn, In, Be, Nb).

Keywords: metallogenic system; ore-forming system; lithogeodynamic complex; Ladoga structure; Fennoscandian Shield

For citation: Ivashchenko V. I. Metallogenic and ore-forming systems of the Ladoga structure of the Fennoscandian Shield. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 69–73. doi: 10.17076/geo2179

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

Современное строение Ладожской структуры (ЛС) является результатом длительного развития (2,1–1,3 млрд лет), включавшего континентальный и окраинно-океанский рифтогенез с раскрытием свекофеннского океана и последующим конвергентным взаимодействием новообразованной океанической коры с архейским кратоном [Nironen, 1997]. Соответственно, образование структурно-вещественных комплексов происходило при этом в несколько этапов, завершившихся закрытием океана с формированием аккреционно-коллизионного орогена, постколлизионным аплифтом, кратонизацией и

внутриплитным дискретным магматизмом (Салминский батолит, Валаамский силл, Хопунваарский некк) и локально (Вялимяки, Иокиранта, Алатту-Пякюля) проявлением каледонской эндогенной активизации [Виноградов и др., 1959; Балтыбаев и др., 2021]. В последние годы [Lahtinen et al., 2011 и др.] обосновывается более сложная модель формирования Свекофеннского орогена, частью которого является ЛС, в ходе пяти частично перекрывающихся во времени орогений, включавших континентальный рифтинг, микроконтинентальную аккрецию, расширение аккретированной коры и столкновение континентов.

С этих позиций рудоносность ЛС определяется двумя группами металлогенических систем (МС), развивавшихся в свекофеннский (2,1–1,65 млрд лет) и готский (1,65–1,20 млрд лет) тектоно-магматические циклы (ТМЦ) (табл.). В соответствии с представлениями [Митчелл, Гарсон, 1984; Deng et al., 2011, 2020; Lahtinen et al., 2011; Yusheng et al., 2013; Huston et al., 2016 и др.] о тесной взаимосвязи геодинамических и рудообразующих процессов и различных типов месторождений с определенными литогеодинамическими комплексами (ЛГДК) совокупность рудообразующих факторов и рудных объектов, связанных с ними, понимается как МС. В этом аспекте ЛГДК с их геохимическими ресурсами представляются как рудоформирующий базис МС, определяющий их рудный потенциал. МС может включать одну или несколько рудообразующих систем (РС). РС – это генерируемая эндогенными процессами в определенном временном интервале и единая общностью геологического пространства, источников энергии и рудного вещества закономерная ассоциация магматических, метаморфо-метасоматических, флюидных и структурно-вещественных факторов, приводящих при благоприятных условиях к формированию оруденения. Каждой рудообразующей системе, как единой целостной с определенной устойчивостью структуре, свойственны специфические составляющие элементы, типы их связей, пространственно-временные соотношения и свои особенности развития. Она характеризуется наличием градиентного теплового поля, благоприятной среды и рудоносного флюида.

Большинство рудных объектов ЛС размещены в Раахе-Ладожской надсубдукционной зоне, имеющей коллажированное строение, отражающее совокупный результат проявления всех геологических процессов в этой структуре.

Свекофеннский ТМЦ (2,1–1,65 млрд лет). Самой ранней МС Ладожской структуры является континентально-рифтогенная, связанная с черносланцево-базальтовым ЛГДК, развитым в краевой части Карельского кратона и содержащим комплексное (графит, V, Mo, Pd, Au) стратиформное оруденение (Леппясюрья, Ковадъярви) с повышенным содержанием V (0,2 %), Mo (0,03 %), Ag (до 70 г/т), Au (до 0,3 г/т), ∑Pd,Pt (до 1,5 г/т), Sc (до 200 г/т). Биотит содержит ~ 1 % V.

С МС активной континентальной окраины в связи с тоналит-ультрамафит-мафитовым плутоническим ЛГДК образованы Fe-Ti-V-месторождение (Вялимяки, ∑Pt,Pd,Au до 1 г/т), Cu-Ni-Pt-Pd-Au-Sc-проявления (Кааламский интрузив, ∑Pt,Pd,Au 0,1–0,6 г/т, Sc 70–110 г/т) и Mo-W-As-Au-оруденение порфирового типа (интрузии Алатту-Пякюля, Янис; Au до 1,5 г/т) с «невидимым» золотом в арсенопирите.

Коллизионная МС проявлена формированием скарноидов с W-Pb-Zn-оруденением в обрамлении гнейсогранитных куполов и сдвиговых зон с рудоносными (Au, Ag As, Sb, Te, Bi, Pd, Pt) метасоматитами в тоналитах, метапироксенитах и горнблендитах Кааламского комплекса, метабазальтах сортавальской и турбидитах ладожской серий. При этом содержание ∑Pt,Pd,Au в амфиболовых метасоматитах Кааламского интрузива возрастает до > 10 г/т, а самородного золота в березитах Алатту-Пякюля – до 33 г/т.

Рудопродуктивность постколлизионной МС определялась внедрением лейкогранитов, сопровождавшихся редкометалльными (Li, Ta, Nb) пегматитами и скарнами (W, Be) на севере ЛС, и интрузий шошонитовой серии (Элинсенваара) с субэкономическими содержаниями REE и фосфора в ее юго-западной части.

Готский ТМЦ (1,65–1,2 млрд лет). Континентально-рифтогенная МС в связи с анортозит-рапакивигранитным комплексом характеризуется наиболее широким рудным (Sn, Zn, In, Be, Cu, Fe, Ag, Au, Pt, Ta, Nb, Li, REE, Ti, P, флюорит, графит) спектром и высоким рудным потенциалом. Наряду с традиционными для этой системы ранее уже добывавшимися полезными ископаемыми (Fe, Cu, Sn, Ag) она имеет промышленные перспективы на In, Zn, Ta, Nb, Li, REE, Be, Ti, V, флюорит и графит.

МС структурно-формационного несогласия представлена месторождением урана Карку, расположенным в периферийной части рифейского Ладожского прогиба, входящего в Финско-Ботническо-Балтийскую рифтовую систему.

Главные металлогенические и рудообразующие системы Ладожской структуры
Major metallogenic and ore-forming systems of the Ladoga structure

ТМЦ TMC	Металлогеническая система (возраст) Metallogenic system (age)	Литогеодинамический комплекс Lithogeodynamic complex	Рудообразующая система Ore-forming system	Рудные объекты Ore objects
Готский Gothic	Тектоногенная – приразломных метасоматитов (<1,25 млрд лет) Tectonic – fault metasomatites (<1.25 Ga)	Пропилитовый в сдвиговых зонах по амфиболитам и доломитам Propylitic in shear zones on amphibolites and dolomites	Гидротермально-метасоматическая Hydrothermal-metasomatic	U, Pb, Zn, Au, P Мраморная горка, Варалахти, Путролампи Mramornaya Gorka, Varalakhti, Putrolampi
	Структурно-формационного несогласия (1,4–0,4 млрд лет) Structural-formational disagreement (1.4–0.4 Ga)	Терригенно-базальтовый Terrigenous-basaltic	Гидротермально-метасоматическая инфильтрационная Hydrothermal-metasomatic infiltration	U, Mo, Pd Карку Karku
	Континентально-рифтогенная (1,54–1,48 млрд лет) Continental riftogenic (1.54–1.48 Ga)	Анортозит-рапакивигранитный Anorthosite-rapakivi granite	Скарново-грейзеновая Skarn-greisen	Sn, Zn, In, Be, Ag, Au Питкяранта Pitkyaranta
			Li-F-гранитов Li-F granites	Ta, Nb, Li, REE Мюзилампи, Хепаоя Myuzilampi, Khepaoya
			Магматическая габбро-анортозитовая Magmatic gabbro-anorthosite	Ti, Fe, P Вагозерское, Железная гора Vagozerskoe, Zheleznaya Gora
Свекофеннский Svecofennian	Постколлизионная (1,8–1,78 млрд лет) Post-collision (1.8–1.78 Ga)	Лейкогранит-шошонитовый Leucogranite-shoshonite	Скарновая Skarn	W, Pb, Zn, Be, Mo, Bi Латвасюрья, Яккима Latvasyur'ya, Yakkima
			Пегматитовая Pegmatite	Li, Ta, Nb Иокиранта Iokiranta
			Магматическая шошонитовая Magmatic shoshonite	P, Ce, La Элисенваара Elisenvaara
	Коллизионная (1,87–1,83 млрд лет) Collision (1.87–1.83 Ga)	Тектоно-метасоматический Tectonic-metasomatic	Скарноидная Scarnoid	Pb, Zn, Cu, W Рюттю, Иокиранта Ryuttyu, Iokiranta
			Пропилит-березитовая орогенная Propylite-berezite orogenic	Au, Ag, As,Sb, Te, Bi Алатту-Пякюля, Янис Alattu-Pyakyulya, Yanis
			Метасоматическая амфиболитовая Metasomatic amphibolite	Pd, Pt, Au, Bi Кааламский комплекс Kaalamskii kompleks
	Активной континентальной окраины (1,89–1,88 млрд лет) Active continental margin (1.89–1.88 Ga)	Тоналит-ультрамафит-мафитовый вулкано-плутонический Tonalite-ultramafic-mafic volcano-plutonic	Порфировая Porphyry	Mo, As, Au, W Алатту-Пякюля, Янис Alattu-Pyakyulya, Yanis
			Магматическая горнблендитовая Magmatic hornblendite	Pd, Pt, Au, Cu, Ni Кааламский комплекс Kaalamskii kompleks
			Магматическая пироксенитовая Magmatic pyroxenite	Fe, Ti, V Вялимяки Vyalimyaki
	Континентально-рифтогенная (2,1–1,92 млрд лет) Continental riftogenic (2.1–1.92 Ga)	Черносланцево-базальтовый Black schists-basalt	Вулканогенно-осадочная стратиформная Volcanic-sedimentary stratiform	Графит/graphite, V, Mo, Pd, Pt, Au Леппясюрья, Ковадъярви Leppyasyur'ya, Kovad"yarvi

К МС приразломных метасоматитов относятся мелкое урановое месторождение Мраморная горка и несколько проявлений урана (Виссу, Путролампи и др.) в Рускеальско-Салминской тектонической зоне северо-западного простирания.

Из перечисленных МС Приладожья наиболее перспективными являются три МС – активной континентальной окраины (Pt, Pd, Au, As), коллизионная (Pt, Pd, Au, As, W) и континентально-рифтогенная (Sn, Zn, In, Be, Nb).

Литература

Балтыбаев Ш. К., Овчинникова Г. В., Кузнецов А. Б., Васильева И. М., Ризванова Н. Г., Алексеев И. А., Кириллова П. А. Два этапа золотосульфидной минерализации в раннепротерозойских габброидах Северного Приладожья // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66(3). С. 559–577. doi: 10.21638/spbu07.2021.307

Виноградов А. П., Тарасов Л. С., Зыков С. И. Изотопный состав рудных свинцов Балтийского щита // Геохимия. 1959. № 7. С. 577–607.

Митчелл А., Гарсон М. Глобальные тектонические позиции минеральных месторождений. М.: Мир, 1984. 496 с.

Deng J., Wang Q., Xiao C., Yang L., Huan Liu H., Qingjie Gong Q., Zhang J. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China // Int. Geol. Rev. 2010. Vol. 53, no. 5-6. P. 449–476. doi: 10.1080/00206814.2010.501538

Deng J., Yang L.-Q., Groves D. I., Zhang L., Qiu K.-F., Wang Q.-F. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China // Earth-Science Rev. 2020. Vol. 208. Art. 103274. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103274

Huston D. L., Mernagh T. P., Steffen G., Hagemann S. G., Doublier M. P., Fiorentini M., Champion D. C., Jaques A. L., Czarnota K., Cayley R., Skirrow R., Bastrakov E. Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples // Ore Geol. Rev. 2016. Vol. 76. P. 168–210. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.09.005

Lahtinen R., Hölttä P., Kontinen A., Niiranen T., Nironen M., Saalmann K., Sorjonen-Ward P. Tectonic and metallogenic evolution of the Fennoscandian Shield: key questions with emphasis on Finland // Geol. Surv. Fin. Special Paper 49. 2011. P. 23–33.

Nironen M. The Svecofennian Orogen: a tectonic model // Precambr. Res. 1997. Vol. 86, no. 1-2. P. 21–44. doi: 10.1016/S0301-9268(97)00039-9

Yusheng Z., Jun D., Jianping W., Runmin P., Zhenjiang L. Theory of metallogenic systems: principles and applications to mineral exploration // 12th SGA Biennial Meeting. 2013. Vol. 1. P. 40–43.

References

Baltybaev Sh. K., Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Vasil'eva I. M., Rizvanova N. G., Alekseev I. A., Kirillova P. A. Two stages of gold sulfide mineralization in the Early Proterozoic gabbros of the Northern Ladoga region. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Vest. St. Petersburg Univ. Geosciences*. 2021;66(3): 559–577. (In Russ.). doi: 10.21638/spbu07.2021.307

Deng J., Yang L.-Q., Groves D. I., Zhang L., Qiu K.-F., Wang Q.-F. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. *Earth-Science Rev*. 2020;208: 103274. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103274

Deng J., Wang Q., Xiao C., Yang L., Huan Liu H., Qingjie Gong Q., Zhang J. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China. *Int. Geol. Rev.* 2010;53(5-6):449–476. doi: 10.1080/00206814.2010.501538

Huston D. L., Mernagh T. P., Steffen G., Hagemann S. G., Doublier M. P., Fiorentini M., Champion D. C., Jaques A. L., Czarnota K., Cayley R., Skirrow R., Bastrakov E. Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples. *Ore Geol. Rev*. 2016;76: 168–210. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.09.005

Lahtinen R., Hölttä P., Kontinen A., Niiranen T., Nironen M., Saalmann K., Sorjonen-Ward P. Tectonic and metallogenic evolution of the Fennoscandian Shield: key questions with emphasis on Finland. *Geol. Surv. Fin.* 2011; 49:23–33.

Mitchell A., Garson M. Global tectonic positions of mineral deposits. Moscow: Mir; 1984. 496 p. (In Russ.)

Nironen M. The Svecofennian Orogen: a tectonic model. *Precambr. Res.* 1997;86(1-2):21–44. doi: 10.1016/S0301-9268(97)00039-9

Vinogradov A. P., Tarasov L. S., Zykov S. I. Isotopic composition of ore lead in the Baltic Shield. *Geokhimiya = Geochemistry.* 1959;7:577–607. (In Russ.)

Yusheng Z., Jun D., Jianping W., Runmin P., Zhenjiang L. Theory of metallogenic systems: principles and applications to mineral exploration. *12th SGA Biennial Meeting*. 2013;1:40–43.

Поступила в редакцию / received: 31.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
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. 2025. № 5. С. 74–79
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 74–79
DOI: 10.17076/geo2147

УДК 551.72; 551.24.056

ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА РАННЕГО ЭТАПА ЭВОЛЮЦИИ ПАЛЕОАЗИАТСКОГО ОКЕАНА НА ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА

А. А. Крылов*, И. И. Лиханов

*Институт геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090), *krylov@igm.nsc.ru*

Рассмотрены геологические, геохимические и изотопно-геохронологические свидетельства событий на заключительном этапе неопротерозойской истории Енисейского кряжа – от формирования фрагментов океанической коры в регионе и их аккреции к Сибирскому кратону до постаккреционной стадии растяжения коры и начала каледонского орогенеза. На основании анализа новых данных по петрогеохимическому составу, возрасту и геодинамической природе формирования контрастных пород в составе тектонического меланжа Приенисейской региональной сдвиговой зоны установлена хронологическая последовательность событий, маркирующая ранние стадии развития Палеоазиатского океана в зоне его сочленения с Сибирским кратоном. Эти события зафиксированы окраинно-континентальными, офиолитовыми и островодужными геологическими комплексами с различными геохимическими особенностями. Наиболее древние структуры представлены фрагментами океанической коры и островных дуг Исаковского террейна с возрастом 700–620 млн лет. Возраст образованных в зоне палеосубдукции продуктов глаукофансланцевого метаморфизма отвечает интервалу времени 640–620 млн лет. Формирование высокобарических тектонитов в шовной зоне с возрастом около 600 млн лет маркирует этап завершения аккреции Исаковского блока к западной окраине Сибирского кратона. Заключительные события в ранней истории палеоокеана были связаны с образованием поздневендских рифтогенных миндалекаменных базальтов (572 ± 6,5 млн лет) и внедрением постколлизионных лейкогранитов Осиновского массива (550–540 млн лет), прорывающих ранние фрагменты океанической коры Исаковского террейна. Полученные данные позволяют уточнить стратиграфическую схему позднего докембрия на северо-западе заангарской части Енисейского кряжа и особенности эволюции Саяно-Енисейского аккреционного пояса. Установленные поздненеопротерозойские рубежи эволюции Исаковского террейна сопоставляются с заключительной фазой распада Родинии, отчленением Сибирского кратона и раскрытием Палеоазиатского океана.

Ключевые слова: тектонические обстановки; геодинамическая модель; Исаковский террейн; Енисейский кряж; Палеоазиатский океан

Для цитирования: Крылов А. А., Лиханов И. И. Петролого-геохимические и геохронологические свидетельства раннего этапа эволюции палеоазиатского океана на западной окраине Сибирского кратона // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 74–79. doi: 10.17076/geo2147

Финансирование. Работа выполнена за счет средств гранта РНФ (проект № 21-77-20018-П).

A. A. Krylov*, I. I. Likhanov. EARLY STAGES OF THE PALEO-ASIAN OCEAN EVOLUTION AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON: PETROLOGICAL, GEOCHEMICAL AND GEOCHRONOLOGICAL EVIDENCE

*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptyug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia), *krylov@igm.nsc.ru*

The paper explores the geological, geochemical, and isotope-geochronological evidence of the events at the final stage of the Neoproterozoic history of the Yenisei Range (starting from the formation of oceanic crust fragments in the region and their accretion to the Siberian Craton until the post-accretionary stage of crustal tension and onset of the Caledonian orogeny). Having analyzed new data on the petro-geochemical composition, age, and geodynamic nature of the formation of contrasting rocks composing the tectonic mélange of the Near-Yenisei (Prieniseiskaya) regional shear zone, we discovered a chronological sequence of events that marks the early stages of the Paleo-Asian Ocean evolution at its junction with the Siberian Craton. These events are documented by the continental marginal, ophiolitic, and island-arc geological complexes, each of which has different geochemical features. The most ancient structures are represented by fragments of the oceanic crust and island arcs from the Isakovka terrane (700–620 Ma). The age of the glaucophane-schist metamorphic units that formed in the paleosubduction zone corresponds to the time interval of 640–620 Ma. The formation of high-pressure tectonites in the suture zone, about 600 Ma BP, marks the final stage of the Isakovka block accretion to the western margin of the Siberian Craton. The final events in the early history of the Asian Paleo-ocean were related to the formation of Late Vendian riftogenic amygdaloidal basalts (572 ± 6.5 Ma) and intrusion of post-collisional leucogranites of the Osinovka massif (550–540 Ma), which cut through the earlier oceanic crust fragments in the Isakovka terrane. These data allow us to refine the Late Precambrian stratigraphic scheme in the northwestern Trans-Angarian part of the Yenisei Range and the evolutionary features of the Sayan–Yenisei accretionary belt. The revealed Late Neoproterozoic landmarks of the evolution of the Isakovka terrane are attributed to the terminal phase of the breakup of Rodinia, separation of the Siberian Craton, and opening of the Paleo-Asian Ocean.

Keywords: tectonic environments; geodynamic model; Isakovka terrane; Yenisei Range; Paleo-Asian Ocean

For citation: Krylov A. A., Likhanov I. I. Early stages of the Paleo-Asian ocean evolution at the western margin of the Siberian Craton: petrological, geochemical and geochronological evidence. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 74–79. doi: 10.17076/geo2147

Funding. The study was funded by a Russian Science Foundation grant (project #21-77-20018-П).

Современная западная окраина Сибирского кратона представлена раннедокембрийским выступом фундамента (Ангаро-Канский блок) и мезонеопротерозойской окраинно-континентальной складчатой областью Енисейского кряжа. Докембрийские террейны (Исаковский и Предивинский), образованные преимущественно тектонизированными фрагментами офиолитов и островодужных комплексов, аккретированы к окраине Сибирского кратона в венде [Лиханов и др., 2021]. Это аккреционно-коллизионное событие привело к формированию протяженного Енисей-Саяно-Байкальского складчатого пояса (ЕСБП) и существенному наращиванию континентальной коры кратона [Добрецов, 2003]. Предполагается, что такие процессы в неопротерозойской истории этого региона могли быть связаны со становлением Палеоазиатского океана (ПАО) [Ярмолюк и др., 2006]. Согласно современным представлениям, ПАО образовался между Северо-Американским и Сибирским кратонами в результате распада суперконтинента Родиния в период от 1000–900 до 720 млн лет назад и существовал до конца палеозоя [Cawood et al., 2016]. ПАО понимается как система разновозрастных структур, которые сформировались в пределах океанической литосферы и затем в ходе

последующих эпох тектогенеза причленялись к Сибирскому кратону [Reverdatto et al., 2019]. Этот этап отчетливо проявлен в узкой полосе вдоль современных западной и южной окраин Сибирского кратона. Данные события зафиксированы окраинно-континентальными, офиолитовыми и островодужными ассоциациями пород разного возраста и разной тектонической природы в составе докембрийских террейнов [Лиханов и др., 2018].

Вопросы связи этих террейнов с развитием ПАО и их последующей аккреции к Сибирскому кратону во многом еще далеки от окончательного решения, что повышает интерес к особенностям развития аккреционно-субдукционных структур в зонах перехода палеоокеан-континент. Это определяется дефицитом геохимических данных и возрастных датировок для геологических комплексов разной тектонической природы, вовлеченных в процессы формирования конвергентных границ, что существенно ограничивает возможности временных корреляций эволюции ПАО с глобальными геологическими процессами. В статье эти вопросы обсуждаются в связи с проблемой выделения основных рубежей в истории развития палеоокеана на западе Сибирского кратона на основе результатов современных геохимических и геохронологических исследований контрастных по составу пород из тектонического меланжа Приенисейской региональной сдвиговой зоны.

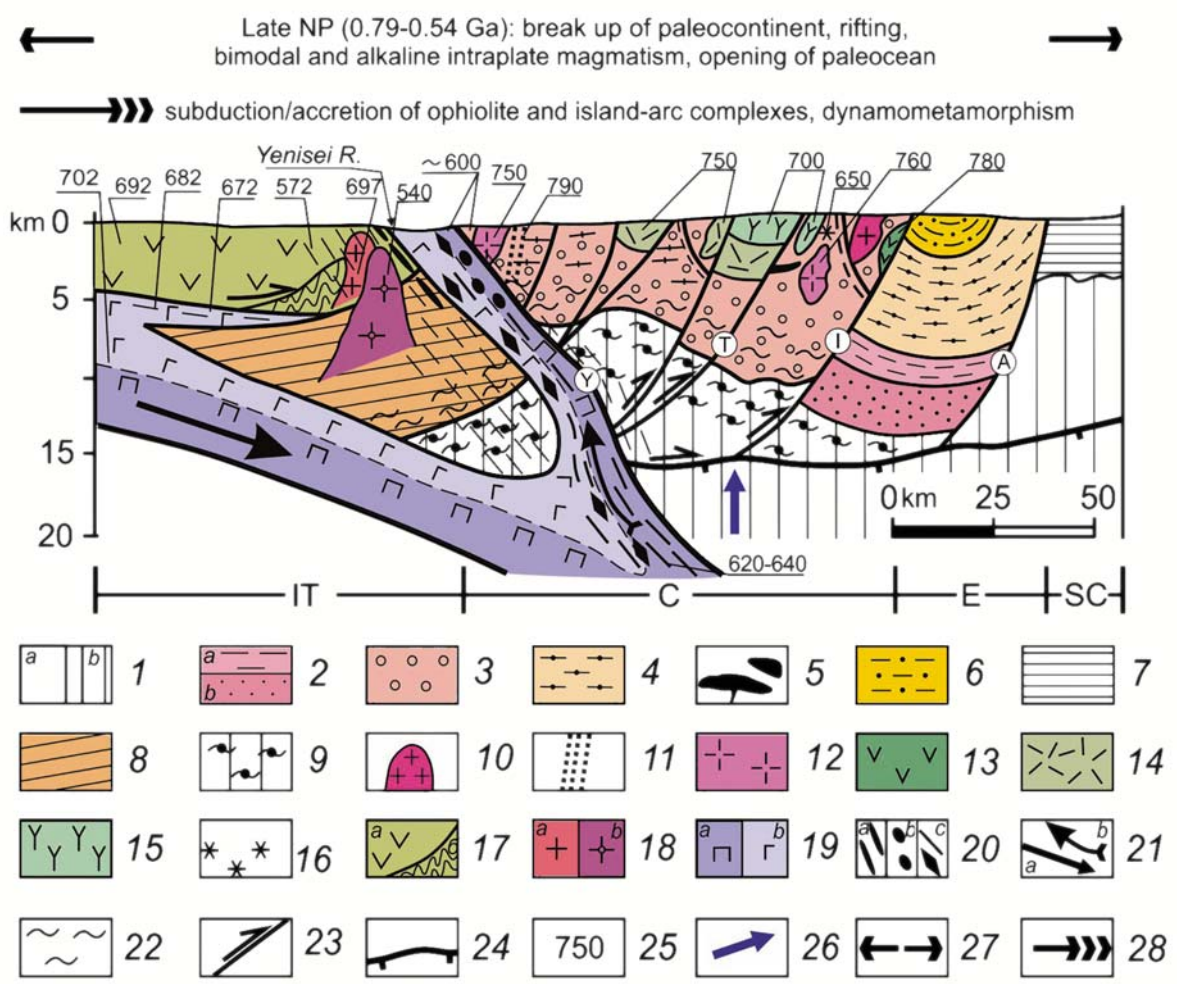
Анализ новых данных о развитии земной коры в регионе позволяет сформулировать следующие выводы, имеющие существенный геодинамический интерес. В последовательности геологических событий Енисейского кряжа изученные проявления основного магматизма и продукты их метаморфизма могли отражать различные этапы эволюции океанической коры.

Совокупность имеющихся датировок цирконов по магматическим комплексам Исаковского террейна в Заангарье Енисейского кряжа совместно с датировками вулканитов Предивинского террейна, расположенного на юге Енисейского кряжа, указывают на формирование офиолитов и островных дуг Приенисейской зоны в интервале 700–640 млн лет.

В конце неопротерозоя в диапазоне времени от 640 до 600 млн лет океаническая литосфера, фрагментом которой являлись базиты Исаковского террейна, субдуцировала под активную окраину Сибирского континента. Об этом же свидетельствует обнаружение в регионе эксгумированных блоков с проявлениями глаукофансланцевого метаморфизма – метаморфизованных членов офиолитовых разрезов – формирующихся в зоне палеосубдукции и являющихся ее прямым индикатором. Эти породы, локализованные в тектоническом шве на границе кратона с островодужно-океаническим Исаковским террейном, испытали два этапа метаморфизма. Петрогеохимические характеристики мафических тектонитов свидетельствуют о том, что их протолитами являлись базальты типа N-MORB и E-MORB. Образование более примитивных по химическому составу N-MORB-базальтов происходило на начальных этапах спрединга, когда плавлению подвергались верхние горизонты деплетированной мантии. Более высокотитанистые базальты образовались как продукты плавления обогащенного мантийного субстрата на более поздних этапах спрединга. U-Pb-возраст цирконов 701,6 ± 8,4 млн лет из метаморфизованных аналогов нормальных базальтов отвечает времени начала формирования океанической коры в регионе. Возраст глаукофансланцевого метаморфизма может отвечать интервалу от 640 до 620 млн лет. Это согласуется со временем формирования ряда высокобарических продуктов процессов субдукции (например, в Куртушибинском глаукофансланцевом и Северомуйском эклогитовом комплексах) в Центрально-Азиатском подвижном поясе [Лиханов и др., 2021].

На постсубдукционном этапе при эксгумации глаукофансланцевые породы попадали в Приенисейскую сдвиговую зону, где подвергались интенсивным деформациям с полной перекристаллизацией субстрата и образованием новых высокобарических минеральных парагенезисов. Формирование высокобарических тектонитов в шовной зоне с возрастом около 600 млн лет маркирует заключительный этап неопротерозойской истории Енисейского кряжа, связанный с завершением аккреции Исаковского блока к западной окраине Сибирского кратона [Likhanov et al., 2018]. Завершающие события в ранней истории палеоокеана были связаны с образованием поздневендских рифтогенных миндалекаменных базальтов (572 ± 6,5 млн лет) и внедрением лейкогранитов Осиновского массива (550–540 млн лет), прорывающих ранние фрагменты океанической коры Исаковского террейна (рис.) [Лиханов и др., 2018].

Эти события имеют важное геодинамическое значение. Они фиксируют один из ранних этапов развития ПАО, начавшийся с момента его заложения и завершившийся в конце неопротерозоя байкальским орогенезом вдоль современной западной и южной окраин Сибирского континента (Енисейский кряж, Байкало-Патомское нагорье и Забайкалье).



Геодинамическая модель поздненеопротерозойской (0,79–0,54 млрд лет) эволюции северо-западной части Енисейского кряжа. Блоки: Ц – Центральный, В – Восточный, ИТ – Исаковский террейн; СК – Сибирский кратон.

1 – литосфера: *a* – океаническая, *b* – исходная кора; *2–6* – рифтогенно-депрессионные толщи (PP) и (MP): *2* – гаревский комплекс: *a* – тейская, *b* – малогаревская и немтихинская толщи (PP); *3* – (PP) и (MP) нерасчлененные; *4* – сухопитская серия (MP); *5* – метавулканиты (MP); *6* – тунгусикская серия (NP); *7* – (MP) и (NP) нерасчлененные; *8* – (PP-NP) нерасчлененные; *9* – кора мигматизированная; *10* – гранодиориты (NP_1); *11* – бимодальные дайки; *12* – граниты (NP_2); *13–16* – рифтогенные ассоциации (NP_3): *13* – плагиориолит-базальтовая, *14* – риолит-базальтовая, *15* – трахибазальт-трахитовая, *16* – щелочно-ультраосновная; *17–20* – Исаковский террейн (NP_3): *17* – породные комплексы: *a* – вулканиты, *b* – осадки, *18* – граниты: *a* – островодужные, *b* – постколлизионные, *19* – офиолиты: *a* – дуниты, перидотиты, *b* – метагаббро и метабазальты, *20* – тектонические элементы: *a* – протрузии, *b* – меланж, *c* – метабазиты; *21* – движение океанической коры: *a* – погружение, *b* – эксгумация; *22* – зоны растяжения; *23* – надвиги и сдвиги; *24* – зоны срывов; *25* – возраст, млн лет; *26* – направление теплового потока и движения вещества из глубинных зон; *27, 28* – тектонические обстановки: *27* – растяжения земной коры, *28* – аккреционно-субдукционные

Scheme of geodynamic events during the Late Neoproterozoic (0.79–0.54 Ga ago) evolution of the north-western Yenisei Ridge. Letters denote the blocks: C – Central, E – Eastern, IT – Isakovka terrane, SC – Siberian Craton.

1 – lithosphere: *a* – oceanic, *b* – initial crust; *2–6* – riftogenic-depressional strata (PP) and (MP): *2* – Garevka complex: *a* – Teya stratum, *b* – Malogarevskaya and Nemtikha strata (PP); *3* – undifferentiated (PP) and (MP); *4* – Sukhopitskaya (Sukhoi Pit) Series (MP); *5* – metavolcanic rocks (MP); *6* – Tungusik Series (NP); *7* – undifferentiated (MP) and (NP); *8* – undifferentiated (PP–NP); *9* – migmatized crust; *10* – granodiorites (NP1); *11* – bimodal dikes; *12* – granites (NP_2); *13–16* – riftogenic coplexes (NP_3): *13* – plagirhyolite-basaltic, *14* – rhyolite-basaltic, *15* – trachybasalt-trachytic, *16* – alkaline-ultramafic; *17–20* – Isakovka terrane (NP_3): *17* – rock complexes: *a* – arc volcanites, *b* – sediments, *18* – granites: *a* – arc, *b* – postcollisional, *19* – ophiolites: *a* – dunites and peridotites, *b* – metagabbros and metabasalts, *20* – tectonic elements: *a* – protrusions, *b* – melange, *c* – metabasites; *21* – movement of oceanic crust: *a* – sinking, *b* – exhumation; *22* – extension zones; *23* – thrusts and strike-slips with slip directions; *24* – detachment zones; *25* – age, Ma; *26* – direction of thermal flow and material motion from interior zones; *27, 28* – tectonic settings: *27* – crustal tension, *28* – accretionary-subduction

Установленные поздненеопротерозойские рубежи эволюции Исаковского террейна хорошо согласуются с данными по эволюции ПАО в южном сегменте ЕСБП, опирающимися на датировки детритовых цирконов пород складчатого обрамления юга Сибирского кратона [Cawood et al., 2016; Gladkochub et al., 2019]. В глобальном масштабе эти этапы сопоставляются с заключительной фазой распада Родинии, фиксирующей отчленение Сибирского кратона от Лаврентии и раскрытие ПАО с последующими процессами субдукции, аккреции и динамометаморфизма [Kontorovich et al., 1997; Likhanov, Santosh, 2004; Лиханов и др., 2011; Likhanov et al., 2019; Likhanov, 2022].

Литература

Добрецов Н. Л. Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 1-2. С. 5–27.

Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С., Вершинин А. Е. Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // ДАН. 2011. Т. 436, № 4. С. 509–514.

Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Козлов П. С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. № 1. С. 412–465. doi: 10.31857/S0016853X21010070

Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Савко К. А. Аккреционная тектоника комплексов западной окраины Сибирского кратона // Геотектоника. 2018. № 1. С. 28–51. doi: 10.7868/S0016853X18010022

Ярмолюк В. В., Коваленко В. И., Ковач В. П., Рыцк Е. Ю., Козаков И. К., Котов А. Б., Сальникова Е. Б. Ранние стадии формирования Палео-Азиатского океана: результаты геохронологических, изотопных и геохимических исследований позднерифейских и венд-кембрийских комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса // ДАН. 2006. Т. 410, № 5. С. 657–663.

Cawood P. A., Strachan R. A., Pisarevsky S. A., Gladkochub D. P., Murphy J. B. Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: implications for models of supercontinent cycles // Earth Planet. Sci. Lett. 2016. Vol. 449. P. 118–126. doi: 10.1016/j.epsl.2016.05.049

Gladkochub D. P., Donskaya T. V., Stanevich A. M., Motova Z. L., Mazukabzov A. V., Pisarevsky S. A., Zhang S., Li H. U-Pb detrial zircon geochronology and preovenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in Southern Siberia: new insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean // Gondwana Res. 2019. Vol. 65. P. 1–16. doi: 10.1016/j.gr.2018.07.007

Kontorovich A. E., Khomenko A. V., Burshtein L. M., Likhanov I. I., Pavlov A. L., Staroseltsev V. S., Ten A. A. Intense basic magmatism in the Tunguska petroleum basin, Eastern Siberia, Russia // Pet. Geosci. 1997. Vol. 3, pt. 4. P. 359–369. doi: 10.1144/petgeo.3.4.359

Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. Vol. 12, no. 11. Art. 402. doi: 10.3390/geosciences12110402

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambr. Res. 2019. Vol. 328. P. 128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia // J. Metamorph. Geol. 2004. Vol. 22. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // Lithos. 2018. Vol. 304–307. P. 468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer; 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

References

Cawood P. A., Strachan R. A., Pisarevsky S. A., Gladkochub D. P., Murphy J. B. Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: implications for models of supercontinent cycles. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016;449:118–126. doi: 10.1016/j.epsl.2016.05.049

Dobretsov N. L. Evolution of structures of the Urals, Kazakhstan, Tien Shan, and Altai-Sayan region within the Ural-Mongolian Fold Belt (Paleo-Asian Ocean). *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics.* 2003;44 (1-2):5–27. (In Russ.)

Gladkochub D. P., Donskaya T. V., Stanevich A. M., Motova Z. L., Mazukabzov A. V., Pisarevsky S. A., Zhang S., Li H. U-Pb detrial zircon geochronology and preovenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in Southern Siberia: new insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Res.* 2019;65:1–16. doi: 10.1016/j.gr.2018.07.007

Kontorovich A. E., Khomenko A. V., Burshtein L. M., Likhanov I. I., Pavlov A. L., Staroseltsev V. S., Ten A. A. Intense basic magmatism in the Tunguska petroleum basin, Eastern Siberia, Russia. *Pet. Geosci.* 1997;3(4): 359–369. doi: 10.1144/petgeo.3.4.359

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Vershinin A. E. The Teya polymetamorphic complex in the Transangarian Yenisei Ridge: an example of metamorphic superimposed zoning of low- and medium-pressure facies series. *Doklady Earth Sciences.* 2011;436(2):213–218. doi: 10.1134/S1028334X11020048

Likhanov I. I., Zinoviev S. V., Kozlov P. S. Blastomylonite complexes of the Western Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia): geological position, metamorphic evolution and geodynamic models. *Geotectonics*. 2021;55(1):36–57. doi: 10.1134/S0016852121010076

Likhanov I. I., Nozhkin A. D., Savko K. A. Accretionary tectonics of rock complexes in the western margin of the Siberian Craton. *Geotektonika = Geotectonics.* 2018;52(1):22–44. doi: 10.1134/S0016852118010107

Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence. *Geosciences (Switzerland)*. 2022;12(11):402. doi: 10.3390/geosciences12110402

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia. *Precambr. Res*. 2019;328:128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia. *J. Metamorph. Geol*. 2004;22(8):743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean. *Lithos.* 2018;304-307:468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer Geology; 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

Yarmolyuk V. V., Kovalenko V. I., Kovach V. P., Rytsk E. Yu., Kozakov I. K., Kotov A. B., Sal'nikova E. B. Early stages of the Paleo-Asian Ocean formation: results of geochronological, isotopic, and geochemical investigations of Late Riphean and Vendian–Cambrian complexes in the Central Asian Foldbelt. *Doklady Earth Sciences.* 2006;411:1184–1189.

Поступила в редакцию / received: 25.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Крылов Александр Александрович
младший научный сотрудник
e-mail: krylov@igm.nsc.ru

Лиханов Игорь Иванович
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: likh@igm.nsc.ru

CONTRIBUTORS:

Krylov, Alexander
Junior Researcher

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

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 80–84
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 80–84
DOI: 10.17076/geo2168

УДК 551.251

ПЕРЕСМОТР ПАРАДИГМЫ «ТРОЙНОЙ ТОЧКИ» Al_2SiO_5

И. И. Лиханов

Институт геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090)

Минералы группы силлиманита (андалузит, силлиманит, кианит), широко развитые в Заангарской части Енисейского кряжа, представляют особый интерес для производства глинозема, силумина и алюминия. С другой стороны, «тройная точка», соответствующая равновесному сосуществованию всех полиморфов Al_2SiO_5, – один из наиболее важных инвариантных узлов в метаморфической петрологии. Минеральные ассоциации с участием полиморфов «тройной точки» информативны для калибровки геотермобарометров, выявления индикаторных изотопных характеристик и ряда других геохимических параметров. На примере ряда метаморфических комплексов высокоглиноземистых метапелитов, характеризующихся присутствием трех полиморфов Al_2SiO_5, приведены геолого-структурные, минералого-петрологические и изотопно-геохронологические свидетельства их полиметаморфической истории. В изученных ореолах наложение более поздних минеральных ассоциаций на ранние в ходе разных геодинамических событий четко фиксируется по реакционным структурам и химической зональности минералов, конфигурации *PT*-трендов и изотопным датировкам. Эти индикаторные признаки свидетельствуют о последовательном росте полиморфов Al_2SiO_5 в результате сложной полиметаморфической истории, обусловленной сменой разных тектонических обстановок. Сравнительный анализ полученных результатов с опубликованными данными по другим регионам мира показал, что во всех изученных случаях минералы Al_2SiO_5 находились в реакционных соотношениях и образовались в разное время, хотя *PT*-тренды полиморфов могли проходить вблизи или непосредственно через «тройную точку». Это позволяет сделать вывод, что минеральная ассоциация «тройной точки» Al_2SiO_5, в которой все три полиморфа находятся в стабильном равновесии, неустойчива в метапелитах любого химического состава. Следовательно, принятое в петрологии использование таких ассоциаций для оценки *PT*-параметров метаморфизма и калибровки геотермобарометров не является корректным.

Ключевые слова: полиморфы Al_2SiO_5; высокоглиноземистые метапелиты; «тройная точка»; полиметаморфизм; Енисейский кряж

Для цитирования: Лиханов И. И. Пересмотр парадигмы «тройной точки» Al_2SiO_5 // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 80–84. doi: 10.17076/geo2168

Финансирование. Работа выполнена за счет средств гранта РНФ (проект № 21-77-20018-П).

I. I. Likhanov. THE “TRIPLE POINT” PARADIGM OF ALUMINOSILICATES REVISITED

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptyug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)

The Al_2SiO_5 polymorphs (andalusite, kyanite, and sillimanite), which are widespread in aluminous metamorphic rocks, are gaining importance as industrial sources for producing aluminum oxide, silumin, and aluminum. On the other hand, the “triple point”, which corresponds to the equilibrium coexistence of all three Al_2SiO_5 polymorphs, is one of the key invariant points in metamorphic petrology. Mineral assemblages with triple-point polymorphs provide reference information for the calibration of geothermobarometers and for identification of isotope indicator features and some other geochemical parameters. The polymetamorphic history of a series of metamorphic complexes of Al-rich metapelites in the Yenisei Range, with rocks containing an Al silicate triple-point assemblage (all three Al_2SiO_5 polymorphs), is illustrated by structural-geological, mineralogical–petrological, and isotope geochronological evidence. In the studied aureoles, overprinting of later mineral assemblages onto earlier ones during various geodynamic events obviously follows from the reaction microtextures and chemical zoning in minerals, the *PT* trajectories of these rocks, as well as radiometric dating. These indicator features show that the Al_2SiO_5 polymorphs grew sequentially as a result of a complex polymetamorphic history due to changes in the tectonic environments. A comparative analysis of the new results and the literature on other metamorphic regions worldwide shows that the Al_2SiO_5 minerals always (at least in the studied rocks) occur in reaction relationships with one another, grew at different time periods during the metamorphic history of the rocks, and hence, cannot be regarded as true triple-point assemblages, although some segments of the looping *PT* paths may pass near the triple point. We conclude that the aluminum silicate triple-point assemblages, in which all three Al_2SiO_5 minerals are in stable equilibrium, are not possible in metapelitic rocks of any chemical composition. Hence, such purported triple-point assemblages cannot represent a stable association and cannot be used to calibrate or test geothermobarometers.

Keywords: Al_2SiO_5 minerals; Al-rich metapelites; triple point; polymetamorphism; Yenisei Range

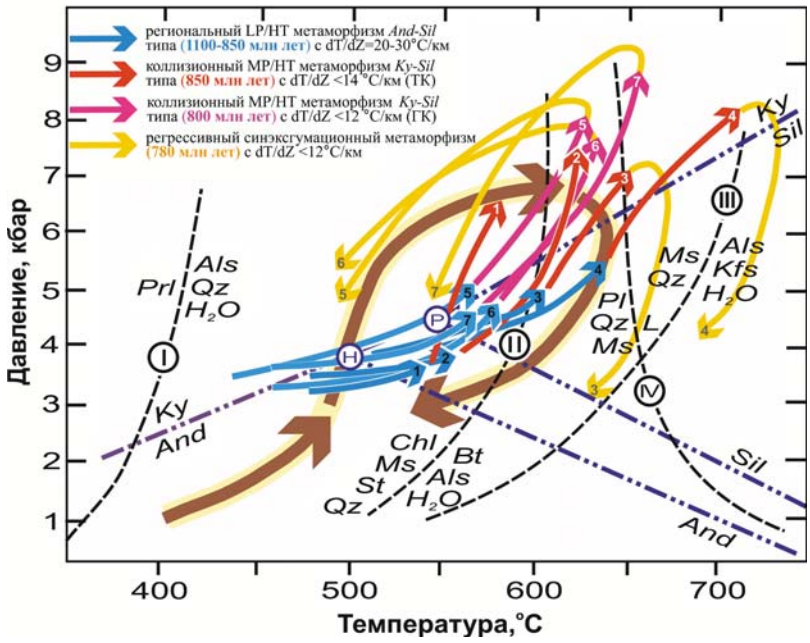
For citation: Likhanov I. I. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited. *Trudy Karel’skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 80–84. doi: 10.17076/geo2168

Funding. The study was funded by a Russian Science Foundation grant (project #21-77-20018-П).

Полиморфные модификации Al_2SiO_5 – кианит, андалузит и силлиманит – важнейшие индикаторы метаморфизма в горных породах. Андалузит устойчив при низких давлениях и температурах; при росте давления он сменяется кианитом, а при повышении температуры они оба замещаются силлиманитом, что приводит к формированию зональных метаморфических комплексов или фациальных серий низких и умеренных давлений. «Тройная точка», соответствующая устойчивому равновесному сосуществованию всех трех полиморфов Al_2SiO_5, – один из наиболее важных инвариантных узлов в метаморфической петрологии. Минеральные ассоциации с участием этих фаз информативны для калибровки геотермобарометров, выявления индикаторных изотопных характеристик и ряда других геохимических параметров [Reverdatto et al., 2019]. В литературе описано несколько проявлений метаморфизма с «тройной точкой», к наиболее известным из которых относятся Белз Бьюитт в Айдахо, Маунт Мусилок в Нью-Гэмпшире и поднятия Рио Мора, Пикурис, Тручас в Нью-Мексико [Likhanov, Santosh, 2020]. Они считались характерными примерами зональных ореолов одноактного метаморфизма, формировавшихся при *PT*-параметрах «тройной точки». Это так называемый «тип Айдахо» [Hietanen, 1967]. Пересмотр этих объектов с применением новейших методов исследований показал, что во всех случаях минералы Al_2SiO_5 образовались в разное время и не могут считаться стабильными одновременно в метапелитах обычного химического состава [Pattison, 2001]. Теоретически благоприятная ситуация для одновременного появления андалузита, силлиманита и кианита возможна только в более редких

в природе высокоглиноземистых составах пород. Нам это представляется недостаточно обоснованным, поскольку речь здесь может идти не об одновременном устойчивом сосуществовании указанных минералов, а об их последовательной смене в процессе эволюции термодинамических условий при полиметаморфизме. Статья посвящена обоснованию этих положений на примере высокоглиноземистых метапелитов Енисейского кряжа, для которых типична ассоциация трех полиморфов Al_2SiO_5.

По химическому составу эти породы классифицируются как низкокальциевые и умеренно насыщенные K_2O метапелиты, одновременно обогащенные железом (Fe_2O_3 до 12 мас. %) и глиноземом (Al_2O_3 до 28 мас. %) [Лиханов и др., 2011]. Полицикличность этих комплексов, выраженная наложением поздних ассоциаций на ранние в ходе разных геодинамических событий, четко диагностируется по реакционным микроструктурам, химической зональности минералов, конфигурации *PT*-трендов и изотопным датировкам [Лиханов и др., 2021; Likhanov, 2022]. По результатам исследований выделены два проградных этапа в их развитии (рис.). На первом этапе сформировались высокоградиентные зональные комплексы низких давлений And-Sil-типа с гренвильским возрастом (~1050–950 млн лет) при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте dT/dH = 25–35 °C/км [Likhanov, 2019]. На втором этапе вблизи надвигов эти породы подверглись неопротерозойскому (с двумя пиками – 850 и 800 млн лет) коллизионному метаморфизму умеренных давлений Ky-Sil-типа, в результате чего происходило прогрессивное замещение And→Ky±Sil [Likhanov et al., 2015]. В последовательности пород Ky-Sil-метаморфизма максимальные значения *PT*-параметров свойственны метапелитам чапского участка (*P* = 5,8–8,4 кбар, *T* = 630–710 °C; *dT/dH* = 12–14 °C/км), характеризующимся повсеместным присутствием силлиманита практически во всех метаморфических зонах. Фибролит обычно появляется только вблизи гранитов (маяконский и тейский участки), что связывается с локальным привносом дополнительного тепла со стороны гранитоидных интрузивов [Likhanov et al., 2004]. Микроструктурные взаимоотношения между полиморфами Al_2SiO_5 свидетельствуют о последовательном росте андалузита, силлиманита, фибролита и кианита при метаморфизме с преобладанием различных схем реакционных замещений между этими минералами [Likhanov, Santosh, 2020].



PT-тренды эволюции метаморфизма для метапелитов тейского (1–4) и гаревского (5–7) комплексов Енисейского кряжа в сравнении с обобщенной *PT*-эволюцией And+Ky+Sil-содержащих пород из других регионов мира (бурая петля)

PT-t diagrams showing the generalized *PT* path calculations for metapelites in the Teya (1–4) and Garevka (5–7) complexes of the Yenisei Ridge in comparison with the *PT* evolution of rocks containing the And+Ky+Sil assemblages in other metamorphic complexes worldwide (brown loop)

Секущий характер наложенных изоград в изученных зональных ореолах, специфика распределения главных и редких химических элементов в зональных минералах, а также видимые различия в структурно-текстурных особенностях, *PT*-условиях формирования, величинах метаморфических градиентов и изотопных датировках разных типов метаморфизма свидетельствуют о последовательном росте полиморфов Al_2SiO_5, связанном со сложной полиметаморфической историей при смене тектонических условий. Во всех случаях минералы Al_2SiO_5 образовались в разное время и не могут считаться стабильными одновременно, хотя *PT*-тренды полиморфов могли проходить вблизи «тройной точки» или непосредственно через нее (рис.). Сравнительный анализ с аналогичными проявлениями в других регионах мира показал, что в природе не существует истинных парагенезисов «тройной точки», в которых три разных полиморфа Al_2SiO_5 росли бы одновременно при одинаковых *PT*-условиях и при этом были бы уравновешены в отношении всех компонентов. Они всегда находились в реакционных соотношениях, то есть формировались разновременно. Это означает, что использование таких ассоциаций для оценки *PT*-параметров метаморфизма и калибровки геотермобарометров может являться причиной значительных ошибок.

Соотношения устойчивости природных полиморфов Al_2SiO_5 алюмосиликатов нуждаются в дальнейшем изучении. И даже в том случае, когда взаимоотношения в рассматриваемой системе будут выявлены достаточно полно, при приложении экспериментальных данных к природным объектам следует прежде всего учитывать влияние компонентов-примесей, кинетику протекания реакции и образования центров кристаллизации, а не термодинамику полиморфных превращений.

Литература

Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С., Вершинин А. Е. Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // ДАН. 2011. Т. 436, № 4. С. 509–514.

Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Козлов П. С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. № 1. С. 412–465. doi: 10.31857/S0016853X21010070

Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism // J. Geol. 1967. Vol. 75. P. 187–214. doi: 10.1086/627246

Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia // Geological Society of London, Special Publications. 2019. Vol. 478. P. 89–115. doi: 10.1144/SP478.11

Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. Vol. 12, no. 11. Art. 402. doi: 10.3390/geosciences12110402

Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // Geol. J. 2020. Vol. 55, no. 6. P. 4772–4789. doi: 10.1002/gj.3716

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia // J. Metamorphic Geol. 2004. Vol. 22. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on polymetamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // J. Asian Earth Sci. 2015. Vol. 113. P. 391–410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026

Pattison D. R. M. Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite+biotite+quartz-bearing metapelites, with implications // Am. Mineral. 2001. Vol. 86. P. 1414–1422.

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer, 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

References

Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism. *J. Geol.* 1967;75:187–214. doi: 10.1086/627246

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Vershinin A. E. The Teya polymetamorphic complex in the Transangarian Yenisei Ridge: an example of metamorphic superimposed zoning of low- and medium-pressure facies series. *Doklady Earth Sciences.* 2011;436(2):213–218. doi: 10.1134/S1028334X11020048

Likhanov I. I., Zinoviev S. V., Kozlov P. S. Blastomylonite complexes of the Western Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia): geological position, metamorphic evolution and geodynamic models. *Geotectonics*. 2021; 55(1):36–57. doi: 10.1134/S0016852121010076

Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. *Geological Society of London, Special Publications*. 2019;478:89–115. doi: 10.1144/SP478.11

Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence. *Geosciences (Switzerland)*. 2022;12(11):402. doi: 10.3390/geosciences12110402

Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited. *Geol. J.* 2020;55(6):4772–4789. doi: 10.1002/gj.3716

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia. *J. Metamorph. Geol*. 2004;22(8):743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on polymetamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions. *J. Asian Earth Sci*. 2015;113:391–410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026

Pattison D. R. M. Instability of Al_2SiO_5 "triple point" assemblages in muscovite + biotite + quartz-bearing metapelites, with implications. *Am. Mineral.* 2001;86:1414–1422.

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer Geology. 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

Поступила в редакцию / received: 29.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Лиханов Игорь Иванович
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: likh@igm.nsc.ru

CONTRIBUTOR:

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

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 85–90
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 85–90
DOI: 10.17076/geo2149

УДК 551.72;551.24.056

МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ПИКРИТ-ПИКРОБАЗАЛЬТОВЫЙ ВУЛКАНИЗМ В ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСАХ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА: ПЕТРОГЕОХИМИЯ, МЕТАМОРФИЗМ, RB-SR И ^{147}SM-^{143}ND ID-TIMS СИСТЕМАТИКА

И. И. Лиханов[1]*, П. С. Козлов[2], А. Д. Ножкин[1], Ю. Л. Ронкин[2], А. А. Крылов[1]

*[1] Институт геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090), *likh@igm.nsc.ru*
[2] Институт геологии и геохимии УрО РАН им. А. Н. Заварицкого (ул. Акад. Вонсовского, 15, Екатеринбург, Россия, 620110)

Обосновывается раннемезопротерозойский (1370 млн лет) возраст пикрит-пикробазальтового вулканизма и связанный с ним метаморфизм в рифтогенной Ишимбинско-Татарской шовной зоне (палеорифте) на юго-западе Сибирского кратона. Осуществлена петрогеохимическая типизация метавулканогенно-осадочных комплексов с целью установления их протолитов и корреляции. Приведены первые данные по Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS систематике позднедокембрийских метавулканогенных пород в северной части Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса в центральной части Северо-Енисейского кряжа. По петрогеохимическому составу протолиты метавулканитов соответствуют пикробазальтам и базальтам, реже пикритам. Вулканогенно-осадочная толща на разных участках залегает на едином маркирующем горизонте углеродистых сланцев, что позволяет скоррелировать возраст вулканогенной панимбинской толщи с кординской свитой, рассматривая эти образования на стратоуровне раннего мезопротерозоя. Геотермобарометрия и анализ особенностей регионального метаморфизма вулканогенно-осадочных пород опорных участков показывают неоднородный характер *PT*-условий преобразования исходных пород: 4,8–4,9 кбар/527–549 °С – метатуффиты пикробазальтов; 5,0–5,8 кбар/543–612 °С – метабазиты; 3,5–4,6 кбар/522–636 °С – метапелиты. По характеру метаморфической зональности прогрессивный метаморфизм изученных пород относится к сравнительно малоглубинному *LP/HT* андалузит-силлиманитовому айдахскому типу (бьюкенский тип зональности). Его *PT*-условия соответствуют переходу от фации зеленых сланцев до границы между эпидот-амфиболитовой и амфиболитовыми фациями. По времени проявления (1056–996 млн лет) метаморфизм близок к гренвильской тектонической эпохе. Установленный возраст пикрит-пикробазальтового вулканизма в докембрии Енисейского кряжа коррелируется с временем проявления трондьемитов немтихинского комплекса и с реперным машакским плюмовым магматизмом на Южном Урале, проявленными в геодинамической обстановке растяжения континентальной коры в период распада суперконтинента Нуна.

Ключевые слова: пикрит-пикробазальтовый вулканизм; метаморфизм; Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd систематика; мезопротерозой; Енисейский кряж

Для цитирования: Лиханов И. И., Козлов П. С., Ножкин А. Д., Ронкин Ю. Л., Крылов А. А. Мезопротерозойский пикрит-пикробазальтовый вулканизм в докембрийских комплексах Енисейского кряжа: петрогеохимия, метаморфизм, Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS систематика // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 85–90. doi: 10.17076/geo2149

Финансирование. Работа выполнена за счет средств РНФ (проект № 21-77-20018-П).

I. I. Likhanov[1]*, P. S. Kozlov[2], A. D. Nozhkin[1], Yu. L. Ronkin[2], A. A. Krylov[1]. MESOPROTEROZOIC PICRITE-PICROBASALT VOLCANISM OF PRECAMBRIAN COMPLEXES IN THE YENISEI RANGE: PETROGEOCHEMISTRY, METAMORPHISM, Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS SYSTEMATICS

*[1] Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptyug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia), *likh@igm.nsc.ru*

[2] Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (15 Akad. Vonsovsky St., 620110 Ekaterinburg, Russia)

The Early Mesoproterozoic (1370 Ma BP) age of picrite-picrobasalt volcanism and the associated metamorphism in the riftogenic Ishimbinsko-Tatarskaya suture zone (paleorift) in the southwest of the Siberian Craton is substantiated. Petrogeochemical typification of metavolcanogenic-sedimentary complexes is carried out to establish their protoliths and correlation. First data on Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS systematics of late Precambrian metavolcanogenic rocks in the northern part of the Rybinsk-Panimba volcanic belt in the central part of the North Yenisei Range are presented. According to the petrogeochemical composition, the protoliths of the metavolcanites correspond to picrobasalts and basalts, less often to picrites. As the volcanogenic-sedimentary strata in different areas occur on a single marker horizon of carbonaceous shales, we can correlate the age of the volcanogenic Panimba sequence with the Korda suite, considering these formations at the stratolevel of the Early Mesoproterozoic. Geothermobarometry and analysis of the features of regional metamorphism of volcanogenic-sedimentary rocks in the reference areas show a heterogeneous nature of the *PT* conditions of transformation of the original rocks: 4.8–4.9 kbar/527–549 °C – metatuffites of picrobasalts; 5.0–5.8 kbar/543–612 °C – metabasites; 3.5–4.6 kbar/522–636 °C – metapelites. According to the metamorphic zoning pattern, the progressive metamorphism of the studied rocks belongs to the relatively shallow *LP/HT* andalusite-sillimanite Idaho type (Buchan type of zoning). Its *PT* conditions correspond to a transition from the greenschist facies to the boundary between the epidote-amphibolite and amphibolite facies. In terms of the time of manifestation (1056–996 Ma), the metamorphism is close to the Grenville tectonic epoch. The established Precambrian age of picrite-picrobasalt volcanism in the Yenisei Range correlates with the time of manifestation of trondhjemites of the Nemtikhinsky complex and with the reference Mashak plume magmatism in the Southern Urals, which were manifested in a geodynamic setting of continental crust stretching during the breakup of the Nuna supercontinent.

Keywords: picrite-picrobasalt volcanism; metamorphism; Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS systematics; Mesoproterozoic; Yenisei Range

For citation: Likhanov I. I., Kozlov P. S., Nozhkin A. D., Ronkin Yu. L., Krylov A. A. Mesoproterozoic picrite-picrobasalt volcanism of Precambrian complexes in the Yenisei Range: petrogeochemistry, metamorphism, Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS systematics. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 85–90. doi: 10.17076/geo2149

Funding. The study was funded by a Russian Science Foundation grant (project #21-77-20018-П).

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа, представляющего собой коллизионно-аккреционный ороген на западной окраине Сибирского кратона, важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов, но и для верификации данных палеомагнитного моделирования о конфигурации древнего суперконтинента Нуна.

Детальный обзор мировых возрастных аналогов рифтогенных и внутриплитных магматических событий в интервале времени 1380–1350 млн лет, установленных в структурах ряда крупных кратонов суперконтинента Нуна, приведен в работе [Likhanov, Santosh, 2019]. Тем не менее проблемы оценки геохронологических рубежей в истории этого суперконтинента во многом остаются дискуссионными и далеки от окончательного решения. Это связано с дефицитом геохимических данных и возрастных датировок, включающих периоды его становления и распада, что ограничивает возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли. Попытка восполнения этого пробела предпринята в настоящей статье, где обсуждаются особенности происхождения, возрастной рубеж и стратиграфический уровень пикрит-пикробазальтового вулканизма Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса на юго-западе Сибирского кратона.

Объект исследования – Ишимбинско-Татарская шовная зона, включающая Рыбинско-Панимбинский вулканический пояс (РПВП) [Ножкин и др., 2011]. Здесь изучены Панимбинский и Михайловский опорные участки, расположенные на севере РПВП. На Панимбинском участке интерес представляет панимбинская толща, сложенная метаморфизованными туффитами и туфами пикробазальтов и метаосадочными породами [Козлов, Лиханов, 2024]. Толща метапород Михайловского участка имеет неоднородное строение, в ее составе преобладают актинолитовые, хлорит-актинолитовые амфиболиты и двуполевошпатовые амфибол-диопсидовые метавулканиты. Перекрываются метавулканиты черными глиноземистыми слюдисто-графитистыми сланцами с кордиеритом и андалузитом. Метаморфические породы района исследований слагают юго-восточную периферию Тейского метаморфического комплекса [Лиханов и др., 2011].

Результаты термобарометрии показали видимые различия в пределах погрешностей методов [Likhanov et al., 2004] по *PT*-параметрам метаморфических преобразований толщ разного химического состава: 4,8–4,9 кбар/527–549 °С – метатуффиты пикробазальтов; 5,0–5,8 кбар/543–612 °С – метабазиты; 3,5–4,6 кбар/522–636 °С – метапелиты.

Результаты изучения Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS-изотопной систематики выполнены для образцов пород в целом и выделенных из них минералов (диопсиды, амфибол, плагиоклазы), представляющих кординскую свиту и панимбинскую толщу Ишимбинско-Татарской шовной зоны в северной части РПВП соответственно (табл.).

ID-TIMS-данные, характеризующие изотопный состав Rb-Sr-вулканита из основания нижней пачки метавулканогенно-осадочных пород кординской свиты (образец П-517-5) и выделенных из нее минералов двух диопсидов и плагиоклазов, на графике Николайсена удовлетворяет линии регрессии, наклон которой в указанных координатах определяет возраст метаморфизма 827 ± 17 млн лет и величину первичного отношения изотопов стронция 0,72051 ± 0,00089. Параметры референсной линии на графике $^{147}Sm/^{144}Nd$ vs. $^{143}Nd/^{144}Nd$ для плагиоклаза Pl_1 и амфибола Amp_1 соответствуют возрасту 1363 ± 21 млн лет, $\varepsilon_{Nd}(1363) = -2,6$. Наконец, ^{147}Sm-^{143}Nd модельный возраст, соответствующий точке пересечения линий эволюции изотопного состава неодима породы и деплетированного резервуара (DM) на графике T vs. $\varepsilon_{Nd}(t)$, имеет величину 2642 млн лет.

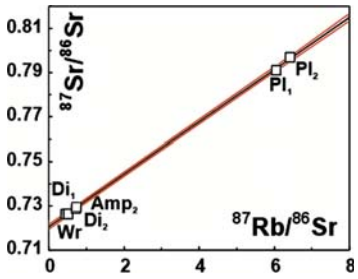
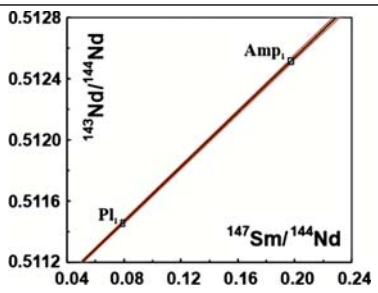
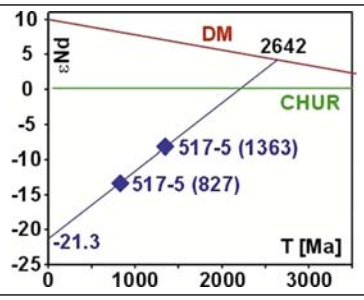
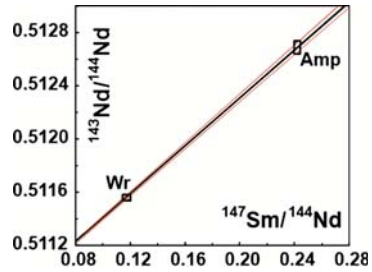
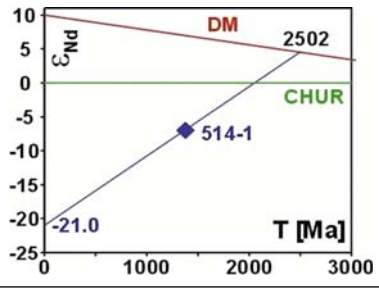
На графике в координатах $^{147}Sm/^{144}Nd$ vs. $^{143}Nd/^{144}Nd$ фигуративные точки породы в целом метаморфизованного туфа (образец П-514-1) и выделенного из нее амфибола удовлетворяют линии согласования, параметры которой диагносцируют среднерифейский возраст 1377 ± 40 млн лет, а также наличие существенного вклада корового материала, что подтверждается величиной $\varepsilon_{Nd}(1377) = -7,0$. Вычисленный в рамках модельных представлений об эволюции деплетированной мантии неодимовый возраст T_{DM} 2502 млн лет свидетельствует о как минимум неоархей-палеопротерозойском протолите.

Полученные значения возраста внутриплитного вулканизма и связанного с ним рифтогенного метаморфизма в Ишимбинско-Татарской шовной зоне тождественны с Rb-Sr, ^{147}Sm-^{144}Nd, U-Pb TIMS и SHRIMP-II (циркон) изотопией для границы бурзяния (R_1) и юрматиния на Южном Урале (R_2) [Ronkin et al., 2016].

Выводы. Геологические, петролого-геохимические и изотопно-геохронологические Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS-результаты являются основанием для стратиграфической корреляции разрезов метавулканогенно-осадочной толщи кординской свиты Михайловского участка и метапикритов, ультраосновных и основных пикробазальтов панимбинской толщи Панимбинского участка. Проведенные исследования свидетельствуют о раннемезопротерозойском (~1370 млн лет) возрасте пикрит-пикробазальтового вулканизма и связанного с ним метаморфизма в рифтогенной Ишимбинско-Татарской шовной зоне (палеорифте) на юго-западе Сибирского кратона. Этот возрастной рубеж интерпретируется как время деструкции докембрийских комплексов на западе Сибирского кратона.

Rb-Sr- и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS-изотопная систематика пород и минералов Ишимбинско-Татарской шовной зоны в северной части Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса

Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS isotopic systematics of rocks and minerals of the Ishimbinsk-Tatarsk seam zone in the northern part of the Rybinsk-Panimbinsk volcanic belt

Образец Sample	Порода, минерал Rocks, minerals	Толща/свита/ массив Thickness/ suite/massif	Изотопная система Isotope system	Возраст, млн лет Age, Ma IR, $\varepsilon_{Nd}(t)$	Графическое представление Plots
П-517-5, Р-517-5	Метавулканит (Wr), диопсид (Di), амфибол (Amp), плагиоклаз (Pl) Metavolcanite (Wr), diopside (Di), amphibole (Amp), plagioclase (Pl)	Кординская свита, R_1 Kordinskaya suite, R_1	Rb-Sr	827 ± 17, 0,72051 ± 0,00089	
			^{147}Sm-^{143}Nd	1363 ± 21, $\varepsilon_{Nd}(1363) = -2,6$	
				$T_{DM} = 2642$, $\varepsilon_{Nd}(827) = -13,4$, $\varepsilon_{Nd}(1363) = 8,2$	
П-514-1, Р-514-1	Метаморфизо- ванный туф (туфолава?) пикробазальта (Wr), амфибол (Amp) Metamorphosed tuff (tuff lava?) of picrobasalt (Wr), amphibole (Amp)	Панимбинская толща, R_3 Panimbinskaya strata, R_3	^{147}Sm-^{143}Nd	1377 ± 40, $\varepsilon_{Nd}(1377) = -7,0$	
				$T_{DM} = 2502$, $\varepsilon_{Nd}(1377) = -7,0$	

Примечание. R1 – Нижнерифейская система, 1350–1650 млн лет. IR – Initial Ratio. Wr – порода в целом. $T_{DM\text{-}1st}$, $T_{DM\text{-}2st}$ – одностадийный и двухстадийный Nd-модельный возраст. CHUR, DM – линии эволюции хондритового и деплетированного модельных резервуаров.

Note. R1 – Lower Riphean system, 1350–1650 Ma. IR – Initial Ratio. Wr – whole rock. $T_{DM\text{-}1st}$, $T_{DM\text{-}2st}$ – one-stage and two-stage Nd model age. CHUR, DM – evolution lines of the chondrite and depleted model reservoirs.

Возрастные аналоги рифтогенных и внутриплитных магматических событий в интервалах времени 1380–1350 млн лет и связанных с ними последующих процессов метаморфизма имеют место и в других регионах мира [Roger, Santosh, 2002]. Установленный возраст рифтогенного пикрит-пикробазальтового вулканизма и метаморфизма коррелирует со временем формирования плагиогранитов немтихинского комплекса [Likhanov, 2022] и с Машакским субглобальным плюмовым магматизмом, проявленными в геодинамической обстановке растяжения в период распада суперконтинента Нуна [Reverdatto et al., 2019].

Литература

Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С., Вершинин А. Е. Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // ДАН. 2011. Т. 436, № 4. С. 509–514.

Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Козлов П. С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. № 1. С. 412–465. doi: 10.31857/S0016853X21010070

Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism // J. Geol. 1967. Vol. 75. P. 187–214. doi: 10.1086/627246

Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia // Geological Society of London, Special Publications. 2019. Vol. 478. P. 89–115. doi: 10.1144/SP478.11

Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. Vol. 12, no. 11. Art. 402. doi: 10.3390/geosciences12110402

Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // Geol. J. 2020. Vol. 55, no. 6. P. 4772–4789. doi: 10.1002/gj.3716

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia // J. Metamorphic Geol. 2004. Vol. 22. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on polymetamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // J. Asian Earth Sci. 2015. Vol. 113. P. 391–410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026

Pattison D. R. M. Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite +biotite+quartz-bearing metapelites, with implications // Am. Mineral. 2001. Vol. 86. P. 1414–1422.

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer, 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

References

Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism. *J. Geol.* 1967;75:187–214. doi: 10.1086/627246

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Vershinin A. E. The Teya polymetamorphic complex in the Transangarian Yenisei Ridge: an example of metamorphic superimposed zoning of low- and medium-pressure facies series. *Doklady Earth Sciences.* 2011;436(2):213–218. doi: 10.1134/S1028334X11020048

Likhanov I. I., Zinoviev S. V., Kozlov P. S. Blastomylonite complexes of the Western Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia): geological position, metamorphic evolution and geodynamic models. *Geotectonics*. 2021; 55(1):36–57. doi: 10.1134/S0016852121010076

Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. *Geological Society of London, Special Publications*. 2019;478:89–115. doi: 10.1144/SP478.11

Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence. *Geosciences (Switzerland)*. 2022;12(11):402. doi: 10.3390/geosciences12110402

Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited. *Geol. J.* 2020;55(6): 4772–4789. doi: 10.1002/gj.3716

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia. *J. Metamorph. Geol*. 2004;22(8): 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on polymetamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions. *J. Asian Earth Sci*. 2015;113: 391–410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026

Pattison D. R. M. Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite + biotite + quartz-bearing metapelites, with implications. *Am. Mineral.* 2001;86: 1414–1422.

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer Geology. 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

Поступила в редакцию / received: 29.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лиханов Игорь Иванович
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: likh@igm.nsc.ru

Козлов Павел Сергеевич
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: kozlov@igg.uran.ru

Ножкин Александр Дмитриевич
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: nozhkin@igm.nsc.ru

Ронкин Юрий Лазаревич
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: y-ronkin@mail.ru

Крылов Александр Александрович
младший научный сотрудник
e-mail: krylov@igm.nsc.ru

CONTRIBUTORS:

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

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

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

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

Krylov, Alexander
Junior Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 91–97
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 91–97
DOI: 10.17076/geo2164

УДК 55 (084.3)

ТИПИЗАЦИЯ ПОЛОСЧАТЫХ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ КОСТОМУКШСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА ПО ПЕТРОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ

Н. В. Лубнина[1]*, Т. Р. Зарипов[1], О. А. Максимов[2], А. В. Андреев[1], А. И. Слабунов[2]

*[1] Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119234), *lubninanv@my.msu.ru*
[2] Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

В результате петро-палеомагнитных исследований удалось типизировать по магнитным свойствам полосчатые железистые кварциты (BIF) из различных ассоциаций Костомукшского зеленокаменного пояса. Установлено, что основными минералами-носителями намагниченности в образцах BIF-2 и BIF-4 являются однодоменный магнетит и моноклинный пирротин. Последний фиксируется по характерному подъему на кривых остывания в районе 350 °С. Показано, что магнетит в породах однодоменный и «капсулирован» в зернах кварца. Изучение анизотропии магнитной восприимчивости (AMS) позволило разделить сильно- и слабомагнитные образцы: в сильномагнитных образцах преобладает высокая степень анизотропии, связанная с преобразованием магнитной фракции и перемагничиванием пород. Высокая степень AMS в образцах BIF-2 и неоархейских (2710 млн лет) конгломератов связана с преобладанием в породах моноклинного пирротина, имеющего слоистую структуру. Слабомагнитные образцы преимущественно анизотропны. Детальные магнитные чистки позволили выделить в изученных образцах как минимум две компоненты намагниченности. Среднее направление выделенной во всех сайтах низкотемпературной компоненты намагниченности близко к направлению «Свекофеннского перемагничивания» для Карельского кратона. В образцах BIF-2 среднее направление высокотемпературной компоненты намагниченности близко к таковому в неоархейских конгломератах и совпадает с направлением «Лапландско-Кольского перемагничивания» (~1,96 млрд лет). Выделенные метахронные компоненты намагниченности свидетельствуют в пользу неравномерного перемагничивания пород, даже в пределах одной толщи. В образцах мезоархейских (2,8 млрд лет) риолитов и палеопротерозойских (2,42 млрд лет) габбро, возможно, выделены первичные компоненты намагниченности 2,72 и 2,42 млрд лет соответственно. Отмечается избирательное перемагничивание различных по составу пород.

Ключевые слова: Костомукшский зеленокаменный пояс; полосчатые железистые кварциты; архей; Карельский кратон; пирротин; магнетит; петромагнетизм; перемагничивание

Для цитирования: Лубнина Н. В., Зарипов Т. Р., Максимов О. А., Андреев А. В., Слабунов А. И. Типизация полосчатых железистых кварцитов Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона по петромагнитным данным // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 91–97. doi: 10.17076/geo2164

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение задания ИГ КарНЦ РАН по теме FMEN-2023-0009 и геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова № АААА-А16-116033010119-4. Палеомагнитные измерения выполнены в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ на приборах, закупленных по Программе развития МГУ.

N. V. Lubnina[1]*, T. R. Zaripov[1], O. A. Maksimov[2], A. V. Andreev[1], A. I. Slabunov[2]. TYPIFICATION OF BANDED IRON FORMATIONS OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT (FENNOSCANDIAN SHIELD): PETROMAGNETIC EVIDENCE

*[1] Lomonosov Moscow State University, Department of Geology (1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia), *lubninanv@my.msu.ru*

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

As a result of petro-paleomagnetic studies, banded iron formations (BIF) have been typified by their magnetic properties. The main magnetization carrier minerals in BIF 2 and BIF-4 samples are single-domain magnetite and monoclinic pyrrhotite. The latter is identified by a characteristic rise in the cooling curves at 350 °C. It is shown that magnetite in the rocks is single-domain and 'encapsulated' in quartz grains. Investigation of the Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) permitted differentiating between highly and weakly magnetic samples: highly magnetic samples are dominated by a high degree of anisotropy associated with the transformation of the magnetic fraction and remagnetization of the rocks. The high AMS in the BIF-2 samples and Neoarchean conglomerates (2710 Ma) is associated with the predominance of layered-structure monoclinic pyrrhotite in the rocks. Weakly magnetic samples are predominantly anisotropic. Definitive stepwise demagnetization allowed us to distinguish at least two magnetization components in the studied samples. The average direction of the low-temperature component identified in all sites is near-aligned with the Svecofennian remagnetization for the Karelian Craton. The average direction of the high-temperature component in BIF-2 samples is close to that in Neoarchean conglomerates and coincides with the direction of the Lapland-Kola remagnetization (ca. 1.96 Ga). The identified metachronous magnetization components testify to uneven remagnetization of rocks within the same stratum. The Mesoarchean (2.8 Ga) rhyolite and Paleoproterozoic (2.42 Ga) gabbro samples may contain primary magnetization components dated to 2.72 and 2.42 Ga, respectively. Selective remagnetization of rocks differing in composition is observed.

Keywords: Kostomuksha Greenstone Belt; banded iron formation; Archean; Karelian Craton; pyrrhotite; magnetite; petromagnetism; remagnetization

For citation: Lubnina N. V., Zaripov T. R., Maksimov O. A., Andreev A. V., Slabunov A. I. Typification of banded iron formations of the Kostomuksha Greenstone Belt (Fennoscandian Shield): Petromagnetic Evidence. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 91–97. doi: 10.17076/geo2164

Funding. This study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Institute of Geology KarRC RAS (FMEN-2023-0009) and Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University (AAAA-A16-116033010119-4). Paleomagnetic measurements were carried out at MSU Petromagnetic Laboratory using equipment purchased under MSU Development Program.

Полосчатые железистые кварциты (BIF) – породы, которые формировались только в раннем докембрии, являются незаменимым источником информации об экологии древней Земли и главной железной рудой в мире. Знание физических свойств, химического состава, метаморфических преобразований BIF имеет решающее значение как для понимания состава древних океанов, атмосферы и процессов осадконакопления в океане, так и для оценки качества руд [Bekker et al., 2010; Медведев, 2024]. Поскольку в составе BIF главные рудные минералы – магнетит и гематит, изучение петро- и палеомагнитных параметров

может иметь важное значение для оценки экономического потенциала железной руды, а также реконструкции геодинамических условий на ранних этапах развития Земли.

Костомукшский зеленокаменный пояс (КЗП) находится в центральной части Карельского кратона [Slabunov et al., 2024 и ссылки в ней] (рис. 1, А) и является главной железорудной структурой региона. В зеленокаменном комплексе КЗП установлены полосчатые железистые кварциты, ассоциирующие с мезоархейскими метакоматиит-базальтами контокской серии (BIF-1) и с мезо-неоархейскими кислыми метавулканитами шурловаарской свиты (BIF-2); с неоархейскими метаграувакками и кислыми метавулканитами костомукшской свиты (BIF-3) и с неоархейскими метаграувакками (BIF-4) [Горьковец и др., 1991; Слабунов и др., 2025а]. Геохронологические исследования BIF показали сложную полиметаморфическую историю пород: сформировавшись в мезо- и неоархее, они претерпевали метаморфические преобразования 2,73–2,70, 2,66, около 2,4, 1,8–1,9, 1,45 млрд лет [Слабунов и др., 2021, 2025а, б; Slabunov et al., 2024].

Для палеомагнитных исследований были отобраны породы BIF-2 и BIF-4 КЗП. Опробование проводилось по сайтовой методике. В четырех сайтах было выпилено от 3 до 10 штуфов размером 20×15×5 см (рис. 1).

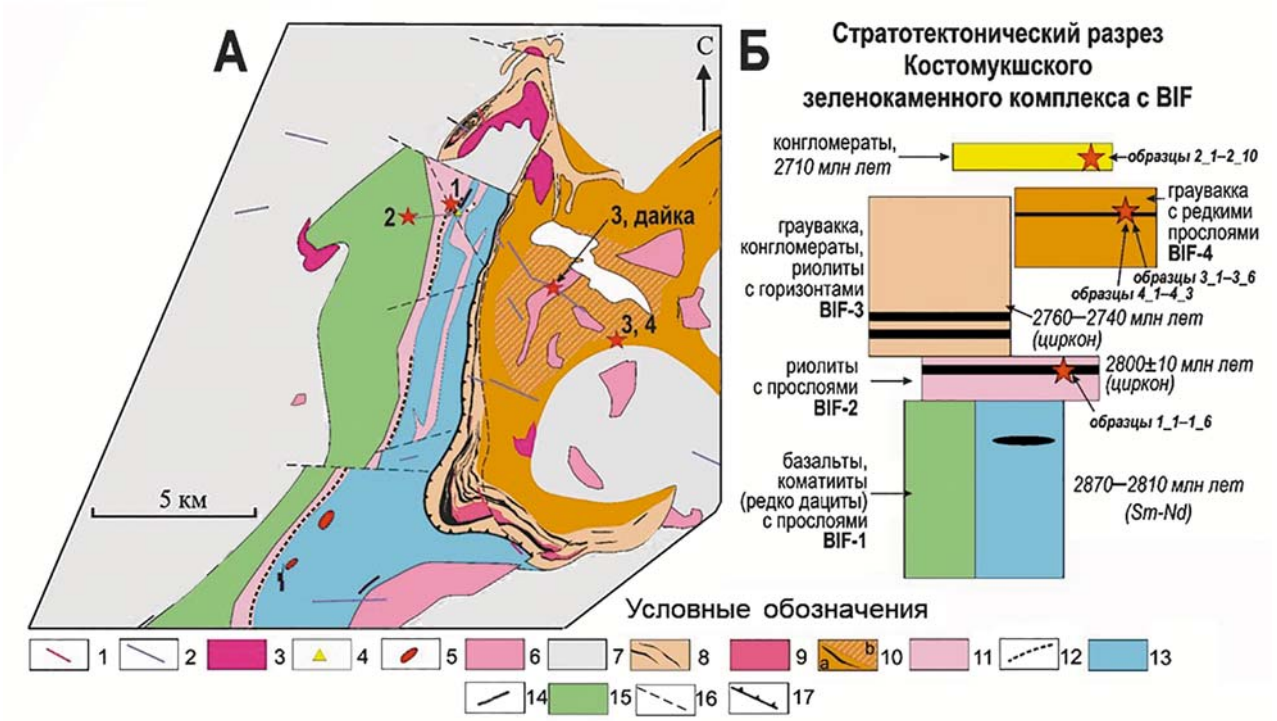


Рис. 1. Схема геологического строения Костомукшского зеленокаменного пояса (А) и стратотектонический разрез его зеленокаменного комплекса (Б) [по: Слабунов, Исаченко, 2024; Слабунов и др., 2025а] с изменениями.

Звездочками показано расположение сайтов (номера сайтов – цифры около звездочек), в которых изучены петромагнитные свойства BIF. Условные обозначения: 1 – неопротерозойские (1,2 млрд лет) лампроиты и кимберлиты; 2 – палеопротерозойские (2,40 и 2,14 млрд лет) долериты; 3–9 – неоархейские: 3 – граниты (2,68 млрд лет); 4 – полимиктовые конгломераты (2,71 млрд лет); 5 – санукитоиды (2,71 млрд лет); 6 – граниты (2,72 млрд лет); 7 – гранитоиды ТТГ-ассоциации (2,8–2,75 млрд лет); 8–10 – породы гимольской серии: 8 – метаграувакки с прослоями BIF-3 (2,76–2,74 млрд лет); 9 – силлы и дайки метариолитов (геллефлинты) (2,76–2,74 млрд лет); 10 – метаосадки сурлампинской свиты с прослоями BIF: а – слабо- и б – сильномигматизированные; 11–14 – мезоархейские (2,87–2,78 млрд лет) породы контокской серии: 11 – туфы, туффиты риолитов (шурловаарская свита); 12 – прослои BIF-2; 13 – коматиит-базальтовый с дацитами комплекс (рувинваарская свита); 14 – прослои BIF-1; 15 – базальты и коматииты (ниемиярвинская свита); 16 – разломы; 17 – надвиг

Fig. 1. Schematic geological map of the Kostomuksha Greestone Belt (A) and stratotectonic section of the greenstone complex (Б) after [Slabunov, Isachenko, 2024; Slabunov et al., 2025a] with changes.

Stars indicate the sites location (site numbers are given near the stars), where the BIF rocks were collected for petromagnetic studies. 1 – Neoproterozoic (1.2 Ga) lamproites and kimberlites; 2 – Paleoproterozoic (2.40 and 2.14 Ga) dolerites; 3–9 – Neoarchean: 3 – 2.68 Ga granites; 4 – 2.71 Ga polymictic conglomerates; 5 – 2.71 Ga sanukitoids; 6 – 2.72 Ga granites; 7 – 2.8–2.75 Ga TTG granitoids; 8–10 – rocks of the Gimoly Group: 8 – 2.76–2.74 Ga metagraywackes with BIF-3 interlayers; 9 – 2.76–2.74 Ga sills and dikes of metarhyolites (gelleflints); 10 – metasediments of the Surlampi Formation with BIF interlayers: a – weakly and b – strongly migmatized; 11–14 – Mesoarchean (2.87–2.78 Ga) Kontokki Group: 11 – tuffs, tuffites of rhyolites (Surlovaara Formation); 12 – BIF-2 interlayers; 13 – komatiite-basalt with dacites complex (Ruvinvaara Formation); 14 – BIF-1 interlayers; 15 – basalts and komatiites (Niemijärvi Formation); 16 – faults; 17 – thrusts

Следует отметить, что при палеомагнитном опробовании под сайтом подразумевается геологически однородный участок, в пределах которого точечно отбирается группа образцов (обычно 5–10 штуфов или спилов), содержащих идентичный палеомагнитный сигнал. При этом обязательным условием является одновременное приобретение породами компонент намагниченности. Для проведения теста контакта отобраны мезоархейские метабазальты контокской серии, мезо-неоархейские (2800 ± 10 млн лет [Мыскова и др., 2020]) метариолиты шурловаарской свиты, неоархейские (2,71 млрд лет [Слабунов и др., 2025а]) конгломераты и палеопротерозойская (2404 млн лет [Степанова и др., 2017]) дайка долеритов (сайты 1 и 2 на рис. 1).

Петро-палеомагнитные исследования позволили типизировать BIF по магнитной текстуре и выделенным метахронным компонентам намагниченности. Исследования проводились в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова по стандартной методике [Храмов и др., 1982].

Во всех изученных образцах в низкотемпературном/низкокоэрцитивном интервале выделена компонента северо-западного склонения и умеренного положительного наклонения. Среднее направление этой компоненты совпадает с направлением 1,86 млрд лет для Карельского кратона [Mertanen et al., 2006; Lubnina et al., 2025].

Образцы BIF-2 сильномагнитны – величины магнитной восприимчивости (æ) и естественной остаточной намагниченности (NRM) имеют значительный разброс от $3{,}1\times10^{-2}$ до $4{,}2\times10^{+00}$ ед. СИ и от $22{,}04\times10^{-2}$ до $140{,}44\times10^{+00}$ А/м соответственно. Величина общей степени анизотропии (Pj) также имеет значительный разброс от 1,24 до 6,70. В породах преобладает плоскостной тип анизотропии AMS. Высокие значения Pj указывают на вторичную магнитную текстуру и более позднее перемагничивание пород. Выделена одна метахронная компонента ССВ склонения и умеренного положительного наклонения (рис. 2). Полученный палеомагнитный полюс совпадает с полюсом 1,96 млрд лет для Карельского кратона [Lubnina et al., 2025].

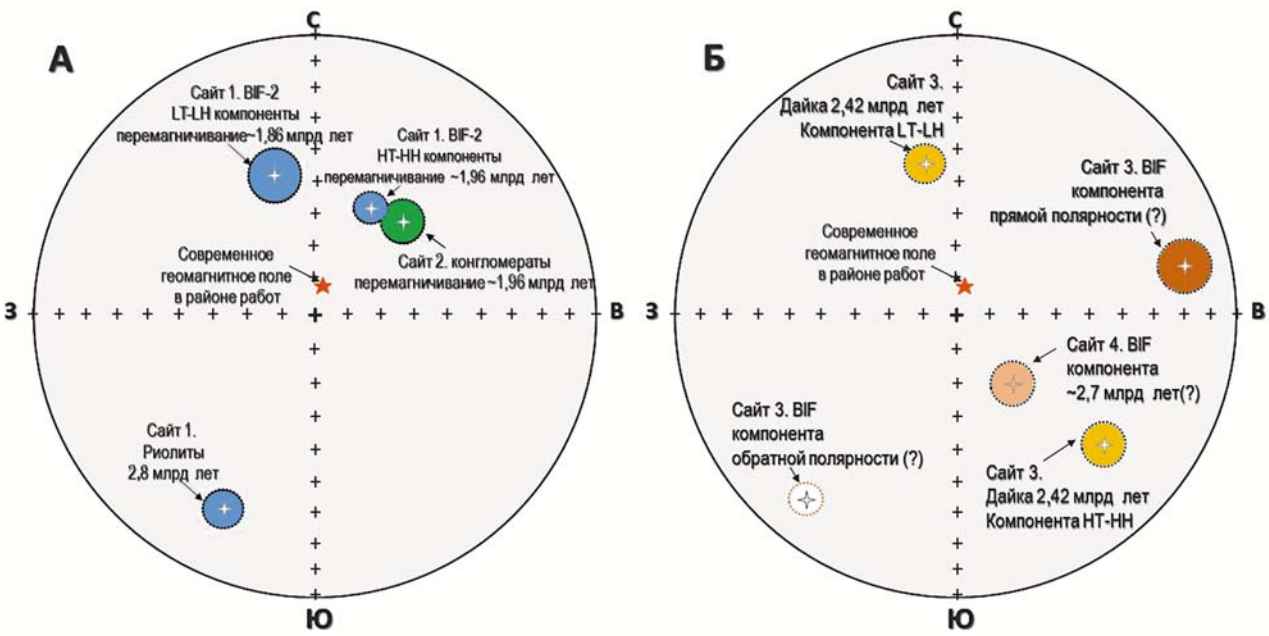


Рис. 2. Средние направления выделенных метахронных компонент на уровне образцов с кругами 95% доверия в географической (современной) системе координат:

А – для образцов, отобранных в сайтах 1–2; Б – для образцов, отобранных в сайтах 3–4. Звездочкой показано направление современного геомагнитного поля в районе работ

Fig. 2. Mean directions of identified metachronous components at sample level with 95% confidence circle in the geographic (present day) coordinate system:

A – for samples collected from sites 1–2; Б – for samples collected from sites 3–4. The stars show the direction of the present day geomagnetic field in the studied area

Образцы вмещающих метариолитов слабомагнитны, æ 490–890×10^{-6} ед. СИ, NRM – 2,76–14,2×10^{-3} А/м, а Pj – 1,007–1,037. Преобладает плоскостной тип анизотропии. Возможно, в образцах сохранилась первичная магнитная текстура. Среднее направление выделенной метахронной компоненты имеет ЮЗ склонение и низкое положительное наклонение, значимо отличается от таковых в образцах BIF-2 и близко к направлению 2,7 млрд лет для Карельского кратона [Lubnina, Slabunov, 2017]. Формально тест контакта положительный, что свидетельствует в пользу первичной природы выделенной в BIF-2 компоненты. Однако высокая степень Pj и совпадение с направлением «Лапландско-Кольского перемагничивания» 1,96 млрд лет скорее говорит об избирательном перемагничивании различных по составу пород (рис. 2).

Величина æ в образцах BIF-4 изменяется в пределах 7,37–32,0×10^{-1} ед. СИ, Pj – 1,60–2,70. Преобладает линейный тип магнитной текстуры. Высокая степень анизотропии и линейная (вторичная для железистых кварцитов) магнитная текстура указывает на более позднее перемагничивание пород. В образцах выделена одна метахронная компонента прямой и обратной полярности. Для части образцов из контактовой зоны она имеет ВСВ склонение и низкое положительное наклонение, для другой части – ЮЗ склонение и отрицательное наклонение. Средние направления не антиподальны (рис. 2). Полученный палеомагнитный полюс близок к полюсу 1,50–1,45 млрд лет для Восточно-Европейского кратона [Lubnina et al., 2010].

В образцах долеритовой дайки æ не превышает 61–76×10^{-3} ед. СИ, NRM – 15,05–287,0×10^{-1} А/м, а Pj – от 1,03–1,07. Преобладает плоскостной тип анизотропии. Высокотемпературная компонента имеет ЮЮВ склонение и умеренное положительное наклонение. Палеомагнитный полюс совпадает с полюсом 2,40 млрд лет для Карельского кратона [Mertanen et al., 2006; Lubnina et al., 2025].

Образцы неоархейских конгломератов четко разделяются по величине æ: светлые гальки слабомагнитные (æ = 6,3–98×10^{-5} ед. СИ, Pj не превышает 6–11 %), а темноцветные – сильномагнитные (æ = 0,21–0,98×10^{-3} ед. СИ, Pj – 0,5–3,4%). И в слабомагнитных, и в сильномагнитных образцах преобладает плоскостной тип анизотропии. Трехосная форма эллипсоида AMS свидетельствует в пользу вторичной магнитной текстуры. В образцах конгломератов выделена только одна компонента ССВ склонения и умеренно-высокого положительного наклонения. Среднее направление этой компоненты близко к направлению высокотемпературной компоненты в образцах BIF-2 (породы перемагничены ~ 1,96 млрд лет назад).

В результате петро-палеомагнитных исследований удалось типизировать по магнитным свойствам BIF различных ассоциаций. Выделенные метахронные компоненты намагниченности свидетельствуют в пользу неравномерного перемагничивания пород, даже в пределах одной толщи. Это хорошо согласуется с результатами геохронологических исследований BIF, указывающих на неоднократное и часто локальное проявление термальных процессов. В образцах мезоархейских риолитов и палеопротерозойских габбро, возможно, выделены первичные компоненты намагниченности 2,72 и 2,42 млрд лет соответственно.

Литература

Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Володичев О. И., Голованова Л. С. Геология и метаморфизм железисто-кремнистых формаций Карелии / Отв. ред. М. М. Стенарь; АН СССР, Карел. фил., Ин-т геологии. Л.: Наука, 1991. 176 с.

Медведев П. В. Полосчатые железистые формации докембрия: палеоэкологические и палеобиологические аспекты // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 6. С. 17–29. doi: 10.17076/geo1953

Мыскова Т. А., Милькевич Р. И., Львов П. А., Житникова И. А. Неоархейские вулканиты Хедозеро-Большозерской зеленокаменной структуры Центральной Карелии: состав, возраст и тектоническая обстановка // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2020. Т. 28, № 2. С. 3–32. doi: 10.31857/S0869592X20020040

Слабунов А. И., Исаченко А. А. Литогеохимия полосчатых железистых кварцитов шурловаарской свиты Костомукшского зеленокаменного пояса (Карельский кратон) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 6. С. 30–50. doi: 10.17076/geo1950

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Мудрук С. В., Максимов О. А., Кервинен А. В. Находка неоархейских (2,71 млрд лет) конгломератов в Костомукшском железорудном районе: к вопросу о самой молодой стратотектонической ассоциации архея Карельского кратона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025а. Т. 520, № 1. С. 33–46. doi: 10.31857/S2686739725010041

Слабунов А. И., Кервинен А. В., Сальникова Е. Б., Ерофеева К. Г., Дубенский А. С. Новое мезопротерозойское (1546 млн лет) термальное событие в Центрально-Карельском террейне Карельского кратона: по результатам датирования цирконов из неоархейских кислых вулканитов Костомукшского зеленокаменного пояса // Труды Карельского научного центра РАН. 2025б. № 5. С. 124–129. doi: 10.17076/geo2150

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Кулешевич Л. В., Кевлич В. И. Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита // Геохимия. 2021. Т. 66, № 4. С. 291–307. doi: 10.31857/S0016752521040063

Степанова А. В., Сальникова Е. Б., Самсонов А. В., Ларионова Ю. О., Егорова С. В., Саватенков В. М. Дайки долеритов 2404 млн лет на Карельском кратоне – фрагмент палеопротерозойской крупной магматической провинции // ДАН. 2017. Т. 472, № 2. С. 185–191. doi: 10.7868/S0869565217020232

Храмов А. Н., Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А., Писаревский С. А., Погарская И. А., Ржевский Ю. С., Родионов В. П., Слауцитайс И. П. Палеомагнитология / Под ред. А. Н. Храмова. Л.: Недра, 1982. 312 с.

Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapez B., Hofmann A., Konhauser K. O., Rouxel O. J. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric // Econ. Geol. 2010. Vol. 105. P. 467–508. doi: 10.2113/gsecongeo.105.3.46

Lubnina N. V., Bychkov A. Yu., Tarasov N. A., Osadchii V. O., Miklyaeva E. P. Stages of the Paleoproterozoic chemical remagnetization of the Kivakka layered intrusion and its geodynamic setting during the breakup of the Precambrian supercontinents // Moscow Univ. Geol. Bull. 2025. Vol. 80, no. 1. P. 17–27. doi: 10.3103/S0145875225700127

Lubnina N., Mertanen S., Soderlund U., Bogdanova S., Vasilieva T., Frank-Kamenetsky D. A new key pole for the East European Craton at 1452 Ma: palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia) // Precambrian Res. 2010. Vol. 183(3). P. 442–462. doi: 10.1016/j.precamres.2010.02.014

Lubnina N. V., Slabunov A. I. The Karelian Craton in the structure of the Kenorland Supercontinent in the Neoarchean: new paleomagnetic and isotope geochronology data on granulites of the Onega Complex // Moscow Univ. Geol. Bull. 2017. Vol. 72, no. 6. P. 377–390. doi: 10.3103/S0145875217060072

Mertanen S., Vuollo J. I., Huhma H., Arestova N. A., Kovalenko A. Early Paleoproterozoic–Archean dykes and gneisses in Russian Karelia of the Fennoscandian Shield – new paleomagnetic, isotope age and geochemical investigations // Precambrian Res. 2006. Vol. 144. P. 239–260.

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Sorjonen-Ward P., Balangansky V. V., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archean nucleus of the Fennoscandian (Baltic) Shield // European Lithosphere Dynamics / D. G. Gee, R. A. Stephenson (eds). Geological Society, London, Memoirs. 2006. Vol. 32(1). P. 627–644. doi: 10.1144/GSL.MEM.2006.035.01.37

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Zircon from banded iron formation as a sensitive indicator of its polychronous background: a case study on the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield // Int. Geol. Rev. 2024. Vol. 66, no. 6. P. 1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

References

Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapez B., Hofmann A., Konhauser K. O., Rouxel O. J. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric. *Econ. Geol.* 2010;105:467–508. doi: 10.2113/gsecongeo.105.3.46

Gor'kovets V. Ya., Raevskaya M. B., Volodichev O. I., Golovanova L. S. Geology and metamorphism of the ferro-siliceous formations of Karelia. Leningrad: Nauka; 1991. 176 p. (In Russ.)

Khramov A. N., Goncharov G. I., Komissarova R. A., Pisarevskii S. A., Pogarskaya I. A., Rzhevskii Yu. S., Rodionov V. P., Slautsitais I. P. Paleomagnetology. Leningrad: Nedra; 1982. 312 p. (In Russ.)

Lubnina N. V., Bychkov A. Yu., Tarasov N. A., Osadchii V. O., Miklyaeva E. P. Stages of the Paleoproterozoic chemical remagnetization of the Kivakka layered intrusion and its geodynamic setting during the breakup of the Precambrian supercontinents. *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2025;80(1):17–27. doi: 10.3103/S0145875225700127

Lubnina N., Mertanen S., Soderlund U., Bogdanova S., Vasilieva T., Frank-Kamenetsky D. A new key pole for the East European Craton at 1452 Ma: palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia). *Precambrian Res.* 2010;183(3):442–462. doi: 10.1016/j.precamres.2010.02.014

Lubnina N. V., Slabunov A. I. The Karelian Craton in the structure of the Kenorland Supercontinent in the Neoarchean: new paleomagnetic and isotope geochronology data on granulites of the Onega Complex. *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2017;72(6):377–390. doi: 10.3103/S0145875217060072

Medvedev P. V. Precambrian banded iron formation: paleoecological and paleobiological aspects. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2024;6:17–29. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1953

Mertanen S., Vuollo J. I., Huhma H., Arestova N. A., Kovalenko A. Early Paleoproterozoic–Archean dykes and gneisses in Russian Karelia of the Fennoscandian Shield – new paleomagnetic, isotope age and geochemical investigations. *Precambrian Res.* 2006;144:239–260.

Myskova T. A., Mil'kevich R. I. L'vov P. A., Zhitnikova I. A. Neoarchean volcanites of the Khedozero-Bolshozero greenstone structure of Central Karelia: composition, age and tectonic setting. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya = Stratigraphy and Geological Correlation.* 2020;28(2):3–32. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869592X20020040

Slabunov A. I., Isachenko A. A. Lithogeochemistry of the Shurlovaara banded iron formation, Kostomuksha Greestone Belt, Karelian Craton, Russia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2024;6:30–50. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1950

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Sorjonen-Ward P., Balangansky V. V., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archean nucleus of the Fennoscandian (Baltic) Shield. *European Lithosphere Dynamics*. *Geological Society, London, Memoirs*. 2006;32(1):627–644. doi: 10.1144/GSL.MEM.2006.035.01.37

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Zircon from banded iron formation as a sensitive indicator of its polychronous background: a case study on the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield. *Int. Geol. Rev.* 2024;66(6):1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Sal'nikova E. B., Erofeeva K. G., Dubenskii A. S. A new Mesoproterozoic (1546 Ma) thermal event in the Central Karelian terrane of the Karelian Craton: results of dating zircon from Neoarchean felsic rock of the Kostomuksha Greenstone Belt. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2025;5:124–129. (In Russ.). doi: 10.17076/geo2150

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Egorov A. V., Kuleshevich L. V., Kevlich V. I. Age of the Archean strata with banded iron formation in the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield: constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. *Geochemistry International.* 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Mudruk S. V., Maksimov O. A., Kervinen A. V. Finding of Neoarchean (2.71 Ga) conglomerates in the Kostomuksha iron ore province: on the youngest Archean stratotectonic association of the Karelian Craton. *Doklady Earth Sciences*. 2025;520(1):29–42. doi: 10.31857/S26867397250104e9

Stepanova A. V., Egorova S. V., Salnikova E. B., Savatenkov V. M., Samsonov A. V., Larionova Yu. O. The 2405 Ma doleritic dykes in the Karelian Craton: a fragment of a Paleoproterozoic large igneous province. *Doklady Earth Sciences.* 2017;472(1):72–77. doi: 10.1134/S1028334X17010196

Поступила в редакцию / received: 28.07.2025; принята к публикации / accepted: 08.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лубнина Наталия Валерьевна
д-р геол.-мин. наук, профессор
e-mail: lubninanv@my.msu.ru

Зарипов Тимур Рифхатович
студент
e-mail: zaripov.tim00zaripov@yandex.ru

Максимов Олег Александрович
канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник
e-mail: olemaximov@mail.ru

Андреев Андрей Владимирович
техник
e-mail: andreeff19659011@yandex.ru

Слабунов Александр Иванович
д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геологии и геодинамики докембрия
e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Lubnina, Natalia
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor

Zaripov, Timur
Student

Maksimov, Oleg
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher

Andreev, Andrey
Technician

Slabunov, Alexander
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Chief Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 98–103
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 98–103
DOI: 10.17076/geo2163

УДК 55 (084.3)

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА: КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Н. В. Лубнина[1]*, А. И. Слабунов[2], А. В. Степанова[2], В. П. Воронцова[1], Н. С. Нестерова[2]

*[1] Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119234), *lubninanv@my.msu.ru*
[2] Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Проведены детальные петро-палеомагнитные исследования раннепалеопротерозойских метагабброидов Беломорского подвижного пояса (провинции) в интервале от 67° до 63° с. ш. Выделены две метахронные компоненты намагниченности в среднетемпературном (до 450 °С) и высокотемпературном (450–580 °С) интервалах. Высокотемпературная компонента выделяется практически во всех объектах. В северной части эта компонента имеет запад-юго-западное склонение и умеренное положительное наклонение. В каждом объекте эта компонента имеет «банановое» распределение, характерное для химического типа перемагничивания. Основным минералом-носителем этой компоненты намагниченности является однодоменный магнетит, часто «капсулированный» в кварце. Палеомагнитные полюсы, пересчитанные с направлений высокотемпературной компоненты на координаты точек отбора, для каждого объекта близки к палеомагнитному полюсу 2,10 млрд лет для Кольского блока. В южной части Беломорской провинции склонение высокотемпературной компоненты закономерно меняется с запад-северо-западного на север-северо-восточное. Палеомагнитный полюс, пересчитанный с направления этой компоненты на координаты точек отбора, близок к полюсу 1,98–1,90 млрд лет для Карельского кратона. Высокотемпературная компонента намагниченности приобретена породами Беломорской провинции в ходе континентальной субдукции. Установлен тренд «омоложения» этой компоненты с северо-запада на юго-восток. Различные направления высокотемпературной компоненты в разных частях Беломорской провинции указывают на разное время эксгумации отдельных тектонических пластин. Термовязкая среднетемпературная компонента северо-западного склонения и умеренно положительного наклонения имеет кучное распределение во всех изученных объектах. Среднее направление этой компоненты совпадает с направлением «Свекофеннского перемагничивания» для Карельского кратона. Ее образование произошло на заключительном этапе коллизионной стадии формирования Беломорского подвижного пояса 1,86 млрд лет назад.

Ключевые слова: Беломорский подвижный пояс (провинция); палеопротерозой; габброиды; химическое и термовязкое перемагничивание; тренд перемагничивания; коллизия; континентальная субдукция

Для цитирования: Лубнина Н. В., Слабунов А. И., Степанова А. В., Воронцова В. П., Нестерова Н. С. Палеомагнетизм Беломорского подвижного пояса: комплексные исследования и геодинамические следствия // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 98–103. doi: 10.17076/geo2163

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ИГ КарНЦ РАН по теме FMEN-2023-0009 и геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова № АААА-А16-116033010119-4. Палеомагнитные измерения выполнены в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ на приборах, закупленных по Программе развития МГУ.

N. V. Lubnina[1]*, A. I. Slabunov[2], A. V. Stepanova[2], V. P. Vorontsova[1], N. S. Nesterova[2]. PALEOMAGNETISM OF THE BELOMORIAN MOBILE BELT: INTEGRATED STUDIES AND GEODYNAMIC CONSEQUENCES

*[1] Lomonosov Moscow State University, Department of Geology (1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia), *lubninanv@my.msu.ru*

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

Detailed petro-paleomagnetic studies of the Early Paleoproterozoic metagabbroids of the Belomorian Mobile Belt (Province) were carried out between 67° and 63° N. Two metachronous magnetization components were distinguished in the medium-temperature (up to 450 °C) and high-temperature (450–580 °C) intervals. The high-temperature component was identified in almost all objects. In the northern part, this component is pointed to WSW and down. It has a 'banana' distribution in every object, indicating chemical remagnetization. The main magnetic-carrier mineral is magnetite, 'encapsulated' in quartz. The paleomagnetic poles recalculated from this component are close to the paleomagnetic poles of 2.1 Ga for the Kola block. In the southern part of the Belomorian Province, the WNW declination naturally changes to NNE. The paleomagnetic poles are close to the 1.98–1.90 Ga poles for the Karelian Craton. Thus, rocks of the Belomorian Province acquired the high-temperature component during the continental subduction. We revealed a trend for 'rejuvenation' of the high-temperature component from NW to SE. The different directions of the high-temperature component in different parts of the Belomorian Province indicate the time of exhumation of individual tectonic blocks. The thermoviscous medium-temperature component demonstrates a NW direction and downward inclination. It has a clustered distribution for all objects. This component has the same average direction as the 'Svecofennian remagnetization' for the Karelian Craton. It was formed at the final collisional stage of the Belomorian Province formation at ca 1.86 Ga.

Keywords: Belomorian Mobile Belt (Province); Paleoproterozoic; gabbroids; chemical and thermoviscous remagnetization; trend of remagnetization; collision; continental subduction

For citation: Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Vorontsova V. P., Nesterova N. S. Paleomagnetism of the Belomorian Mobile Belt: integrated studies and geodynamic consequences. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 98–103. doi: 10.17076/geo2163

Funding. This study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Institute of Geology KarRC RAS (FMEN-2023-0009) and Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University (AAAA-A16-116033010119-4). Paleomagnetic measurements were carried out at MSU Petromagnetic Laboratory using equipment purchased under MSU Development Program.

Беломорская провинция (БП), или Беломорский подвижный пояс Фенноскандинавского щита является одним из важнейших в мире полигонов для исследования ранней истории Земли (рис.), поскольку в его строении принимают участие как типичные для раннего докембрия комплексы (глубокометаморфизованные архейские ТТГ, вулканиты и осадки, протерозойские габбро и граниты), так и уникальные (архейские и палеопротерозойские эклогиты, фрагменты архейских офиолитов) [Слабунов, 2008, 2022]. Весьма ценную информацию для понимания палеопротерозойской истории формирования БП несут палеомагнитные данные [Лубнина и др., 2022]. В частности, рассматриваемые в статье новые материалы важны для тестирования существующих [Балаганский и др., 2016; Lahtinen, Huhma, 2019; Слабунов и др., 2021; Li et al., 2025] геодинамических моделей эволюции БП.

Эволюция земной коры БП в палеопротерозое (2,50–1,80 млрд лет) включала следующие события [Балаганский и др., 2016; Слабунов и др., 2021 и ссылки в ней]:

1) около 2,50–2,10 млрд лет: воздействие мантийных плюмов на континентальную кору восточной части Фенноскандинавского щита, в результате чего сформировались рифтогенные структуры и многочисленные интрузии габброидов, в том числе в БП;

2) в среднем палеопротерозое в результате континентального рифтогенеза и спрединга образовался Лапландско-Кольский океан;

3) 1,98–1,91 млрд лет: субдукция коры Лапландско-Кольского океана с формированием островодужных комплексов (слагают Лапландский гранулитовый пояс, Умбинский и Терский террейны и частично террейны Инари и Стрельнинский), на заключительных стадиях, вероятно, проходит в режиме континентальной субдукции, в которую вовлечена литосфера БП;

4) 1,94–1,88 млрд лет: Лапландско-Кольская орогения как результат коллизии Мурманского и Карельского кратонов и совокупность тектоно-термальных процессов в Беломорской и Кольской провинциях;

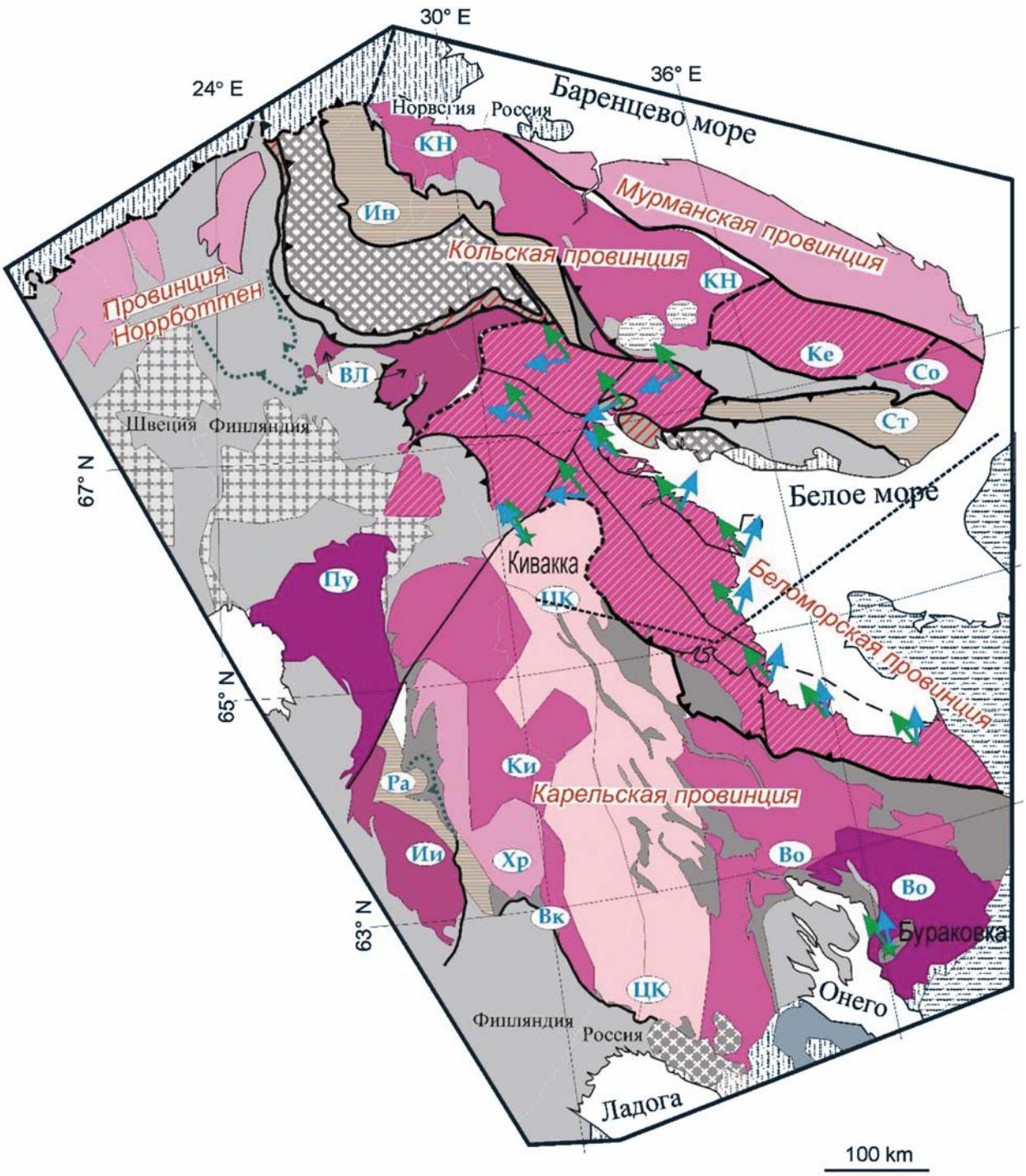
5) 1,89–1,75 млрд лет: постколлизионные процессы, коллапс Лапландско-Кольского коллизионного орогена, завершение эксгумации.

Для определения пространственного распределения вторичных (перемагничивающих) компонент намагниченности были детально изучены палеопротерозойские (2,40–2,45 млрд лет) габброиды [Stepanova et al., 2022] вдоль траверса Апатиты – Петрозаводск, который пересекает БП с северо-востока на юго-запад под острым углом, и в южном Беломорье на островах Онежской губы Белого моря между г. Беломорском на севере и г. Онега на юге (рис.). Полученные палеомагнитные направления сопоставлялись с таковыми для Киваккской и Бураковской расслоенных интрузий (2,45 млрд лет) и с Шальской дайкой (2,50 млрд лет) Карельского кратона [Mertanen et al., 2006; Shcherbakova et al., 2017; Lubnina et al., 2025]. Также для анализа использованы палеомагнитные данные, полученные ранее для объектов Кольской провинции [Fedotova et al., 1999].

Петро- и палеомагнитные исследования проводились в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова по стандартной методике [Храмов и др., 1982].

Во всех изученных палеопротерозойских габброидах БП установлены две метахронные компоненты намагниченности (рис.). Высокотемпературная компонента выделяется практически во всех объектах. В северной части эта компонента имеет запад-юго-западное склонение и умеренное положительное наклонение (рис.). Палеомагнитные полюсы, пересчитанные с направлений высокотемпературной компоненты на координаты точек отбора, для каждого объекта близки к палеомагнитному полюсу 2,10 млрд лет для Кольского блока [Fedotova et al., 1999; Lubnina et al., 2016]. В южной части БП склонение высокотемпературной компоненты меняется с запад-северо-западного на север-северо-восточное (рис.). Палеомагнитный полюс, пересчитанный с направления этой компоненты на координаты точек отбора, близок к полюсу 1,98–1,90 млрд лет для Карельского кратона [Lubnina et al., 2016; Лубнина и др., 2022].

Среднетемпературная компонента намагниченности имеет северо-западное склонение и умеренное положительное наклонение (рис.). Компонента монополярна. Для каждого объекта среднее направление имеет кучное распределение ($\alpha 95$ не превышает 5–7°), что свидетельствует о термовязкой природе этой компоненты намагниченности (образование происходит при быстром выводе пород на поверхность без изменения состава магнитной фракции). Палеомагнитный полюс, пересчитанный с направления среднетемпературной компоненты намагниченности, близок к полюсу «Свекофеннского перемагничивания» 1,86 млрд лет [Mertanen et al., 2006; Lubnina et al., 2025].



Направления выделенных компонент намагниченности на схеме геологического строения архея Фенноскандинавского щита [по: Слабунов и др., 2011].

Стрелками показаны склонения метахронных компонент намагниченности: голубая – высокотемпературной (1,98–1,95 млрд лет), зеленая – среднетемпературной (1,88 млрд лет). Буквами на схеме обозначены террейны: Вк – Виеки, ВЛ – Восточно-Лапландский, Во – Водлозерский, Ии – Иисалми, Ин – Инари, Ке – Кейвский, Ки – Кианта, КН – Кольско-Норвежский, Пу – Пудасъярвинский, Ра – Раутаваара, Со – Сосновский, Ст – Стрельнинский, Хр – Хиринсалми, ЦК – Центрально-Карельский

Directions of the separated magnetization components on the diagram of the geological structure of the Archean of the Fennoscandian Shield after [Slabunov et al., 2011].

Arrows show the declinations of the metachronous components of magnetization: blue – high-temperature (1.98–1.95 Ga), green – middle-temperature (1.88 Ga). The letters on the diagram indicate the terrains: Вк – Vieki, ВЛ – East-Laplandian, Во – Vodlozero, Ии – Iisalmi, Ин – Inari, Ке – Keiva, Ки – Kianta, КН – Kola-Norvegian, Пу – Pudasjarvi, Ра – Rautavaara, Со – Sosnovsky, Ст – Strel'na, Хр – Khirinsalmi, ЦК – Central Karelian

Таким образом, высокотемпературная компонента намагниченности формировалась, как можно полагать, в ходе палеопротерозойской континентальной субдукции пород БП. Различные ее направления в разных частях БП указывают на разное время эксгумации отдельных тектонических пластин. Образование среднетемпературной компоненты намагниченности произошло на завершающей коллизионной стадии формирования БП 1,86 млрд лет.

Литература

Балаганский В. В., Горбунов И. А., Мудрук С. В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 3. С. 5–11.

Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А., Писаревский С. А., Погарская И. А., Ржевский Ю. С., Родионов В. П., Слауцитайс И. П., Храмов А. Н. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.

Лубнина Н. В., Слабунов А. И., Степанова А. В., Нестерова Н. С. Беломорский подвижный пояс в составе суперконтинента Нуна/Колумбия: новые палеомагнитные и геологические данные // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 85–90. doi: 10.17076/geo1663

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 298 с.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика ранней Земли: основные проблемы и пути решения // Современные проблемы наук о Земле: Тезисы докл. всерос. науч. конф. М.: РАН, 2022. С. 62–63.

Слабунов А. И., Балаганский В. В., Щипанский А. А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 648–675. doi: 10.15372/GiG2021116

Слабунов А. И., Хелтта П., Шаров Н. В., Нестерова Н. С. 4-D модель формирования земной коры Фенноскандинавского щита в архее как синтез современных геологических данных // Геология Карелии: от архея до наших дней: Мат-лы конф., посвященной 50-летию ИГ КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2011. С. 13–21.

Fedotova M. A., Khramov A. N., Pisakin B. N., Priyatkin A. A. Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, eastern Fennoscandian Shield // Geop. J. Int. 1999. Vol. 137. P. 691–712. doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00817.x

Lahtinen R., Huhma H. A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen // Precambr. Res. 2019. Vol. 330. P. 1–19. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.022

Li X., Zhang L., Wei C., Zhang G. Orosirian cold eclogite from Baltica marks the onset of modern plate tectonics // Earth Planet. Sci. Lett. 2025. Vol. 663. Art. 119417. doi: 10.1016/j.epsl.2025.119417

Lubnina N. V., Bychkov A. Yu., Tarasov N. A., Osadchii V. O., Miklyaeva E. P. Stages of the Paleoproterozoic chemical remagnetization of the Kivakka layered intrusion and its geodynamic setting during the breakup of the Precambrian supercontinents // Moscow Univ. Geol. Bull. 2025. Vol. 80, no. 1. P. 17–27. doi: 10.3103/S0145875225700127

Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Bubnov A. Yu., Kosevich N. I., Novikova M. A., Tarasov N. A. The Paleoproterozoic remagnetization trend in rocks of the Belomorian Mobile Belt: paleomagnetic and geologic evidence // Moscow Univ. Geol. Bull. 2016. Vol. 71, no. 5. P. 311–322. doi: 10.3103/S0145875216050082

Mertanen S., Vuollo J. I., Huhma H., Arestova N. A., Kovalenko A. Early Paleoproterozoic–Archean dykes and gneisses in Russian Karelia of the Fennoscandian Shield – new paleomagnetic, isotope age and geochemical investigations // Precambr. Res. 2006. Vol. 144. P. 239–260.

Shcherbakova V. V., Lubnina N. V., Shcherbakov V. P., Zhidkov G. V., Tsel'movich V. A. Paleointensity determination on Paleoarchaean dikes within the Vodlozerskii Terrane of the Karelian Craton // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. Vol. 53, no. 5. P. 714–732. doi: 10.1134/S1069351317050111

Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N., Salnikova E. B., Samsonov A. V., Azimov P., Egorova S. V., Babarina I. I., Larionova Yu. O., Sukhanova M. A., Kervinen A. V., Maksimov O. A. Relicts of Palaeoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen // Geological Society, London, Special Publications. Large Igneous Provinces and their Plumbing Systems / Srivastava R. K., Ernst R. E., Buchan K. L., De Kock M. (eds). 2022. Vol. 518(1). P. 101–128. doi: 10.1144/SP518-2021-30

References

Balagansky V. V., Gorbunov I. A., Mudruk S. V. Paleoproterozoic Lapland-Kola and Svecofennian orogens (Baltic Shield). *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the Kola Scientific Center of RAS.* 2016;3:5–11. (In Russ.)

Fedotova M. A., Khramov A. N., Pisakin B. N., Priyatkin A. A. Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, eastern Fennoscandian Shield. *Geop. J. Int.* 1999;137:691–712. doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00817.x

Goncharov G. I., Komissarova R. A., Pisarevskii S. A., Pogarskaya I. A., Rzhevskii Yu. S., Rodionov V. P., Slautsitais I. P., Khramov A. N. Paleomagnetology. Leningrad: Nedra; 1982. 312 p. (In Russ.)

Lahtinen R., Huhma H. A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen. *Precambr. Res.* 2019;330:1–19. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.022

Li X., Zhang L., Wei C., Zhang G. Orosirian cold eclogite from Baltica marks the onset of modern plate tectonics. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2025;663:119417. doi: 10.1016/j.epsl.2025.119417

Lubnina N. V., Bychkov A. Yu., Tarasov N. A., Osadchii V. O., Miklyaeva E. P. Stages of the Paleoproterozoic chemical remagnetization of the Kivakka layered intrusion and its geodynamic setting during the breakup of the Precambrian supercontinents. *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2025;80(1):17–27. doi: 10.3103/S0145875225700127

Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Bubnov A. Yu., Kosevich N. I., Novikova M. A., Tarasov N. A. The Paleoproterozoic remagnetization trend in rocks of the Belomorian Mobile Belt: paleomagnetic and geologic evidence. *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2016;71(5):311–322. doi: 10.3103/S0145875216050082

Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Nesterova N. S. Belomorian Mobile Belt as a part of supercontinent Nuna/Columbia: new paleomagnetic and geological data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2022;5:85–90. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1663

Mertanen S., Vuollo J. I., Huhma H., Arestova N. A., Kovalenko A. Early Paleoproterozoic–Archean dykes and gneisses in Russian Karelia of the Fennoscandian Shield – new paleomagnetic, isotope age and geochemical investigations. *Precambr. Res.* 2006;144:239–260.

Shcherbakova V. V., Lubnina N. V., Shcherbakov V. P., Zhidkov G. V., Tsel'movich V. A. Paleointensity determination on Paleoarchaean dikes within the Vodlozerskii Terrane of the Karelian Craton. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017;53(5):714–732. doi: 10.1134/S1069351317050111

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the Archean mobile belts (on the example of the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 298 p. (In Russ.)

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the Early Earth: main problems and solutions. *Sovremennye problemy nauk o Zemle: Tezisy dokl. vseros. nauch. konf. = Modern problems of Earth Sciences: Proceedings of the All-Russian conf.* Moscow: RAN; 2022. P. 62–63. (In Russ.)

Slabunov A. I., Balagansky V. V., Schipansky A. A. MesoArchean-Paleoproterozoic evolution of the Earth crust of the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield and tectonic position of the eclogites. *Russian Geology and Geophysics.* 2021;62(5):525–546. doi: 10.2113/RGG20204266

Slabunov A. I., Höltta P., Sharov N. V., Nesterova N. S. 4-D model of formation of the Earth's crust of the Fennoscandian Shield in the Archean as a synthesis of modern geological data. *Geologiya Karelii: ot arkheya do nashikh dnei: Mat-ly konf., posvyashch. 50-letiyu IG KarNTs RAN = Geology of Karelia: from the Archean to the present day: Proceedings of the conf., dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Geology KarRC RAS*. Petrozavodsk; 2011. P. 13–21. (In Russ.)

Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N., Salnikova E. B., Samsonov A. V., Azimov P., Egorova S. V., Babarina I. I., Larionova Yu. O., Sukhanova M. A., Kervinen A. V., Maksimov O. A. Relicts of Palaeoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogeny. *Geological Society, London, Special Publications. Large Igneous Provinces and their Plumbing Systems.* 2022;518(1):101–128. doi: 10.1144/SP518-2021-30

Поступила в редакцию / received: 28.07.2025; принята к публикации / accepted: 08.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лубнина Наталия Валерьевна
д-р геол.-мин. наук, профессор
e-mail: lubninanv@my.msu.ru

Слабунов Александр Иванович
д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геологии и геодинамики докембрия
e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

Степанова Александра Владимировна
канд. геол.-мин. наук, заместитель директора по НИР, ведущий научный сотрудник
e-mail: stepanov@krc.karelia.ru

Воронцова Валентина Павловна
аспирант
e-mail: val_nett@mail.ru

Нестерова Наталья Сергеевна
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: nest345@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Lubnina Natalia
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor

Slabunov, Alexander
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Chief Researcher

Stepanova, Alexandra
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Deputy Director, Leading Researcher

Vorontsova, Valentina
Doctoral Student

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

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 104–108
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 104–108
DOI: 10.17076/geo2180

УДК 552.543 : 551.72 (470.21-22)

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ВОЗРАСТА ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

П. В. Медведев*, Н. И. Кондрашова, А. В. Лютиков

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

Представлены результаты литологического, геохимического и палеонтологического изучения палеопротерозойских карбонатных пород восточной части Фенноскандинавского щита на примере двух крупных палеобассейнов Карельского кратона: Онежского на юго-востоке и Пана-Куолаярвинского на северо-западе. Максимум карбонатонакопления на востоке Фенноскандинавского щита в палеопротерозое приходится на интервал 2,1–2,0 млрд лет назад. Подавляющее большинство карбонатных пород приурочено к онежскому (ятулийский надгоризонт) и низам заонежского (людиковийский надгоризонт) горизонта региональной стратиграфической шкалы. Характерными особенностями ятулийских осадочных карбонатов являются их красноцветность, сохранившиеся сульфаты и хлориды, а также различные псевдоморфозы по ним, обилие разнообразных микробиалитов и обогащение тяжелым изотопом углерода ^{13}C. Для людиковийских карбонатных пород характерны сероцветность, отсутствие эвапоритовых минералов, немногочисленные микробиалиты и незначительное отклонение изотопного состава углерода от среднеморских значений. На спектрах распределения редкоземельных элементов в карбонатных породах ятулийского возраста из Онежского палеобассейна отчетливо проявлена отрицательная аномалия Ce разной интенсивности, что указывает на окислительную среду с переменным содержанием кислорода. В Пана-Куолаярвинском палеобассейне содержание кислорода было стабильным, но более низким. При этом и в Онежском, и в Пана-Куолаярвинском палеобассейнах содержание кислорода держалось у границы перехода от дизоксидных к окислительным условиям. Положительная европиевая аномалия в породах обоих бассейнов свидетельствует о привносе гидротермального материала в область седиментации, не исключено и поступление пирокластического материала основного состава. Результаты мультидисциплинарных геологических исследований не противоречат, а дополняют друг друга. На основании комплекса данных, включая и изотопно-геохимические, сделаны выводы о фациальных условиях карбонатонакопления, происходившего на данной территории около 2,0 млрд лет назад. Показана эволюция карбонатонакопления в интракратонных бассейнах от эвапоритовых мелководных условий в ятулийское время к относительно глубоководным открытоморским с усилением вулканической активности в людиковии.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит; палеопротерозой; карбонатные породы; литология; геохимия; условия седиментации; микробиалиты

Для цитирования: Медведев П. В., Кондрашова Н. И., Лютиков А. В. Результаты комплексного исследования карбонатных пород палеопротерозойского возраста Восточной Фенноскандии // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 104–108. doi: 10.17076/geo2180

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Петрозаводск) по теме НИР FMEN-2023-0009.

P. V. Medvedev*, N. I. Kondrashova, A. V. Lyutikov. RESULTS OF A COMPREHENSIVE STUDY OF PALEOPROTEROZOIC CARBONATE ROCKS IN EASTERN FENNOSCANDIA

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

We present the main results of the lithological, geochemical, and paleontological study of Paleoproterozoic carbonate rocks of the eastern part of the Fennoscandian Shield. The maximum carbonate accumulation in the east of the Fennoscandian Shield during the Paleoproterozoic occurred in the range of 2.1–2.0 billion years ago. The vast majority of carbonate rocks are confined to the Onegian (Jatulian superhorizon) and low part of the Zaonezhsky (Ludikovian superhorizon) horizons of the regional stratigraphic scale. A case study of two large paleobasins on the Karelian Craton, the Onegian in the southeast and the Pana-Kuolajarvian in the northwest, reveals that the results of the multidisciplinary geological approach do not contradict, but complement each other. The characteristic features of the Jatulian sedimentary carbonates are their redness, preserved sulfates and chlorides, as well as various pseudomorphoses after them, an abundance of various microbialites and enrichment with the heavy carbon isotope ^{13}C. The Ludikovian carbonate rocks have gray color, contain no evaporite minerals, few microbialites, and slightly deviate in the carbon isotopic composition from the sea-average values. The distribution spectra of rare earth elements in carbonate rocks of Jatulian age from the Onegian paleobasin clearly show a negative Ce anomaly of varying intensity, indicating an oxidizing environment with variable oxygen content. The oxygen content in the Pana-Kuolajarvian paleobasin was stable, but lower. At the same time, in both the Onegian and Pana-Kuolajarvian paleobasins, the oxygen content remained transitional from dysoxic to oxic conditions. The positive Eu anomaly in rocks of both basins indicates hydrothermal material input to the sedimentation area, and entry of basic pyroclastic material is possible. Based on the whole dataset, including isotopic and geochemical data, we draw conclusions regarding the carbonate deposition environments that occurred in this area in the time range of 2.1–2.0 billion years ago. Carbonate accumulation in intracratonic basins evolved from evaporitic shallow-water conditions in the Jatulian time to a relatively deep, open marine environment with increased volcanic activity in the Ludikovian.

Keywords: Fennoscandian shield; Paleoproterozoic; carbonate rocks; lithology; geochemistry; sedimentation conditions; microbialites

For citation: Medvedev P. V., Kondrashova N. I., Lyutikov A. V. Results of a comprehensive study of Paleoproterozoic carbonate rocks in Eastern Fennoscandia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 104–108. doi: 10.17076/geo2180

Funding. Financial support for the research was provided from the federal budget to fulfill state assignment to KarRC RAS (Petrozavodsk) within the theme FMEN-2023-0009.

Максимум карбонатонакопления на востоке Фенноскандинавского щита в палеопротерозое приходится на интервал 2,1–2,0 млрд лет назад. Подавляющее большинство карбонатных пород приурочено к онежскому (ятулийский надгоризонт) и низам заонежского (людиковийский надгоризонт) горизонта региональной стратиграфической шкалы [Общая..., 2002].

Наиболее крупные фрагменты палеобассейнов карбонатной седиментации сохранились на юго-востоке и северо-западе Карельского кратона. Это соответственно Северо-Онежский и Пана-Куолаярвинский синклинории.

Северо-Онежский синклинорий охватывает северо-западную часть Онежского озера и прилегающие территории, являясь самой крупной палеопротерозойской структурой Восточной Фенноскандии [Онежская..., 2011]. Мощность карбонатных пород (преимущественно доломитов) здесь составляет около 800 м. Их изотопный возраст, определенный Pb-Pb-методом, равен 2090 ± 70 млн лет [Овчинникова и др., 2007]. Пана-Куолаярвинский синклинорий, общей площадью около 7,5 тыс. км^2, занимает северо-западную часть Карельского кратона, расположен на стыке Беломорского подвижного пояса (с востока и северо-востока), Карельского кратона (на юге) и выступа Свекофеннского складчатого пояса (на западе) [Куликов, Куликова, 2014].

Карбонатные породы онежского горизонта ятулия формировались в мелководных условиях, часто с расчлененной топографией морского дна и существованием эвапоритовых обстановок осадконакопления [Melezhik et al., 2005, 2015]. Указанием на высокую скорость испарения в Онежском палеобассейне являются находки доломитовых и кварцевых псевдоморфоз по соли и гипсу – ангидриту, находки ангидрита и галита в ятулийских осадочных породах. Псевдоморфозы замещения по гипсу и ангидриту с реликтами первичных минералов описаны в палеопротерозойских карбонатных породах Печенги (куэтсъярвинская и колайокская свиты) и Имандра-Варзуги (умбинская свита) на Кольском полуострове, а также в Финляндии (свита Рантамаа в сланцевом поясе Перепохья [Strauss et al., 2013].

Множество и разнообразие микробиалитов (строматолитов, онколитов и др.) в верхнеятулийских и нижнелюдиковийских карбонатных породах послужило основой для выявления закономерностей в их стратиграфическом и латеральном распределении. В результате выделены как стратиграфические единицы в разрезе онежского горизонта ятулия в ранге слоев с Lithophyta, так и строматолитовые провинции на территории Карельского кратона [Макарихин и др., 2007].

Изотопные данные по углероду и кислороду онежских карбонатных пород не противоречат выводам, сделанным на основе литологических данных. Самый значительный в истории Земли положительный экскурс $\delta^{13}C$, зафиксированный в осадочных карбонатах, известен как Ломагунди-Ятулийское изотопное событие. В настоящее время нет консенсуса о причинах этого события [Hodgskiss et al., 2023]. Возможна существенная роль таких локальных факторов, как бурное развитие микробиальных сообществ, формирующих строматолиты в частично замкнутых мелководных водоемах при эвапоритовых условиях, высокая биопродуктивность, повышенное поглощение легкого изотопа углерода ^{12}C и одновременная переработка органического вещества в цианобактериальных матах в 2–3-кратном усилении глобального сигнала [Melezhik et al., 1999]. Понимание причинно-следственных связей Ломагунди-ятулийского события с другими глобальными палеоэкологическими изменениями в палеопротерозое остается неполным. На востоке Фенноскандинавского щита карбонатные породы, обогащенные ^{13}C, известны в разрезах умбинской свиты (Имандра-Варзуга, $\delta^{13}C$ = 3,2 ± 2,1 ‰), куэтсъярвинской свиты (Печенга, $\delta^{13}C$ = 7,4 ± 0,7 ‰), а также в мощных карбонатных отложениях туломозерской свиты (Онежский палеобассейн, $\delta^{13}C$ = ca. 10 ‰) [Melezhik et al., 2013]. Наиболее высокие значения $\delta^{13}C_{карб}$ приурочены к эвапоритовым прибрежно-морским фациям с обилием цианобактериальных построек (строматолитов и онколитов) [Prave et al., 2022]. Это характерно для бассейнов центральной и южной частей Карельского кратона, в то время как на северо-западе карбонатонакопление происходило в открытоморских условиях. При этом в верхах карбонатных разрезов величина $\delta^{13}C_{карб}$ составляет в среднем 4 ‰ [Melezhik, Fallick, 1996]. Смена мелководных эвапоритовых фаций более глубоководными открытоморскими при переходе от ятулия к людиковию подтверждается и значениями Sr/Sr-отношений [Горохов и др., 1998].

Полученные нами геохимические характеристики карбонатных пород приводят к таким же выводам об условиях осадконакопления [Kondrashova et al., 2025]. На спектрах распределения редкоземельных элементов в карбонатных породах ятулийского возраста из Онежского палеобассейна отчетливо проявлена отрицательная аномалия Ce разной интенсивности, что указывает на окислительную среду с переменным содержанием кислорода. В Пана-Куолаярвинском палеобассейне содержание кислорода было стабильным, но более низким. При этом и в Онежском, и в Пана-Куолаярвинском палеобассейнах содержание кислорода держалось у границы перехода от дизоксидных к окислительным условиям. Европиевая аномалия положительна в породах обоих палеобассейнов. Традиционно ее объясняют привносом гидротермального материала в область седиментации, не исключено и поступление пирокластического материала основного состава.

На востоке Фенноскандинавского щита в палеопротерозое (от ятулия к людиковию) происходило увеличение площади и углубление бассейнов карбонатонакопления, что отражается в постепенной смене вверх по разрезу песчанистых доломитов глинистыми разностями вплоть до появления мергелей. Одновременно увеличивалось поступление эндогенного, возможно туфогенного, материала, что указывает на возрастание магматической активности к людиковию.

Литература

Горохов И. М., Кузнецов А. Б., Мележик В. А., Константинова Г. В., Мельников Н. Н. Изотопный состав стронция в верхнеятулийских доломитах туломозерской свиты, Юго-Восточная Карелия // ДАН. 1998. Т. 360, № 4. С. 533–536.

Куликов В. С., Куликова В. В. Куолаярвинский синклинорий: новый взгляд на геологическое строение и сводный разрез // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 1. С. 28–38.

Макарихин В. В., Медведев П. В., Рычанчик Д. В. Роль биотического фактора в ятулийском седиментогенезе // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения Северо-Запада России: Мат-лы Всерос. конференции (Петрозаводск, 12–15 ноября 2007 г.). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. С. 241–245.

Общая стратиграфическая шкала нижнего докембрия России. Объяснительная записка / Науч. ред. Ф. П. Митрофанов, В. З. Негруца. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 13 с.

Овчинникова Г. В., Кузнецов А. Б., Мележик В. А., Горохов И. М., Васильева И. М., Гороховский Б. М. Pb-Pb возраст ятулийских карбонатных пород: туломозерская свита юго-восточной Карелии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2007. Т. 15. № 4. С. 20–33.

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.

Hodgskiss M. S. W., Crockford P. W., Turchyn A. V. Deconstructing the Lomagundi-Jatuli carbon isotope excursion // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2023. Vol. 51, no. 1. P. 301–330. doi: 10.1146/annurev-earth-031621-071250

Kondrashova N. I., Medvedev P. V., Lyutikov A. V. Assessment of the conditions of carbonate rock formation on the Karelian Craton in the Paleoproterozoic based on geochemical data // Lithology and Mineral Resources. 2025. Vol. 60, no. 1. P. 90–113. doi: 10.1134/S0024490224700792

Melezhik V. A., Fallick A. E. A widespread positive $\delta^{13}C_{carb}$ anomaly at around 2.33–2.06 Ga on the Fennoscandian Shield: a paradox? // Terra Nova. 1996. No. 8. P. 141–157. doi: 10.1111/j.1365-3121.1996.tb00738.x

Melezhik V. A., Fallick A. E., Brasier A. T., Lepland A. Carbonate deposition in the Palaeoproterozoic Onega basin from Fennoscandia: a spotlight on the transition from the Lomagundi-Jatuli to Shunga events // Earth-Sci. Rev. 2015. Vol. 147. P. 65–98. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.05.005

Melezhik V. A., Fallick A. E., Martin A. P., Condon D. J., Kump L. R., Brasier A. T., Salminen P. E. The Palaeoproterozoic perturbation of the global carbon cycle: the Lomagundi-Jatuli isotopic event // Reading the archive of Earth's oxygenation. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences. Vol. 3. Heidelberg: Springer, 2013. P. 1111–1150.

Melezhik V. A., Fallick A. E., Medvedev P. V., Makarikhin V. V. Extreme $^{13}C_{carb}$ enrichment in ca. 2.0 Ga magnesite-stromatolite-dolomite – "red beds" association in a global context: a case for the worldwide signal enhanced by a local environment // Earth-Sci. Rev. 1999. Vol. 48. P. 71–120. doi: 10.1016/s0012-8252(99)00044-6

Melezhik V. A., Fallick A. E., Rychanchik D. V., Kuznetsov A. B. Palaeoproterozoic evaporites in Fennoscandia: implications for seawater sulphate, the rise of atmospheric oxygen and local amplification of the $\delta^{13}C$ excursion // Terra Nova. 2005. Vol. 17(2). P. 141–148. doi: 10.1111/j.1365-3121.2005.00600.x

Prave A. R., Kirsimae K., Lepland A., Fallick A. E., Kreitsmann T., Deines Y. E., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Medvedev P. V., Moussavou M., Bakakas K., Hodgskiss M. S. W. The grandest of them all: the Lomagundi–Jatuli Event and Earth's oxygenation // J. Geol. Soc. 2022. Vol. 179. doi: 10.1144/jgs2021- 036

Strauss H., Melezhik V. A., Reuschel M., Fallick A. E., Lepland A., Rychanchik D. V. Abundant marine calcium sulphates: radical change of seawater sulphate reservoir and sulphur cycle // Reading the archive of Earth's oxygenation. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences. Vol. 3. Heidelberg: Springer, 2013. P. 1169–1194.

References

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

Gorokhov I. M., Kuznetsov A. B., Melezhik V. A., Konstantinova G. V., Mel'nikov N. N. Sr isotopic composition in the Upper Jatulian (Early Paleoproterozoic) dolomites of the Tulomozero formation, southeastern Karelia. *Doklady Earth Sciences.* 1998;360(4):533–536. (In Russ.)

Hodgskiss M. S. W., Crockford P. W., Turchyn A. V. Deconstructing the Lomagundi-Jatuli carbon isotope excursion. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2023;51(1): 301–330. doi: 10.1146/annurev-earth-031621-071250

Kondrashova N. I., Medvedev P. V., Lyutikov A. V. Assessment of the conditions of carbonate rock formation on the Karelian Craton in the Paleoproterozoic based on geochemical data. *Lithology and Mineral Resources.* 2025;60(1):90–113. doi: 10.1134/S0024490224700792

Kulikov V. S., Kulikova V. V. Kuolajarvi synclinorium: a new concept of geological structure and composite section. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*

= *Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2014;1:28–38. (In Russ.)

Makarikhin V. V., Medvedev P. V., Rychanchik D. V. Role of the biotic factor in the Jatulian sedimentogenesis. *Geodinamika, magmatizm, sedimentogenez i minerageniya Severo-Zapada Rossii: Materialy Vseros. konf. (Petrozavodsk, 12-15 noyabr. 2007 g.) = Geodynamics, magmatism, sedimentogenesis, and minerageny in NW Russia: Proceedings of all-Russian conf. (Petrozavodsk, Nov. 12-15, 2007).* Petrozavodsk; 2007. P. 241–245. (In Russ.)

Melezhik V. A., Fallick A. E. A widespread positive $\delta^{13}C_{carb}$ anomaly at around 2.33–2.06 Ga on the Fennoscandian Shield: a paradox? *Terra Nova.* 1996;8: 141–157. doi: 10.1111/j.1365-3121.1996.tb00738.x

Melezhik V. A., Fallick A. E., Brasier A. T., Lepland A. Carbonate deposition in the Palaeoproterozoic Onega basin from Fennoscandia: a spotlight on the transition from the Lomagundi-Jatuli to Shunga events. *Earth-Sci. Rev.* 2015;147:65–98. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.05.005

Melezhik V. A., Fallick A. E., Martin A. P., Condon D. J., Kump L. R., Brasier A. T., Salminen P. E. The Palaeoproterozoic perturbation of the global carbon cycle: the Lomagundi-Jatuli isotopic event. *Reading the archive of Earth's oxygenation. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences*. Vol. 3. Heidelberg: Springer; 2013. P. 1111–1150.

Melezhik V. A., Fallick A. E., Medvedev P. V., Makarikhin V. V. Extreme $^{13}C_{carb}$ enrichment in ca. 2.0 Ga magnesite-stromatolite-dolomite – "red beds" association in a global context: a case for the worldwide signal enhanced by a local environment. *Earth-Sci. Rev.* 1999;48:71–120. doi: 10.1016/s0012-8252 (99)00044-6

Melezhik V. A., Fallick A. E., Rychanchik D. V., Kuznetsov A. B. Palaeoproterozoic evaporites in Fennoscandia: implications for seawater sulphate, $\delta^{13}C$ excursions and the rise of atmospheric oxygen. *Terra Nova.* 2005; 17:141–148. doi: 10.1111/j.1365-3121.2005.00600.x

Mitrofanov F. P., Negrutsa V. Z. (eds.) General stratigraphic scale of the Lower Precambrian in Russia: an explanatory note. Apatity: KNTs RAN; 2002. 13 p. (In Russ.)

Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Melezhik V. A., Gorokhov I. M., Vasil'eva I. M., Gorokhovsky B. M. Pb–Pb age of Jatulian carbonate tocks: the Tulomozero formation of Southeast Karelia. *Stratigr. Geol. Correl.* 2007;15(4):359–372. doi: 10.1134/S0869593807040028

Prave A. R., Kirsimae K., Lepland A., Fallick A. E., Kreitsmann T., Deines Y. E., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Medvedev P. V., Moussavou M., Bakakas K., Hodgskiss M. S. W. The grandest of them all: the Lomagundi-Jatuli Event and Earth's oxygenation. *J. Geol. Soc.* 2022;179(1). doi: 10.1144/jgs2021- 036

Strauss H., Melezhik V. A., Reuschel M., Fallick A. E., Lepland A., Rychanchik D. V. Abundant marine calcium sulphates: radical change of seawater sulphate reservoir and sulphur cycle. *Reading the archive of Earth's oxygenation. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences.* Vol. 3. Heidelberg: Springer; 2013. P. 1169–1194.

Поступила в редакцию / received: 01.08.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Медведев Павел Владимирович
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: pmedved@krc.karelia.ru

Кондрашова Наталья Ивановна
канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник
e-mail: kondr@krc.karelia.ru

Лютиков Андрей Викторович
младший научный сотрудник
e-mail: andrew-greener@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

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

Kondrashova, Natalya
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher

Lyutikov, Andrey
Junior Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 109–113
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 109–113
DOI: 10.17076/geo2160

УДК 551.71

МЕЗО- И НЕОАРХЕЙСКИЕ КИСЛЫЕ ВУЛКАНИТЫ ГИМОЛЬСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

Н. С. Нестерова*, А. И. Слабунов

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *nest345@gmail.com*

Гимольский зеленокаменный пояс (ГЗП) расположен в центральной части Карельского кратона Фенноскандинавского щита. Слагающие его вулканогенные и осадочные породы гимольской серии рассматриваются как стратотип вулканогенно-осадочного разреза верхнего лопия (неоархея) Центральной Карелии. Зеленокаменный комплекс ГЗП с угловым несогласием перекрывается палеопротерозойскими (сумийскими, ятулийскими) образованиями. Полученные оригинальные геологические и геохронологические данные позволяют предложить новую модель стратификации зеленокаменного комплекса ГЗП. В наименовании новых стратиграфических единиц максимально сохраняются уже имеющиеся названия. Гимольский зеленокаменный пояс, как полагают авторы, состоит из трех стратотектонических ассоциаций (СТА): гимолоозерской, межезерской и суккозерской. По результатам изотопного датирования цирконов (LA-ICP-MS) из кислых вулканитов показано, что возраст андезитов межезерской СТА – 2824 ± 3 млн лет, андезибазальтов, переслаивающихся с полимиктовыми конгломератами, – 2752 ± 2,4 млн лет. Неоархейские кислые вулканиты были и раньше известны в составе ГЗП, но теперь впервые установлены и мезоархейские. Западный борт ГЗП слагают базальты гимолоозерской СТА. По особенностям химического и изотопного состава эти метабазальты аналогичны основным породам коматиит-базальтовой толщи контокской серии Костомукшского зеленокаменного пояса. Таким образом, впервые получен набор геохронологических и геологических данных, который позволяет обосновать выделение в составе ГЗП трех СТА: 1) гимолоозерской, базальтовой (наиболее вероятно, мезоархейской); 2) межезерской, сложенной андезитами с прослоями BIF и углеродистых сланцев, возраст которой оценивается как мезоархейский (2,82–2,81 млрд лет); 3) суккозерской, сложенной андезибазальт-андезитами с линзами конгломератов, имеющей неоархейский (2,76–2,74 млрд лет) возраст.

Ключевые слова: Гимольский зеленокаменный пояс; Карельский кратон; Фенноскандинавский щит; кислый вулканизм; неоархей; мезоархей

Для цитирования: Нестерова Н. С., Слабунов А. И. Мезо- и неоархейские кислые вулканиты Гимольского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 109–113. doi: 10.17076/geo2160

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2023-0009).

N. S. Nesterova*, A. I. Slabunov. MESO-NEOARCHEAN FELSIC VOLCANICS OF THE GIMOLY GREENSTONE BELT, KARELIAN CRATON, FENNOSCANDIAN SHIELD

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *nest345@gmail.com*

The Gimoly Greenstone Belt (GGB) is located in the central Karelian Craton on the Fennoscandian Shield. The volcanogenic and sedimentary rocks of the Gimoly Group are interpreted as a stratotype of an Upper Lopian (Neoarchean) volcano-sedimentary rock sequence in Central Karelia. The GGB's granite-greenstone complex is overlain with angular unconformity by Paleoproterozoic (Sumian, Jatulian) rocks. We propose a new model for the stratification of the GGB's greenstone complex based on original geological and geochronological data. New stratigraphic units are given the older names that are already in use. The authors assume that the Gimoly Greenstone Belt consists of three stratotectonic associations (STA): Gimolozero, Mezhozero, and Sukkozero. Isotopic dating of zircons (LA-ICP-MS) from felsic volcanics shows that the age of 1) andesites from the Mezhozero STA is 2824 ± 3 Ma, and 2) that of andesite-basalts interbedded with polymictic conglomerates is 2752 ± 2.4 Ma. Neoarchean felsic volcanics have been known as part of the GGB previously, but their Mesoarchean counterparts have been found for the first time. GGB's western flank consists of Gimolozero STA's basalts. These metabasalts are similar in chemical and isotopic composition to the mafic rocks occurring in the komatiitic-basaltic sequence of the Kontokki Group of the Kostomuksha Greenstone Belt. Thus, the new geochronological and geological data can now be used for differentiating three STAs in the GGB 1) the Gimolozero basaltic (most probably Mesoarchean) STA, 2) The Mezhozero STA made up of andesites and interrbedded with BIF and carbonaceous schists dated as Mesoarchean (2.82–2.81 Ga), and 3) the Sukkozero STA composed of andesite basalt-andesites with conglomerate lenses of Neoarchean (2.76–2.74 Ga) age.

Keywords: Gimoly Greenstone Belt; Karelian Craton; Fennoscandian Shield; felsic volcanics; Neoarchean; Mesoarchean

For citation: Nesterova N. S., Slabunov A. I. Meso-Neoarchean felsic volcanics of the Gimoly greenstone belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 109–113. doi: 10.17076/geo2160

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (FMEN-2023-0009).

Гимольский зеленокаменный пояс (ГЗП) расположен в центральной части Карельского кратона Фенноскандинавского щита (рис. 1). Он сложен, как представляется [Чернов и др., 1970; Егорова и др., 2025 и ссылки в ней], породами гимольской серии и является стратотипом вулканогенно-осадочного разреза верхнего лопия (неоархея) Центральной Карелии. Зеленокаменный комплекс ГЗП с угловым несогласием перекрывается протерозойскими (сумийскими, ятулийскими) образованиями.

В строении гимольской серии исторически выделяются суккозерская, костомукшская, межезерская и кадиозерская свиты [Чернов и др., 1970 и др.]. По составу и строению эти свиты не всегда четко различаются, поэтому их выделение несколько условно. При этом стратиграфическое положение и возраст пород гимольской серии, в том числе в ГЗП, до сих пор остаются дискуссионными [Егорова и др., 2025].

Проведенные в 2022–2024 гг. исследования [Слабунов и др., 2024] позволяют выделить в составе стратотектонического разреза ГЗП следующие стратотектонические ассоциации (СТА), или свиты – гимолоозерскую, межезерскую и суккозерскую.

Гимолоозерская СТА представлена метабазальтами и слагает западный борт ГЗП (рис. 1). По особенностям химического и изотопного состава эти метабазальты аналогичны основным породам коматиит-базальтовой толщи контокской серии Костомукшского зеленокаменного пояса, в т. ч. по положительным значениям $\varepsilon Nd_{(2800)}$ (от +1,6 до +3).

Межезерская СТА представлена метаморфизованными лавами и туфами андезитов, с которыми переслаиваются полосчатые железистые кварциты и углеродистые сланцы. Эти породы слагают восточный борт ГЗП (рис. 1). Результаты изотопного датирования цирконов (LA-ICP-MS) из андезитов показали, что их U-Pb-возраст оценивается в 2824 ± 3 млн лет (рис. 2, а).

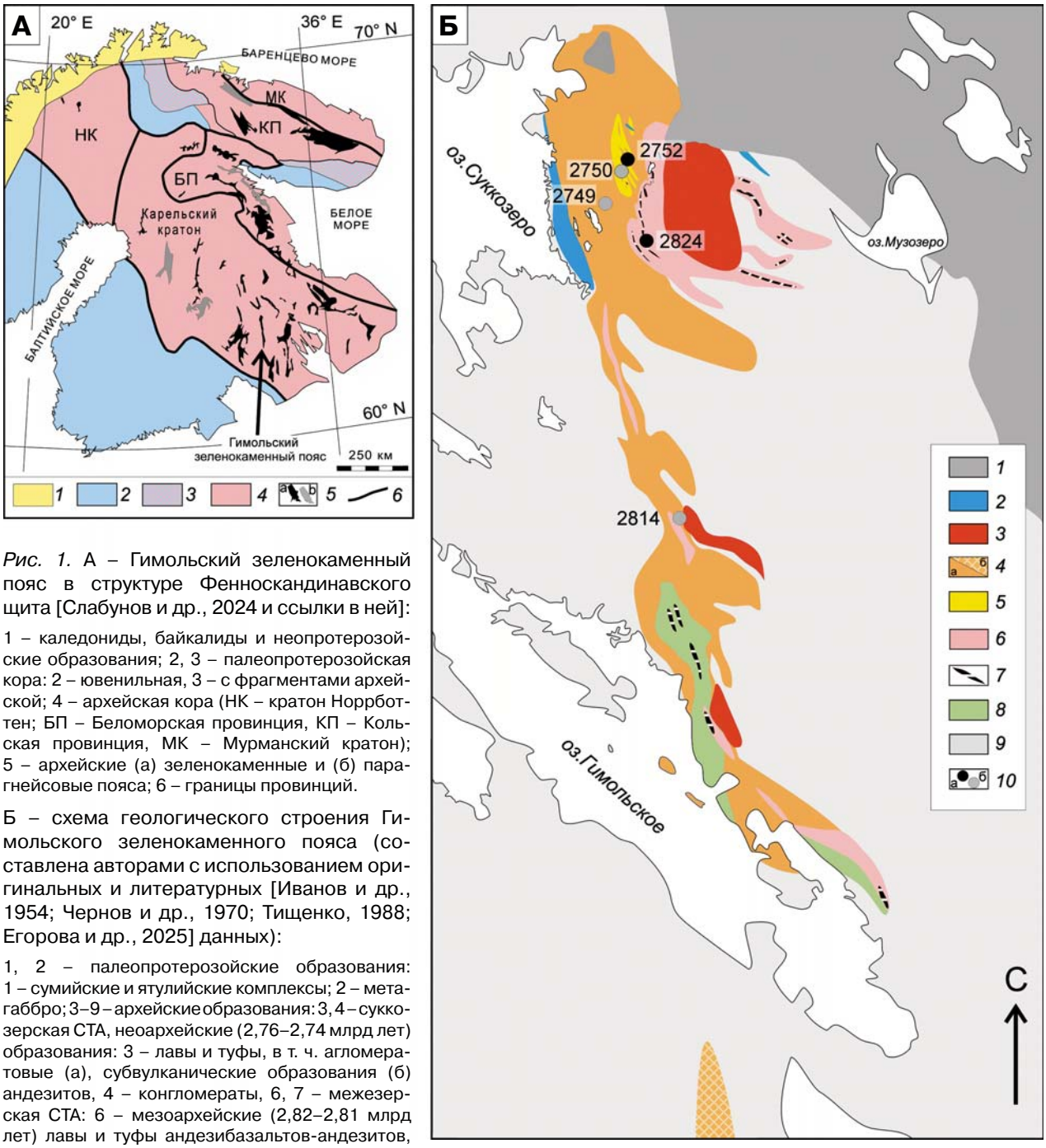


Рис. 1. А – Гимольский зеленокаменный пояс в структуре Фенноскандинавского щита [Слабунов и др., 2024 и ссылки в ней]:

1 – каледониды, байкалиды и неопротерозойские образования; 2, 3 – палеопротерозойская кора: 2 – ювенильная, 3 – с фрагментами архейской; 4 – архейская кора (НК – кратон Норрботтен; БП – Беломорская провинция, КП – Кольская провинция, МК – Мурманский кратон); 5 – архейские (а) зеленокаменные и (б) парагнейсовые пояса; 6 – границы провинций.

Б – схема геологического строения Гимольского зеленокаменного пояса (составлена авторами с использованием оригинальных и литературных [Иванов и др., 1954; Чернов и др., 1970; Тищенко, 1988; Егорова и др., 2025] данных):

1, 2 – палеопротерозойские образования: 1 – сумийские и ятулийские комплексы; 2 – метагаббро; 3–9 – архейские образования: 3, 4 – сукозерская СТА, неоархейские (2,76–2,74 млрд лет) образования: 3 – лавы и туфы, в т. ч. агломератовые (а), субвулканические образования (б) андезитов, 4 – конгломераты, 6, 7 – межезерская СТА: 6 – мезоархейские (2,82–2,81 млрд лет) лавы и туфы андезибазальтов-андезитов, 7 – полосчатые железистые кварциты, 8 – Гимолоозерская СТА, мезоархейские метабазальты, 9 – гранитоиды ТТГ-ассоциации; 10 – места отбора геохронологических проб и их возраст (в млн лет): настоящее исследование (а), по: Левченков и др., 2000; Кучеровский и др., 2023, 2024 (б)

Fig. 1. А – Gimoly Greenstone Belt in the Fennoscandian Shield's structure [Slabunov et al., 2024 and references therein].

1 – Caledonides, Baikalides and Neoproterozoic rocks; 2, 3 – Paleoproterozoic earth crust: 2 – juvenile, 3 – with fragments of Archean crust; 4 – Archean earth crust (НК – Norrbotten Craton; БП – Belomorian Province, КП – Kola Province, МК – Murmansk Craton); 5 – Archean greenstone (a) and paragneiss (б) belts; 6 – boundaries of provinces.

Б – Schematic geological map of the Gimoly Greenstone Belt (made up by the authors using original data and the data after [Ivanov et al., 1954; Chernov et al., 1970; Tishchenko, 1988; Egorova et al., 2025]:

1, 2 – Paleoproterozoic earth crust: 1 – Sumian and Jatulian complexes, 2 – metagabbro; 3–9 – Archean earth crust: 3, 4 – Sukkozero STA (2.76–2.74 Ga): 3 – lavas and tuffs, including agglomerate (a), subvolcanic (б) of andesites, 4 – conglomerate, 6, 7 – Mezhozero STA: 6 – Mesoarchean (2.82–2.81 Ga) lavas and tuffs of andesite-basalts-andesites, 7 – banded iron formation, 8 – Gimolozero STA, Mesoarchean metabasalts, 9 – TTG granitoids; 10 – locations of geochronological samples and age (Ma): this study (a), Levchenkov et al., 2000; Kucherovsky et al., 2023, 2024 (б)

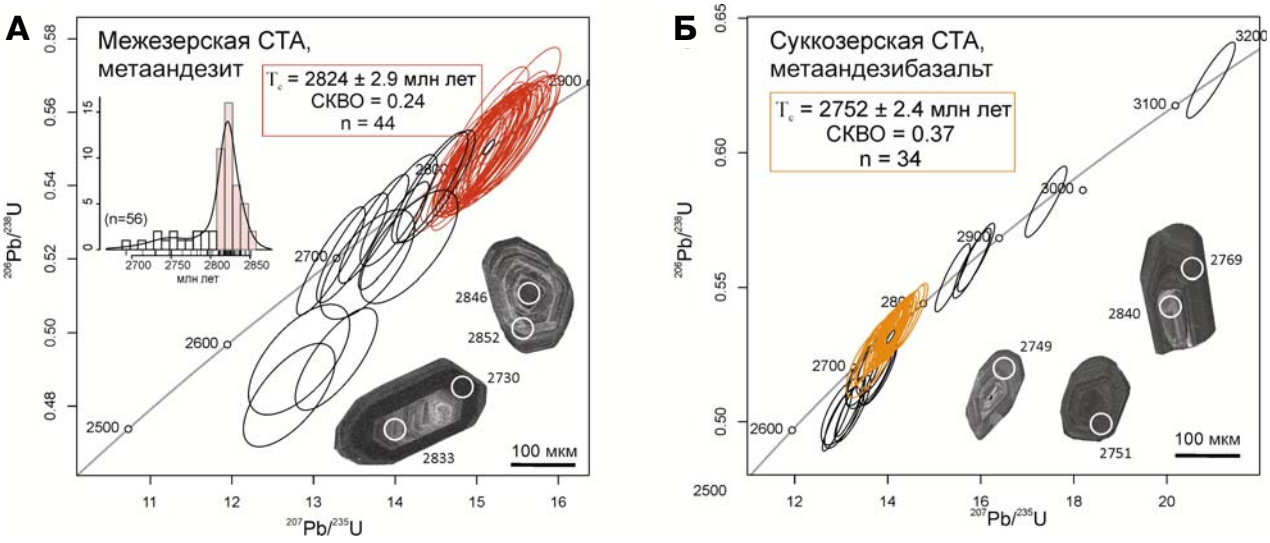


Рис. 2. Морфология и возраст цирконов из метаандезита межезерской СТА (А) и метаандезибазальта суккозерской СТА ГЗП (Б):

на диаграммах с конкордией показан конкордантный возраст магматических цирконов (T_c), на врезках – CL-изображения цирконов с точками датирования и значениями ^{207}Pb-^{206}Pb возраста в млн лет; на дополнительной врезке – гистограмма ^{207}Pb-^{206}Pb возрастов, n – количество аналитических точек с дискордантностью < 10 %. Выделение циркона осуществлялось в ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), U-Pb (LA-ICP-MS) геохронологическое исследование – в ГИН РАН (г. Москва)

Fig. 2. Morphology and age of zircons from metaandesites of the Mezhozero STA (A) and metaandesite-basalts of the Sukkozero STA, Gimoly Greenstone Belt (Б):

the Concordian diagram shows the concordant age of magmatic zircons (T_c), insets show the CL-images of zircons with dating points and ^{207}Pb-^{206}Pb age values, Ma; the additional inset shows a histogram of ^{207}Pb-^{206}Pb ages, n – the number of analytical points with discordance < 10 %. Zircon grains were separated at IG KarRC, RAS, Petrozavodsk, U-Pb (LA-ICP-MS) geochronological studies were carried out at GIN, RAS, Moscow

Таким образом, в поясе впервые установлены кислые вулканиты мезоархейского возраста. Вероятно, источником мезоархейских (~2815 млн лет) цирконов [Кучеровский и др., 2024] в вулканогенно-осадочных породах центральной части пояса являются вулканиты межезерской СТА.

Наиболее широко в ГЗП развиты породы суккозерской СТА (рис. 1), представленные лавами и туфами (в т. ч. агломератовыми) андезибазальтов-андезитов, которые ассоциируют с полимиктовыми конгломератами. U-Pb-возраст циркона из тонкого прослоя (лавового потока) андезибазальтов, залегающего среди конгломератов, оценивается как неоархейский – 2752 ± 2,4 млн лет (рис. 2, б). Этот возраст хорошо согласуется с возрастом кислых вулканитов этой СТА: 2749 ± 5 млн лет [Левченков и др., 2000] и 2736 ± 2 млн лет [Егорова и др., 2025], а также с оценкой возраста конгломератов 2,75 млрд лет [Кучеровский и др., 2023].

Таким образом, впервые получен набор геохронологических и геологических данных, который позволяет обосновать выделение в составе ГЗП трех СТА: 1) гимолоозерской – базальтовой (наиболее вероятно, мезоархейской), 2) межезерской – сложенной андезитами с прослоями BIF и углеродистых сланцев, возраст которой оценивается как мезоархейский (2,82–2,81 млрд лет), и 3) неоархейской (2,76–2,74 млрд лет) суккозерской – сложенной андезибазальт-андезитами с линзами конгломератов.

Литература

Егорова Ю. С., Чекулаев В. П., Кучеровский Г. А., Иванова А. А., Сальникова Е. Б., Плоткина Ю. В., Арестова Н. А. Неоархейские Ba-Sr метадациты Карельской провинции Фенноскандинавского щита: U–Pb геохронология, состав, Sm-Nd систематика, эффузивные аналоги санукитоидов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2025. Т. 33, № 3. С. 3–25. doi: 10.31857/S0869592X25030016

Иванов А. Н., Бреслер С. М., Михеичев А. С. Отчет о геолого-разведочных работах, проведенных на Межозерском железорудном месторождении (Петровский район КФССР) в 1951–1954 гг. Петрозаводск, 1954.

Кучеровский Г. А., Егорова Ю. С., Адамская Е. В., Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Плоткина Ю. В. U–Pb (SIMS, LA-ICP-MS) возраст циркона из двуслюдяного кварцито-гнейса кадиозерской свиты «гимольской серии» Гимольско-Суккозерской структуры (Карельская провинция, Фенноскандинавский щит) // Труды Ферсмановской научной

сессии ГИ КНЦ РАН. 2024. Т. 21. С. 165–175. doi: 10.31241/FNS.2024.21.020

Кучеровский Г. А., Чекулаев В. П., Кузнецов А. Б., Егорова Ю. С., Арестова Н. А., Зайцева Т. С., Адамская Е. В., Плоткина Ю. В. U–Pb возраст детритового циркона из матрикса раннедокембрийских полимиктовых конгломератов Центрально-Карельского домена Карельской провинции Фенноскандинавского щита // ДАН. 2023. Т. 509, № 2. С. 24–35.

Левченков О. А., Богданов Ю. Б., Матреничев В. А., Саватенков В. М., Яковлева С. З., Макеев А. Ф. Новые данные о возрасте вулканитов лопия Карелии // Общие вопросы расчленения докембрия: Мат-лы 3-го Всероссийского совещания. Апатиты, 2000. С. 143–145.

Слабунов А. И., Медведев П. В., Нестерова Н. С., Мудрук С. В., Максимов О. А., Кервинен А. В., Исаченко А. А. Отчет Российского научного фонда «Геодинамические обстановки ранней Земли и архейские полосчатые железистые кварциты» (итоговый) № 22-17-00026. Петрозаводск, 2024.

Тищенко А. С. Отчет о результатах поисковых работ в Гимольском рудном поле (Муезерский район Карельской АССР) за 1987–1988 гг. Ленинград, 1988.

Чернов В. М., Инина К. А., Горьковец В. Я., Раевская М. Б. Вулканогенные железисто-кремниевые формации Карелии (литология, геохимия, корреляция, палеотектоника). Петрозаводск: Карелия, 1970. 285 с.

References

Chernov V. M., Inina K. A., Gor'kovets V. Ya., Raevskaya M. B. Volcanogenic ferruginous-siliceous formations of Karelia (lithology, geochemistry, correlation, paleotectonics). Petrozavodsk: Karelia; 1970. 285 p. (In Russ.)

Egorova Yu. S., Chekulaev V. P., Kucherovsky G. A., Ivanova A. A., Salnikova E. B., Plotkina Yu. V., Arestova N. A. Neoarchean Ba–Sr metadacites from the Karelian Province of the Fennoscandian Shield: U–Pb geo-chronology, composition, Sm–Nd systematics. Are they effusive analogues of sanukitoids? *Stratigraphy and Geological Correlation.* 2025;33:279–298. doi: 10.1134/S08695938257000

Ivanov A. N., Bresler S. M., Mikheichev A. S. Report on the geological exploration at the Mezhozerskoe iron ore deposit (Petrovsky District of the Karelo-Finnish SSR) in 1951–1954. Petrozavodsk; 1954. (In Russ.)

Kucherovsky G. A., Egorova Yu. S., Adamskaya E. V., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Plotkina Yu. V. U–Pb (SIMS, LA-ICP-MS) age of zircon from two-mica quartzite-gneiss of the Kadiozero formation of the 'Gimoly suite' of the Gimoly-Sukkozero structure (Karelian Province, Fennoscandian Shield). *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN = Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2024;21:165–175. (In Russ.). doi: 10.31241/FNS.2024.21.020

Kucherovsky G. A., Chekulaev V. P., Kuznetsov A. B., Egorova Yu. S., Arestova N. A., Zaitseva T. S., Adamskaya E. V., Plotkina Yu. V. U–Pb age of detrital zircon in the cement of early Precambrian polymictic conglomerates of Central Karelian domen, Karelian Province, Fennoscandian Shield. *Doklady Earth Sciences.* 2023;508(2):58–67. doi: 10.1134/S1028334X22602188

Levchenkov O. A., Bogdanov Yu. B., Matrenichev V. A., Savatenkov V. M., Yakovleva S. Z., Makeev A. F. New data on the age of the Lopian volcanics of Karelia. *Obshchie voprosy raschleneniya dokembriya: Materialy 3-go Vserossiiskogo soveshchaniya = General issues of the dissection of the Precambrian: Proceedings of the 3rd All-Russian conference*. Apatity; 2000. P. 143–145. (In Russ.)

Slabunov A. I., Medvedev P. V., Nesterova N. S., Mudruk S. V., Maksimov O. A., Kervinen A. V., Isachenko A. A. Report of the Russian Science Foundation "Early Earth's geodynamics settings and Archean banded iron formation" (final) No. 22-17-00026. Petrozavodsk; 2024. (In Russ.)

Tishchenko A. S. Report on the results of exploration work in the Gimolskoye ore field (Muezersky District of the Karelian ASSR) in 1987–1988. Leningrad; 1988. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 04.08.2024; принята к публикации / accepted: 08.08.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Нестерова Наталья Сергеевна

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

e-mail: nest345@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

CONTRIBUTORS:

Nesterova, Natalya

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

Slabunov, Alexander

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Chief Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 114–118
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 114–118
DOI: 10.17076/geo2175

УДК 551.72;551.24.056

СВИДЕТЕЛЬСТВА СОБЫТИЙ ГРЕНВИЛЬСКОГО ВОЗРАСТА НА ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА НА ПРИМЕРЕ ГРАНИТОИДОВ РЯЗАНОВСКОГО МАССИВА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

А. Д. Ножкин[1]*, О. М. Туркина[1], И. И. Лиханов[1], Ю. Л. Ронкин[2]

*[1] Институт геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090), *nozhkin@igm.nsc.ru*
[2] Институт геологии и геохимии УрО РАН им. А. Н. Заварицкого (ул. Акад. Вонсовского, 15, Екатеринбург, Россия, 620110)

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов на границах древних кратонов, но и для решения вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав древнего суперконтинента Родиния. По результатам минералого-петрологических, геохимических и изотопно-геохронологических исследований получены новые данные по петрогеохимическому составу, особенностям петрогенезиса, U-Pb-возрасту циркона, Sr- и Nd-изотопным параметрам пород Рязановского гранитоидного массива, расположенного вблизи Приенисейской зоны разломов Енисейского кряжа. Эти породы представлены высокожелезистыми разностями и сопоставимы с А-гранитами или высокодифференцированными I-гранитами. Их состав эволюционирует от нормальных до субщелочных гранитов и лейкогранитов, отличающихся повышенными концентрациями высокозарядных и радиоактивных элементов. Изотопные (Sr, Nd) характеристики пород свидетельствуют в пользу генерации из древнего корового субстрата, усредненный возраст которого отвечает палеопротерозою. Формирование этих гранитов на рубеже мезо-неопротерозоя (1013 ± 9,9 млн лет) отвечает раннему этапу гренвильской орогении на юго-западе Сибирского кратона. Геодинамическая история региона сопоставляется с синхронной последовательностью и схожим стилем тектоно-термальных событий по периферии крупных докембрийских кратонов Лаврентии и Балтики, что подтверждает палеоконтинентальные реконструкции о тесных пространственно-временных связях между этими кратонами, Сибирью и их вхождении в состав Родинии. Новые доказательства коллизионных событий гренвильского возраста в комплексе с другими возрастными эквивалентами в пределах западной окраины Сибирского кратона позволяют разрешить ряд противоречий в трактовке ключевых вопросов геологии и тектоники этого региона.

Ключевые слова: гранитоиды; петрогеохимия; U-Pb-датирование; Sr- и Nd-изотопный состав; гренвильский орогенез; Енисейский кряж

Для цитирования: Ножкин А. Д., Туркина О. М., Лиханов И. И., Ронкин Ю. Л. Свидетельства событий гренвильского возраста на западной окраине Сибирского кратона на примере гранитоидов Рязановского массива (Енисейский кряж) // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 114–118. doi: 10.17076/geo2175

Финансирование. Работа выполнена за счет средств РНФ (проект № 21-77-20018-П).

A. D. Nozhkin[1]*, O. M. Turkina[1], I. I. Likhanov[1], Yu. L. Ronkin[2]. EVIDENCE OF GREENVILLE AGE EVENTS AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON: THE CASE OF THE RYAZANOVSKY GRANITOID MASSIF (YENISEI RANGE)

*[1] Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptyug Ave., 630090, Novosibirsk, Russia), *nozhkin@igm.nsc.ru*
[2] Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (15 Akad. Vonsovsky St., 620110, Ekaterinburg, Russia)

Studies of the geological history of the Yenisei Range, which is a collisional-accretionary orogen in the western margin of the Siberian Craton, are crucial not only for understanding the tectonic evolution of mobile fold-and-thrust belts at the boundaries of ancient cratons, but also for solving the problem of the possible incorporation of the Siberian Craton into the Rodinia supercontinent, an issue that has been debated for more than 20 years. Based on the results of mineralogical-petrological, geochemical and isotope-geochronological studies, new data were obtained on the major- and trace-element composition, petrogenesis, zircon U-Pb age, Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd isotopic parameters for rocks of the Ryazanovsky granitoid massif located near the Yenisei fault zone of the Yenisei Range. These rocks are represented by high-ferruginous peraluminous varieties and are comparable to A-granites or highly differentiated I-granites. Their composition evolves from normal to subalkaline granites and leucogranites, characterized by increased concentrations of highly charged and radioactive elements. Isotopic (Sr, Nd) characteristics of the rocks indicate generation from an ancient crustal substrate, the average age of which corresponds to the Paleoproterozoic. The formation of these granites at the Meso-Neoproterozoic boundary (1013 ± 9.9 Ma) corresponds to the early stage of the Grenville orogeny at the western margin of the Siberian Craton. This episode of regional crustal evolution is correlated with the synchronous successions and similar style of tectonothermal events along the Arctic margin of Rodinia and supports the spatial proximity of Siberia and North Atlantic cratons (Laurentia and Baltica), which is consistent with the proposed Neoproterozoic paleogeographic reconstructions of the Rodinia configuration. New evidence of Grenville-age collision events, combined with other age equivalents within the western margin of the Siberian Craton, helps resolve a number of controversies in the interpretation of key issues in the geology and tectonics of this region.

Keywords: granitoids; rock geochemistry; U-Pb dating; Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd isotope systematics; Grenville orogeny; Yenisei Range

For citation: Nozhkin A. D., Turkina O. M., Likhanov I. I., Ronkin Yu. L. Evidence of Greenville age events at the western margin of the Siberian Craton: the case of Ryazanovsky granitoid massif (Yenisei Range). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* = *Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 114–118. doi: 10.17076/geo2175

Funding. The study was funded within Russian Science Foundation project #21-77-20018-П.

На основании имеющихся в литературе представлений о низкой эндогенной активности в геологической эволюции Земли в интервале между 1,8 и 0,75 млрд лет, известных как скучный миллиард, в ряде работ был сделан вывод об отсутствии на Енисейском кряже (ЕК) коллизионных событий гренвильского возраста, заключительные стадии деформации которого имели возраст 1,2–0,9 млрд лет [Богданова и др., 2009]. Это привело к противоречивой трактовке вопросов геологической эволюции региона. Очевидно, что такое представление связано с дефицитом геохимических данных и возрастных датировок, ограничивающих возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли. Попытка восполнения этого пробела предпринята в настоящей работе, в которой обсуждаются особенности происхождения пород Рязановского массива и геохронологические свидетельства ранненеопротерозойских событий в эволюции ЕК.

По своему петрохимическому составу этот массив, расположенный в нижнем течении р. Кия (правый приток р. Енисей), имеет все признаки натрий-калиевых геохимически

дифференцированных гранитных массивов, состав которых эволюционирует от гранитов до субщелочных гранитов и лейкогранитов. Обогащение гранитов высокозарядными элементами и Th сближает их с гранитами А-типа, что могло произойти в результате плавления корового кварц-полевошпатового источника при высокой температуре с полным растворением акцессорных элементов в магмообразующем субстрате. При последующей дифференциации расплава, вероятно, также происходило накопление некогерентных редких элементов.

Графическая интерпретация U-Pb LA-ICP-MS-конкордантных данных для 12 кристаллов циркона, отобранных из субщелочного лейкогранита (1011,4 ± 7,9 млн лет), результаты вычисления средневзвешенных значений конкордантных U-Pb-возрастов с помощью четырех алгоритмов (по более статистически представленному количеству кристаллов n = 18), показывают U-Pb-возраст 1013,0 ± 9,9 млн лет, который может быть принят в качестве наилучшей оценки времени формирования гранитов Рязановского массива (рис. 1).

Рассмотрение Rb-Sr ID-TIMS-изотопной сигнатуры этих образцов на графике Николайсена в координатах $^{87}Rb/^{86}Sr–^{87}Sr/^{86}Sr$ выявляет эволюционную зависимость с наклоном, равным $\exp(\lambda_{87}*t)–1) = 0{,}01562$, где $\lambda_{87} = 1{,}42*10^{-11}$ лет$^{-1}$ – постоянная распада ^{87}Rb, соответствующим возрасту 1091 ± 55 млн лет. На этом же графике представлена линия согласования с U-Pb LA-ICP-MS-возрастом t = 1013 млн лет и наклоном, равным $\exp(\lambda_{87}*t)–1) = 0{,}01449$. Относительно высокое значение первичного изотопного отношения $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0{,}7124 \pm 0{,}0036$ свидетельствует о существенной роли корового компонента в формировании расплава, что находит свое подтверждение и в величинах $\varepsilon_{Nd}(t)$, равных 5,0–4,8 для гранитов исследуемых образцов.

Концентрации Sm и Nd в исследованных образцах гранитов ограничены интервалом 5,3–6,8 и 31–40 г/т, при этом вариации величин $^{147}Sm/^{144}Nd$ и $^{147}Nd/^{144}Nd$ составляют всего лишь 1,6 и 0,003 %, что в конечном итоге определяет близость T_{DM} 1902 и 1910 млн лет соответственно. Вычисленные с учетом $t_{U\text{-}Pb}$ (1013 млн лет) двухстадийные оценки модельного возраста также практически совпадают (2069 и 2057 млн лет) (рис. 2). Поскольку U-Pb-возраст гранитов Рязановского массива значимо меньше Nd-модельных датировок, последние следует интерпретировать «усредненным» смешанным источником, имеющим как минимум раннепротерозойский возраст.

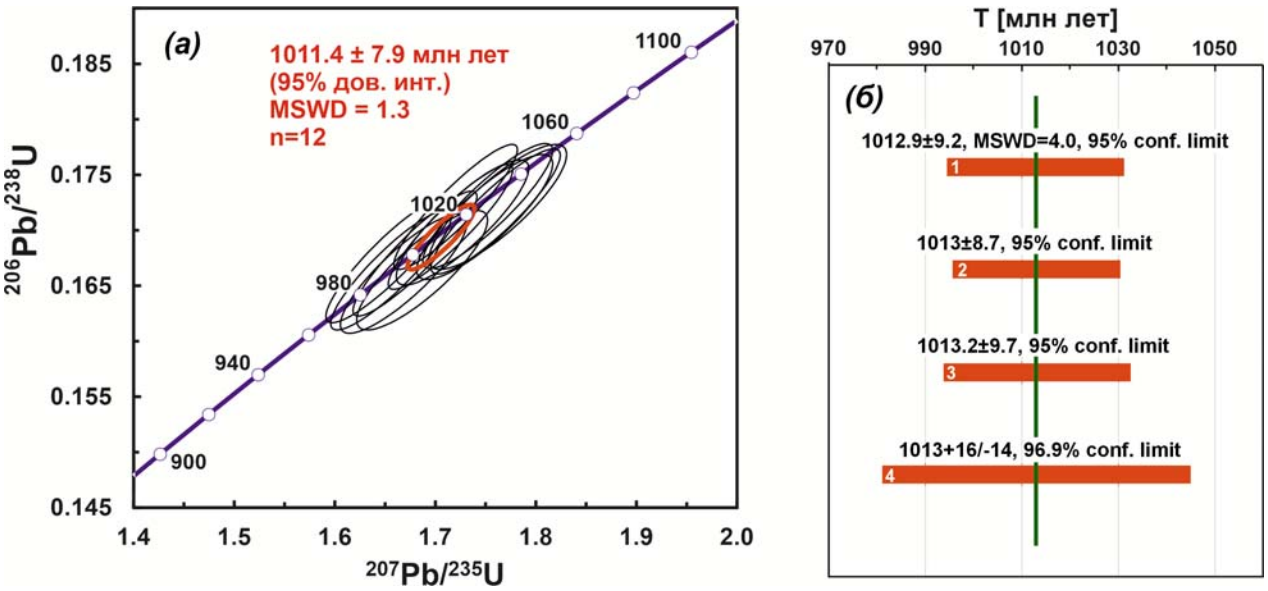


Рис. 1. Графическая интерпретация U-Pb LA-ICP-MS-данных для циркона из гранитов Рязановского массива (обр. А-314-83):

а) U-Pb-график с конкордией, без учета неопределенностей константы распада (n = 12); б) U-Pb-конкордантный возраст 1013,0 ± 9,9 [0,97 %] 95% conf. lim., MSWD = 0,00017

Fig. 1. Graphic interpretation of U-Pb LA-ICP-MS-data for zircon from granites of the Ryazanovsky massif (sample A-314-83):

a) U-Pb plot with concordia, without taking into account the uncertainties of the decay constant (n = 12); b) U-Pb concordant age 1013.0 ± 9.9 [0.97 %] 95% conf. lim., MSWD = 0.00017

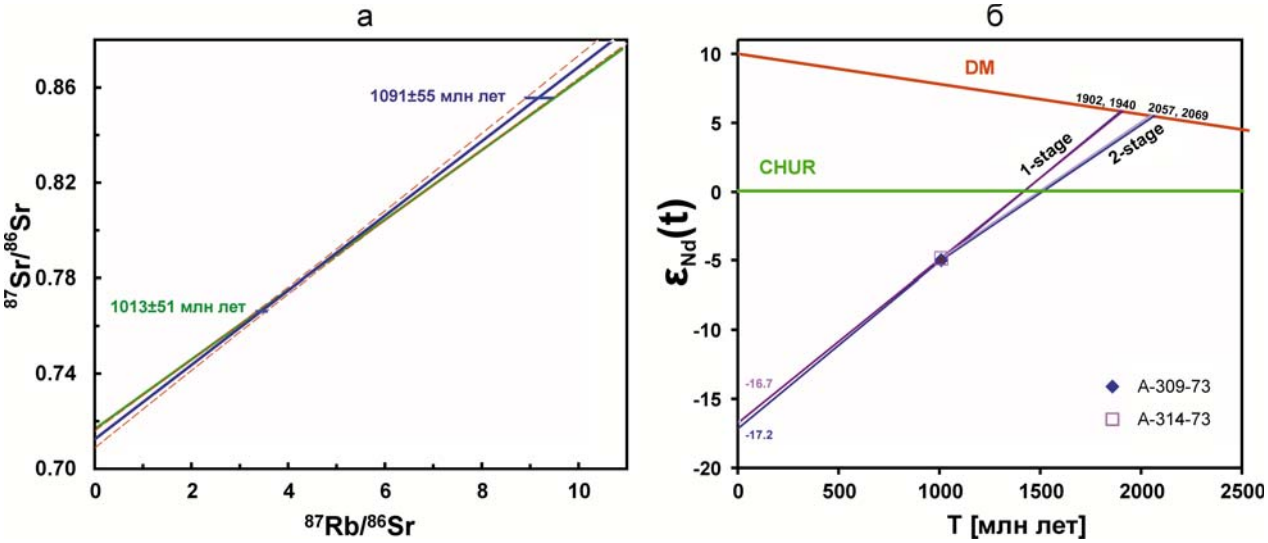


Рис. 2. (а) Rb-Sr-эволюционная диаграмма (синим цветом) и (б) эволюция ^{147}Sm-^{143}Nd-изотопной системы для гранитов А-309-73 и А-314-73 Рязановского массива. 1-stage, 2-stage, 1902, 1940, 2057, 2069 – линии эволюции по одностадийной и двухстадийной Nd-модели и соответствующие возрасты (в млн лет)

Fig. 2. (а) Rb-Sr evolution diagram (blue) and (б) evolution of the ^{147}Sm-^{143}Nd isotope system for granites A-309-73 and A-314-73 of the Ryazanovsky massif. 1-stage, 2-stage, 1902, 1940, 2057, 2069 – evolutionary lines according to the one-stage and two-stage Nd model and the corresponding ages (in Ma)

Становление гранитоидов Рязановского массива на рубеже мезо- и неопротерозоя (1013 ± 9,9 млн лет) отвечает раннему этапу орогенеза гренвильского возраста на юго-западе Сибирского кратона. В пределах ЕК в качестве возрастных аналогов процессов гренвильской складчатости также рассматриваются гранитогнейсовые купола, гранитоиды Гаревского комплекса, метапелиты низких/умеренных давлений и тектониты Северо- и Южно-Енисейского кряжа, а также метабазиты Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса [Likhanov et al., 2004; Лиханов и др., 2011, 2014; Reverdatto et al., 2019; Лиханов, 2020, 2023; Likhanov, 2022].

Геодинамическая история региона сопоставляется с синхронной последовательностью и схожим стилем тектоно-термальных событий по периферии крупных докембрийских кратонов Лаврентии и Балтики, что подтверждает палеоконтинентальные реконструкции о вхождении Сибирского кратона в состав ядра суперконтинента Родинии [Torsvik, 2003; Li et al., 2023]. Представленные свидетельства позволяют разрешить ряд противоречий в трактовке ключевых вопросов геологии региона, например, ранние предположения об отсутствии на ЕК орогенных событий гренвильского возраста.

Литература

Богданова С. В., Писаревский С. А., Ли Ч. Х. Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2009. Т. 17(3). С. 29–45.

Лиханов И. И. Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Петрология. 2020. Т. 28, № 1. С. 4–22. doi: 10.31857/S0869590320010045

Лиханов И. И. Свидетельства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона (Гаревский метаморфический комплекс, Енисейский кряж) // Петрология. 2023. Т. 31(1). С. 49–80. doi: 10.1134/S0869591123010058

Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С., Вершинин А. Е. Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // ДАН. 2011. Т. 436(4). С. 509–514. doi: 10.1134/S1028334X11020048

Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48(5). С. 32–53. doi: 10.7868/S0016853X1405004X

Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Козлов П. С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. Т. 55, № 1. С. 41–65. doi: 10.1134/S0016852121010076

Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. Vol. 12. no. 11. Art. 402. doi: 10.3390/geosciences12110402

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia // J. Metamorph. Geol. 2004. Vol. 22(8). P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Li Z.-X., Liu Y., Ernst R. A dynamic 2000–540 Ma Earth history: from cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle // Earth-Sci. Rev. 2023. Vol. 238. Art. 104336.

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer Geology, 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

Torsvik T. H. The Rodinia jigsaw puzzle // Science. 2003. Vol. 300. P. 1379–1381.

References

Bogdanova S. V., Pisarevsky S. A., Li Z. X. Assembly and breakup of Rodinia (some results of IGCP Project 440). *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2009;17(3):259–274. doi: 10.1134/S0869593809030022

Likhanov I. I. Metamorphic indicators for collision, extension, and shear zone geodynamic settings of the Earth's crust. *Petrology*. 2020;28(1):1–16. doi: 10.1134/S086959112001004X

Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence. *Geosciences (Switzerland)*. 2022;12(11):402. doi: 10.3390/geosciences12110402

Likhanov I. I. Grenville and Valhalla tectonic events at the Western margin of the Siberian Craton: evidence from rocks of the Garevka Complex, Northern Yenisei Range, Russia. *Petrology*. 2023;30:S72–S100. doi: 10.1134/S0869591123010058

Likhanov I. I., Nozhkin A. D., Reverdatto V. V., Kozlov P. S. Grenville tectonic events and evolution of the Yenisei Ridge at the Western margin of the Siberian Craton. *Geotectonics*. 2014;48(5):371–389. doi: 10.1134/S0016852114050045

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia. *J. Metamorph. Geol*. 2004;22(8):743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Vershinin A. E. The Teya polymetamorphic complex in the Transangarian Yenisei Ridge: an example of metamorphic superimposed zoning of low- and medium-pressure facies series. *Doklady Earth Sciences.* 2011;436(2):213–218. doi: 10.1134/S1028334X11020048

Likhanov I. I., Zinoviev S. V., Kozlov P. S. Blastomylonite complexes of the Western Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia): geological position, metamorphic evolution and geodynamic models. *Geotectonics*. 2021;55(1):36–57. doi: 10.1134/S0016852121010076

Li Z.-X., Liu Y., Ernst R. A dynamic 2000–540 Ma Earth history: from cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle. *Earth-Sci. Rev*. 2023;238:104336.

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer Geology; 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

Torsvik T. H. The Rodinia jigsaw puzzle. *Science.* 2003;300:1379–1381.

Поступила в редакцию / received: 31.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ножкин Александр Дмитриевич
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: nozhkin@igm.nsc.ru

Туркина Ольга Михайловна
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: turkina@igm.nsc.ru

Лиханов Игорь Иванович
д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: likh@igm.nsc.ru

Ронкин Юрий Лазаревич
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: y-ronkin@mail.ru

CONTRIBUTORS:

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

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

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

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

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 119–123
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 119–123
DOI: 10.17076/geo2181

УДК 551.71 : 552.3 : 552.5

МАГМАТИЗМ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ НА ГРАНИЦЕ АРХЕЯ-ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЯ. ВЗГЛЯД ИЗ КАРЕЛИИ

С. А. Светов*, З. П. Рыбникова, А. В. Бакаева, М. А. Гоголев

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

В исследовании обобщены результаты изучения геодинамических режимов заложения и развития магматических пород и ассоциирующих с ними терригенных комплексов, формирующих супракрустальную часть Водлозерского террейна (Юго-Восточная часть Карельского кратона) в интервале мезоархей–палеопротерозой. Ранние геодинамические процессы (в мезо-неоархее) реконструированы на основе изучения реперных стратотектонических ассоциаций Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Трансформация геодинамических режимов становления кратона в палеопротерозое обоснована на примере образований Онежского бассейна, перекрывающих зеленокаменный комплекс. Установлено, что корообразование в Водлозерском террейне в мезо-неоархее контролировалось субдукционно-коллизионными процессами, сопоставимыми по продолжительности с полным циклом Вильсона. После стадии стабилизации континентальной коры, около 2,5 млрд лет назад, произошла магматическая реактивация территории. Карельский кратон испытал поднятие и интенсивную эрозию, что привело к формированию субаэральных кор выветривания. Смена геодинамических режимов была обусловлена зарождением плюмового события, предвещавшего образование крупной магматической провинции. Развитие территории происходило в условиях континентального рифтогенеза (в интервале 2,5–2,45 млрд лет) с формированием кремнистой высоко-Mg андезибазальтовой ассоциации. Эта ассоциация характеризуется двойственной геохимической природой – плюмовой и субдукционной, что объясняется вовлечением в плавление фрагментов архейского слэба и контаминацией расплавами гранитоидов санукитоидного ряда. Показано, что Водлозерский террейн, компактная территория юго-восточной части Карельского кратона, является уникальным геологическим полигоном, позволяющим проследить эволюцию геодинамических режимов ранней Земли от архея до палеопротерозоя.

Ключевые слова: магматические системы; Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс; Карельский кратон; геодинамика

Для цитирования: Светов С. А., Рыбникова З. П., Бакаева А. В., Гоголев М. А. Магматизм и геодинамические режимы на границе архея-палеопротерозоя. Взгляд из Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 119–123. doi: 10.17076/geo2181

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР Института геологии КарНЦ РАН.

S. A. Svetov*, Z. P. Rybnikova, A. V. Bakaeva, M. A. Gogolev.
MAGMATISM AND GEODYNAMIC SCENARIOS AT THE ARCHEAN-PALEOPROTEROZOIC BOUNDARY. A VIEW FROM KARELIA

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

This study synthesizes the findings on the geodynamic regimes of emplacement and development of igneous rocks and associated terrigenous complexes forming the supracrustal part of the Vodlozero Terrane (southeastern part of the Karelian Craton) during the Mesoarchean – Paleoproterozoic interval. Early geodynamic processes (during the Meso-Neoarchean) are reconstructed based on the study of key strato-tectonic associations of the Vedlozero-Segozero Greenstone Belt. The transformation of geodynamic regimes during cratonization in the Paleoproterozoic is substantiated by the example of the Onega Basin's formations, which overlie the greenstone complex. It is established that crustal formation in the Vodlozero Terrane during the Meso-Neoarchean was controlled by subduction-collisional processes, comparable in duration to a full Wilson cycle. After the stage of continental crust stabilization, around 2.5 billion years ago, magmatic reactivation of the territory occurred. The Karelian Craton experienced an uplift and intense erosion, which led to the formation of subaerial weathering crusts. The change in geodynamic regimes was triggered by the onset of a plume event, heralding the formation of a large igneous province. The development of the territory occurred under conditions of continental rifting (in the interval 2.5–2.45 billion years) with the formation of a siliceous high-Mg andesibasalt association. This association is characterized by a dual geochemical nature – plume and subduction-related – which is explained by the involvement of Archean slab fragments in melting and contamination by melts of sanukitoid granitoids.

Keywords: magmatic systems; Vedlozero-Segozero Greenstone Belt; Karelian Craton; geodynamics

For citation: Svetov S. A., Rybnikova Z. P., Bakaeva A. V., Gogolev M. A. Magmatism and geodynamic scenarios at the Archean-Paleoproterozoic boundary. A view from Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 119–123. doi: 10.17076/geo2181

Funding. The work was carried out within state-funded research theme of the Institute of Geology of KarRC RAS.

Территория Карельского кратона предоставляет уникальную возможность для разработки геодинамических моделей формирования ранней земной коры. В юго-восточном сегменте кратона детально изучены магматические ассоциации древнего палеоархейского протоконтинентального Водлозерского блока [Лобач-Жученко и др., 2000; Арестова и др., 2015; Чекулаев и др., 2022], вулканогенно-осадочные комплексы зеленокаменных структур его северо-западного обрамления [Puchtel et al., 1998; Кожевников, 2000; Светов, 2005; Гоголев, 2018; Bakaeva et al., 2024] и перекрывающий палеопротерозойский вулканогенно-осадочный комплекс Онежской структуры (ОС) [Онежская…, 2011; Melezhik et al., 2013]. Высокая степень изученности магматических систем Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (ВСЗП) и ассоциирующих с ними терригенных комплексов позволяет последовательно реконструировать эволюцию геодинамических режимов во временном интервале мезо-неоархей-палеопротерозой [Кожевников, 2000; Лобач-Жученко и др., 2000; Светов, 2005].

Новый импульс геодинамическим реконструкциям и уточнению временных интервалов развития магматических систем в пределах ВСЗП задан исследованиями детритовых цирконов во внутриформационных терригенных комплексах ВСЗП и перекрывающих его поздних молассоидных толщах, проведенными в 2024–2025 гг.

К настоящему времени установлено, что магматические системы Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса формировались в течение 420 млн лет в результате развития долгоживущей конвергентной системы, приуроченной к западной части Водлозерского блока, в период с ~ 3,05 до 2,65 млрд лет назад. Сценарий ее развития включал следующие реконструированные к настоящему времени геодинамические обстановки:

– заложение инициальной субдукционной системы с формированием раннего островодужного комплекса (3,05–2,95 млрд лет), представленного БАДР-сериями адакитового и известково-щелочного ряда;

– развитие задугового бассейна (3,02–2,905 млрд лет) со следующей последовательностью образования ассоциаций: 1) на протоокеаническом этапе – Al-недеплетированных неконтаминированных коматиитов, коматиитовых и толеитовых базальтов; 2) на конвергентном этапе – контаминированных коматиитов; 3) на этапе закрытия задугового бассейна – островодужных толеитов. При этом установлена латеральная асинхронность магматизма в пределах ВСЗП, с этапами 3,02–2,96 млрд лет в Паласельгинском домене, 3,0–2,92 млрд лет в Койкарском домене и 2,92–2,905 млрд лет в Хаутаваарском;

– развитие обдукционных систем, формирующихся на аккреционно-коллизионном этапе развития ВСЗП (2,95–2,905 млрд лет), маркируемых образованием надвигов океанических аллохтонов на континентальное основание, с последующим субаэральным выветриванием [Bakaeva et al., 2024];

– образование аккреционной призмы в интервале 2,95–2,92 млрд лет;

– формирование субдукционной системы поздней вулканической дуги, представленной ассоциацией адакитов – Nb-обогащенных андезитов, высоко-Mg андезитов и толщами терригенных отложений (2,86–2,84 млрд лет);

– завершающий коллизионный этап развития конвергентной системы в интервале 2,79–2,72 млрд лет (маркируемый образованием АДР-серий и санукитоидных интрузий) ознаменовал завершение формирования консолидированной континентальной коры, объединяющей в себе реликты мезо-неоархейских стратотектонических ассоциаций – террейнов;

– постколлизионный этап (2,7–2,65 млрд лет) сопровождался заложением pull-apart бассейнов в транспрессионно-транстенсионном режиме, с образованием осадочных парагенезов низкой зрелости (тип тимискаминг) и незначительной степенью выветривания субстрата. Магматизм в этом интервале был проявлен формированием дайковых роев (2,68–2,65 млрд лет) и интрузивных тел субщелочного и известково-щелочного состава.

Развитие территории ВСЗП Карельского кратона укладывается в полный цикл Вильсона и фактически отражает все глобальные эволюционные тренды корообразования в мезо-неоархее ранней Земли. 2,6 млрд лет назад развитие Карельского кратона завершается амальгамацией с кратонами Сьюпириор, Пилбара, Бунделкханд, Каапвааль и др. в протоконтинент Кенорленд.

К границе архея-протерозоя окончательно сформирована континентальная кора в регионе, при этом магматическая реактивизация территории возобновляется лишь с 2,5 млрд лет. В это время Карельский кратон испытывал поднятие и интенсивную эрозию, с формированием субаэральных кор выветривания [Коросов, 1991]. Причиной сводового поднятия явилось зарождение нового плюмового события, предвещающего образование крупной магматической провинции сумийского возраста [Онежская…, 2011]. Дальнейшее развитие территории происходит в условиях континентального рифтогенеза (в интервале 2,5–2,45 млрд лет). В результате формируется кремнистая высоко-Mg андезибазальтовая ассоциация (SHMS), имеющая двойственную геохимическую природу – плюмовую и субдукционную [Светов и др., 2004; Melezhik et al., 2013; Bogina et al., 2018], что может объясняться вовлечением в плавление фрагментов архейского субдуцированного слэба и контаминацией расплавами поздних гранитоидных фаз санукитоидного ряда. Данная модель позволяет объяснить как геохимическую двойственность вулканитов, так и наличие в палеопротерозойских вулканитах доминирующих популяций захваченных цирконов с возрастом от 2,8–2,7 млрд лет [Богданов и др., 2025].

Резюмируя, следует отметить, что компактная территория юго-восточной части Карельского кратона – Водлозерский террейн является уникальным геологическим полигоном, позволяющим не только проследить эволюцию геодинамических режимов ранней Земли от архея до палеопротерозоя, но и оценить скорость и латеральный масштаб событий, а также реконструировать положение Карельского кратона в архитектуре протоконтинента Кенорленд от стадии сборки до момента распада.

Литература

Арестова Н. А., Чекулаев В. П., Лобач-Жученко С. Б., Кучеровский Г. А. Корреляция процессов формирования архейской коры древнего Водлозерского домена (Балтийский щит) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2015. Т. 23, № 2. С. 1–13.

Богданов Ю. Б., Бережная Н. Г., Анисимова С. А., Никонова А. С., Родионов Н. В. Проблемы стратиграфии образований гимольского надгоризонта (верхний лопий) Карельского региона // Региональная геология и металлогения. 2025. Т. 32, № 1. С. 28–50. doi: 10.52349/0869-7892_2025_101_28-50

Гоголев М. А. Геохимическая типизация дацит-риолитового магматизма центральной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Карельский кратон) // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 11. С. 82–95. doi: 10.17076/geo757

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

Коросов В. И. Геология доятулийского протерозоя восточной части Балтийского щита (сумий, сариолий). Петрозаводск: КНЦ АН СССР, 1991. 118 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.

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.

Светов С. А., Голубев А. И., Светова А. И. Геохимия сумийских андезибазальтов центральной Карелии // Геохимия. 2004. № 7. С. 729–739.

Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Егорова Ю. С. Архейская тоналит-трондьемит-гранодиоритовая ассоциация Карельской провинции: геология, геохимия, этапы и условия образования // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2022. Т. 30, № 4. С. 3–21. doi: 10.31857/S0869592X22040020

Bakaeva A. V., Chazhengina S. J., Svetov S. A. Neoarchean paleosols in the Eastern Fennoscandian Shield of Central Karelia, Russia, and their paleoatmospheric implication // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2024. Vol. 649. Art. 112319. doi: 10.1016/j.palaeo.2024.112319

Bogina M., Zlobin V., Svetov S., Sharkov E., Chistyakov A. Petrogenesis of siliceous high-Mg series: evidence from the Early Paleoproterozoic mafic volcanic rocks of the Vodlozero Domain, Fennoscandian Shield // Geosci. Front. 2018. Vol. 9. P. 207–221. doi: 10.1016/j.gsf.2017.02.009

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 for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences / V. Melezhik, A. R. Prave, A. E. Fallick, L. R. Kump, H. Strauss, A. Lepland, E. J. Hanski (eds.). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 387–490 p.

Puchtel I. S., Arndt N. T., Hofmann A. W., Haase K. M., Kröner A., Kulikov V. S., Kulikova V. V., Garbe-Schönberg C. D., Nemchin A. A. Petrology of mafic lavas within the Onega plateau, central Karelia: evidence for 2.0 Ga plume-related continental crustal growth in the Baltic Shield // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. Vol. 130. P. 134–153.

References

Arestova N. A., Chekulaev V. P., Lobach-Zhuchenko S. B., Kucherovskii G. A. Correlation of the processes of the Archean crust formation of the ancient Vodlozero Domain (Baltic Shield). *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya = Stratigraphy. Geological Correlation.* 2015;23(2):1–13. (In Russ.)

Bakaeva A. V., Chazhengina S. J., Svetov S. A. Neoarchean paleosols in the Eastern Fennoscandian Shield of Central Karelia, Russia, and their paleoatmospheric implication. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol*. 2024;649:112319. doi: 10.1016/j.palaeo.2024.112319

Bogdanov Yu. B., Berezhnaya N. G., Anisimova S. A., Nikonova A. S., Rodionov N. V. Stratigraphy problems of the Gimoly Superhorizon formations (Upper Lopian) in the Karelian region. *Regional'naya geologiya i metallogeniya = Regional Geology and Metallogeny.* 2025;32(1):28–50. (In Russ.). doi: 10.52349/0869-7892_2025_101_28-50

Bogina M., Zlobin V., Svetov S., Sharkov E., Chistyakov A. Petrogenesis of siliceous high-Mg series: evidence from the Early Paleoproterozoic mafic volcanic rocks of the Vodlozero Domain, Fennoscandian Shield. *Geosci. Front.* 2018;9:207–221. doi: 10.1016/j.gsf.2017.02.009

Chekulaev V. P., Arestova N. A., Egorova Yu. S. Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite association of the Karelian province: geology, geochemistry, stages and conditions of formation. *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya = Stratigraphy. Geological Correlation.* 2022;30(4):3–21. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869592X22040020

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

Gogolev M. A. Geochemical types of subvolkanic dacite-rhyolite complexes from the central part of the Vedlozero-Segozero Greenstone Belt (Karelian Craton). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;11:82–95. (In Russ.). doi: 10.17076/geo757

Korosov V. I. Geology of the Pre-Jatulian Proterozoic of the eastern part of the Baltic Shield (Sumy, Sariol). Petrozavodsk: KNTs AN SSSR; 1991. 118 p. (In Russ.)

Kozhevnikov V. N. Archaean greenstone belts of the Karelian Craton as accretionary orogens. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. 223 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 isotope-geochemical justification. *Geotektonika = Geotectonics.* 2000;6:26–42. (In Russ.)

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 for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2013. 387–490 p.

Puchtel I. S., Arndt N. T., Hofmann A. W., Haase K. M., Kröner A., Kulikov V. S., Kulikova V. V., Garbe-Schönberg C. D., Nemchin A. A. Petrology of mafic lavas within the Onega plateau, central Karelia: evidence for 2.0 Ga plume-related continental crustal growth in the Baltic Shield. *Contrib. Mineral. Petrol*. 1998;130: 134–153.

Svetov S. A., Golubev A. I., Svetova A. I. Geochemistry of the Sumy andesibasalts of central Karelia. *Geokhimiya = Geochemistry.* 2004;7:729–739. (In Russ.)

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

Поступила в редакцию / received: 08.08.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
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, руководитель лаборатории
e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

Рыбникова Зоя Павловна
младший научный сотрудник
e-mail: zoya_rybnikova@mail.ru

Бакаева Александра Владимировна
младший научный сотрудник
e-mail: sashe-ku@yandex.ru

Гоголев Максим Александрович
старший геолог
e-mail: mag-333@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Svetov, Sergei
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Director, Head of Laboratory

Rybnikova, Zoya
Junior Researcher

Bakaeva, Alexandra
Junior Researcher

Gogolev, Maxim
Senior Geologist

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 124–129
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 124–129
DOI: 10.17076/geo2150

УДК 550.93 : 551.71 (470.22)

НОВОЕ МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКОЕ (1546 МЛН ЛЕТ) ТЕРМАЛЬНОЕ СОБЫТИЕ В ЦЕНТРАЛЬНО-КАРЕЛЬСКОМ ТЕРРЕЙНЕ КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА: ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ ИЗ НЕОАРХЕЙСКИХ КИСЛЫХ ВУЛКАНИТОВ КОСТОМУКШСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА

А. И. Слабунов[1]*, А. В. Кервинен[1], Е. Б. Сальникова[2], К. Г. Ерофеева[3], А. С. Дубенский[3]

*[1] Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *slabunov@krc.karelia.ru*
[2] Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 190034)*
[3] Геологический институт РАН (Пыжевский пер., 7, Москва, Россия, 119017)

В породах Костомукшского зеленокаменного пояса впервые установлены цирконы мезопротерозойского (1545,9 ± 3,5 млн лет) возраста. Цирконы для датирования были выделены из южной части силла метариолитов (геллефлинты), залегающего среди сланцев и полосчатых железистых кварцитов костомукшской свиты гимольской серии. Цирконы представлены прозрачными бледно-розовыми удлиненными и, реже, короткопризматическими кристаллами, размер которых варьирует от 60 до 400 мкм. Датирование цирконов проведено двумя методами: 1) лазерной абляции (LA-ICP-MS) и 2) U-Pb CA-ID-TIMS-методом с использованием «химической абразии». По результатам первого получены значения возраста 1538 ± 9 и 1535 ± 9 млн лет, а второго – 1546 ± 4 млн лет. Эти результаты в пределах ошибки сопоставимы. При датировании методом лазерной абляции среди цирконов установлены единичные мезоархейские (2949 ± 7, 2885 ± 8 и 2830 ± 8 млн лет) зерна. Проведено (методом лазерной абляции) исследование геохимических особенностей мезопротерозойских цирконов. Они, относительно неоархейских, обеднены легкими РЗЭ, характеризуются наличием отрицательной Eu-аномалии и положительной Ce. Таким образом, в изученных породах силла метариолитов установлено проявление мезопротерозойского термального процесса, приведшего к кристаллизации новой генерации циркона. При этом имеющиеся петрографические и геохимические данные по породам силла не указывают на наличие какой-либо дополнительной переработки этих пород. Полученные новые геохронологические данные о мезопротерозойском термальном событии в породах Костомукшского зеленокаменного пояса хорошо коррелируются по возрасту с поздними фазами анортозит-рапакиви-гранитного магматизма (1547–1530 млн лет), который широко проявлен в южной части кратона вдоль его границы со Свекофеннским орогеном.

Ключевые слова: мезопротерозой; неоархей; циркон; ID-TIMS; LA-ICP-MS; Костомукшский зеленокаменный пояс

Для цитирования: Слабунов А. И., Кервинен А. В., Сальникова Е. Б., Ерофеева К. Г., Дубенский А. С. Новое мезопротерозойское (1546 млн лет) термальное событие в центрально-карельском террейне Карельского кратона: по результатам датирования цирконов из неоархейских кислых вулканитов Костомукшского зеленокаменного пояса // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 124–129. doi: 10.17076/geo2150

Финансирование. Работа является вкладом в исследования ИГ КарНЦ РАН по теме FMEN-2023-0009 и ИГГД РАН по теме FMUW-2025-0002.

A. I. Slabunov[1]*, A. V. Kervinen[1], E. B. Salnikova[2], K. G. Erofeeva[3], A. S. Dubenskiy[3]. A NEW MESOPROTEROZOIC (1546 MA) THERMAL EVENT IN THE CENTRAL KARELIAN TERRANE OF THE KARELIAN CRATON: RESULTS OF DATING ZIRCON FROM NEOARCHEAN FELSIC ROCK OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT

*[1] Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *slabunov@krc.karelia.ru*
[2] Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)
[3] Geological Institute, Russian Academy of Science (7 Pyzhevsky Per., 109017 Moscow, Russia)

It is for the first time that rocks of the Kostomuksha Greenstone Belt have been found to contain zircons of Mesoproterozoic (1545.9 ± 3.5 Ma) age. Zircons to be dated were separated from the southern portion of a metarhyolite (halleflinta) sill occurring among the schists and banded iron formation in the Kostomuksha suite of the Gimoly series. The zircons occur as transparent, pale-pink elongated and lesser short-prismatic crystals varying in size from 60 to 400 μm. The zircons were dated by two methods: 1) laser ablation (LA-ICP-MS) and 2) isotopic dilution U-Pb CA-ID-TIMS). The former method yielded ages of 1538 ± 9 and 1535 ± 9 Ma and the latter 1546 ± 4 Ma. The results were comparable within the error limits. Dating by laser ablation revealed Mesoarchean (2949 ± 7, 2885 ± 8 and 2830 ± 8 Ma) grains among the zircons. Laser ablation was used to analyze the geochemical features of Mesoproterozoic zircons. They are poorer in light REE than Neoarchean zircons and display negative Eu and positive Ce anomalies. Thus, rocks of the metarhyolite sill exhibit a Mesoproterozoic thermal process, which triggered the crystallization of a new zircon generation. It should be noted that available petrographic and geochemical data on sill rocks indicate no additional reworking of these rocks. New geochronological data on the Mesoproterozoic thermal event in rocks of the Kostomuksha Greenstone Belt are comparable in age with the late phases of anorthosite-rapakivi granite magmatism (1547–1530 Ma), which is widespread in the southern portion of the craton along its boundary with the Svecofennian orogen.

Keywords: Mesoproterozoic; Neoarchean; zircon; ID-TIMS; LA-ICP-MS; Kostomuksha Greenstone Belt

For citation: Slabunov A. I., Kervinen A. V., Salnikova E. B., Erofeeva K. G., Dubenskiy A. S. A new Mesoproterozoic (1546 MA) thermal event in the Central Karelian Terrane of the Karelian Craton: results of dating zircon from Neoarchean felsic rock of the Kostomuksha Greenstone Belt. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 124–129. doi: 10.17076/geo2150

Funding. This work is a contribution to research by IG KarRC RAS within the theme FMEN-2023-0009 and by IPGG RAS within the theme FMUW-2025-0002.

Архейские кратоны, в том числе Карельский, относятся к числу стабильных структур континентов, однако и они подвержены воздействию разнообразных тектоно-термальных процессов. Последние могут быть связаны с развивающимися вблизи кратонов орогенами, с влиянием мантийных плюмов, с внедрением интрузий. Тектоно-термальные процессы проявляются в Карельском кратоне в виде наложенных деформаций, метаморфизма,

кристаллизации различных генераций цирконов и других минералов-геохронометров (апатита, монацита, сфена, рутила) [Слабунов и др., 2025а и ссылки в ней]. Так, недавнее изучение цирконов из полосчатых железистых кварцитов (BIF) Костомукшского зеленокаменного пояса позволило установить следующие события, сопровождающиеся образованием новых генераций циркона: 2,74–2,72; 2,65; 2,45–2,41 и 1,89–1,83 млрд лет [Slabunov et al., 2024; Слабунов и др., 2025а]. События 2,46 ± 0,11 и 1,87–1,85 млрд лет также зафиксированы и U-Pb- и Pb-Pb-изотопными системами апатита из этих пород [Слабунов и др., 2025б].

Для геохронологического доизучения метариолитов (геллефлинты) костомукшской свиты гимольской серии были выделены цирконы из силла (пробы К22-133), залегающего среди сланцев и BIF в карьере «Южный». Именно из этого силла, но из другой его части (карьер «Центральный»), были ранее выделены и изучены цирконы, которые позволили оценить возраст этих субвулканических пород в 2759 ± 9 млн лет [Слабунов и др., 2021].

Цирконы из проб К22-133 представлены прозрачными бледно-розовыми удлиненными и, реже, короткопризматическими кристаллами с Ку 1:2, 1:3, реже 1:1, размер которых варьирует от 60 до 400 мкм (рис. 1, а, б).

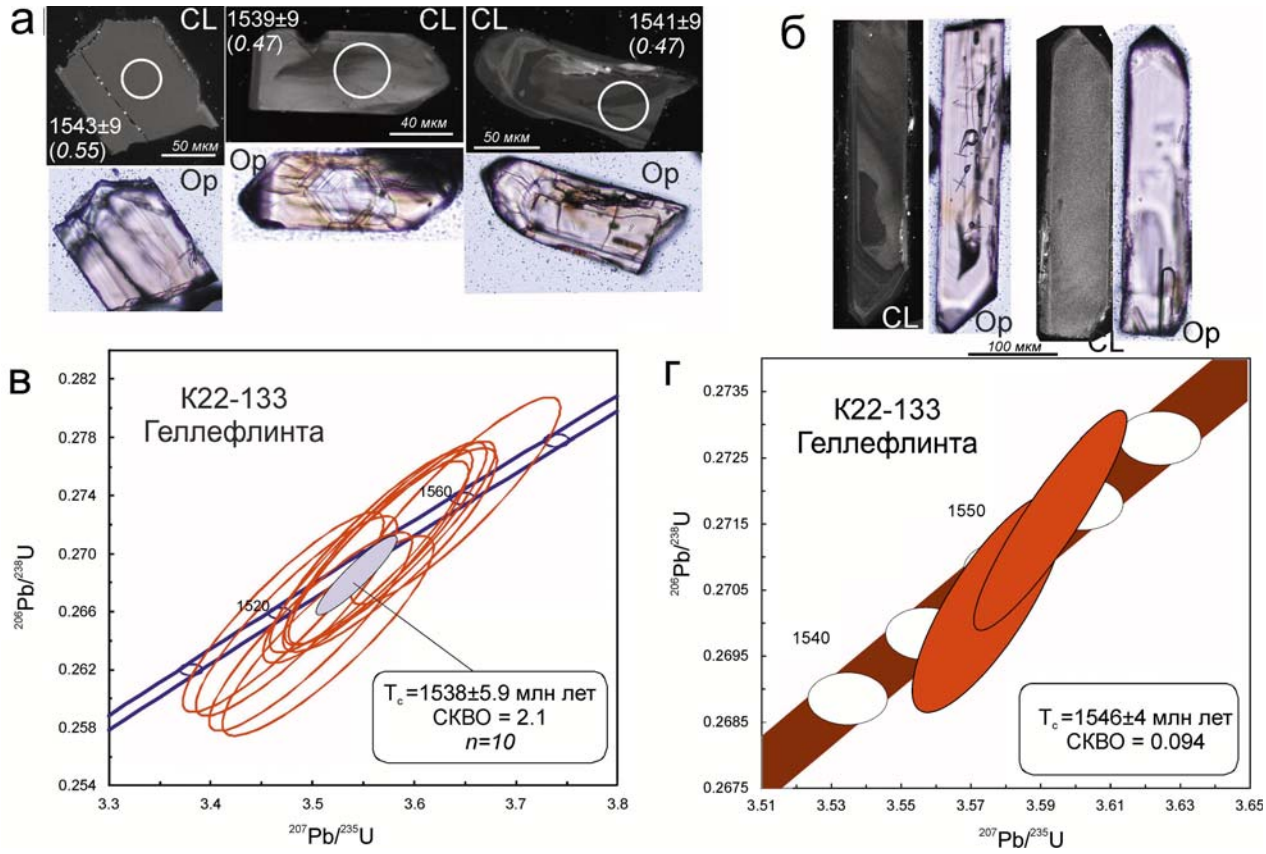


Рис. 1. Микрофотографии кристаллов циркона из силла геллефлинты и результаты геохронологических исследований: а, б – изображение циркона в катодолюминесценции (CL) и проходящем свете (Op) с положением аналитических точек и значениями возраста (207Pb/206Pb), млн лет, в скобках – Th/U-отношение: кристаллы циркона, использованные для U-Th-Pb LA-ICP-MS геохронологических исследований (а), U-Pb CA-ID-TIMS геохронологических исследований (б); в, г – диаграммы с конкордией для циркона: U-Th-Pb LA-ICP-MS исследования (в), U-Pb CA-ID-TIMS исследования (г). Tc – конкордантный U-Pb-возраст

Fig. 1. Microphotos of zircon crystals from sill of halleflinta and the results of geochronological studies: а, б – image of zircon in cathodoluminescence (CL) and translucent light (Op), the position of analytical points and 207Pb-206Pb age values (Ma), Th/U ratio is shown in parentheses: zircon crystals used for U-Th-Pb LA-ICP-MS geochronological study (а), U-Pb CA-ID-TIMS geochronological study (б); в, г – Concordia diagram for zircon: U-Th-Pb LA-ICP-MS study (в), U-Pb CA-ID-TIMS study (г). Tc – concordant U-Pb age

Степень трещиноватости средняя. Характерно большое количество крупных (до 45 мкм) включений, локализованных как в центральной, так и в краевых частях зерен, некоторые из них имеют вытянутую форму. Включения представлены преимущественно апатитом, калиевым полевым шпатом и кварцем. На CL-изображениях большая часть кристаллов характеризуются однородной структурой, но некоторые имеют слабовыраженную осцилляторную зональность (рис. 1, а).

U-Pb-датирование цирконов проведено методом лазерной абляции LA-ICP-MS в лаборатории Геологического института РАН [Sheshukov et al., 2018]. По результатам датирования в 10 аналитических точках получен конкордантный возраст 1538 ± 9 млн лет (рис. 1, в). В ранее изученной пробе цирконов, отобранных из пробы геллефлинты в северной части этого силла [Слабунов и др., 2021], мезопротерозойские цирконы не отмечены. Поэтому для оценки особенностей распределения в пределах силла этой молодой генерации были выделены и изучены цирконы из еще одной пробы, отобранной примерно в 10 м от первой. По зернам из этой выборки получено 13 аналитических точек. U-Pb-возраст по 10 из них показал конкордантное значение 1535 ± 9 млн лет. Кроме того, в этой партии цирконов установлены единичные мезоархейские (2949 ± 7, 2885 ± 8 и 2830 ± 8 млн лет) зерна. Такое же по возрасту зерно отмечено в пробе геллефлинты и ранее [Слабунов и др., 2021], но оно было весьма дискордантным (–5,09 %).

Крайне важно, что два зерна циркона из пробы K22-133 были датированы U-Pb-методом по единичным зернам (CA-ID-TIMS) в лаборатории Института геологии и геохронологии докембрия РАН [Иванова др., 2021]. По результатам получено конкордантное значение возраста 1546 ± 4 млн лет (СКВО = 0,094, вероятность = 0,76) (рис. 1, г).

Таким образом, в неоархейской геллефлинте, слагающей силл, установлены цирконы с мезопротерозойским возрастом (1546–1535 млн лет). Значение возраста, полученное по единичным зернам с использованием предварительной «химической абразии» (1546 ± 4 млн лет), безусловно, обладает большей точностью, но все оценки, полученные с помощью U-Th-Pb LA-ICP-MS и U-Pb CA-ID-TIMS исследований, в пределах погрешности согласуются. Это означает, что в изученных породах силла в мезопротерозое проявлены термальные процессы, приведшие к кристаллизации цирконов. При этом имеющиеся петрографические (существенная перекристаллизация или изменение минерального состава) и геохимические (аномальные содержания подвижных элементов K, Rb) данные не указывают на наличие такой переработки.

Вместе с тем, проведенные исследования геохимии мезопротерозойских цирконов (рис. 2) показали, что они отличаются от неоархейских. Прежде всего эти отличия заключаются в том,

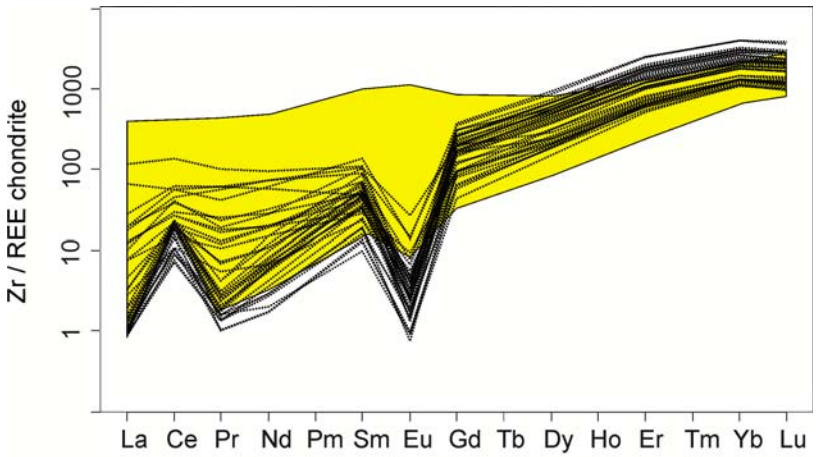


Рис. 2. Спайдерграмма нормированных по хондриту [Nakamura, 1974] содержаний РЗЭ в мезопротерозойских (черные пунктирные линии) и неоархейских (желтое поле [Слабунов и др., 2021]) цирконах из кислых вулканитов (геллефлинты) костомукшской свиты гимольской серии Костомукшского зеленокаменного пояса

Fig. 2. Spidergram for chondrite-normalized [Nakamura, 1974] REE concentrations in the Mesoproterozoic (black broken lines) and Neoarchean (yellow field [Slabunov et al., 2021]) zircons from the felsic volcanics (halleflinta) of the Kostomuksha suite (Gimoly series), Kostomuksha Greenstone Belt

что первые обеднены ЛРЗЭ, характеризуются ярко выраженной положительной аномалией Ce и отрицательной Eu. Такие геохимические отличия указывают на то, что мезопротерозойские флюиды существенно отличались от неоархейских. Они, вероятно, обладали большей фугитивностью кислорода [Hoskin, Schaltegger, 2003].

Главные выводы. В центральной части Карельского кратона впервые установлено проявление мезопротерозойского термального события. Оно хорошо коррелируется по возрасту с поздними фазами анортозит-рапакиви-гранитного магматизма (1547–1530 млн лет), который широко проявлен в южной части кратона вдоль его границы со Свекофеннским орогеном [Куликов и др., 2017 и ссылки в ней]. Возможно, именно его влияние локально проявлено в породах центральной части Центрально-Карельского террейна и установлено в силле геллефлинты Костомукшского зеленокаменного пояса.

Авторы благодарят Т. В. Каулину и С. А. Светова за замечания и конструктивную критику в ходе подготовки рукописи, что позволило существенно ее улучшить.

Литература

Иванова А. А., Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Плоткина Ю. В., Толмачева Е. В., Сырицо Л. Ф., Бочаров В. Н. U-Pb (ID-TIMS) датирование высокоурановых метамиктизированных цирконов: новые возможности известных подходов // Петрология. 2021. Т. 29, № 6. С. 656–667. doi: 10.31857/S0869590321060042

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

Слабунов А. И., Васильева И. М., Ризванова Н. Г., Кервинен А. В. Геохронология апатита из полосчатых железистых кварцитов Костомукшского зеленокаменного комплекса (первые результаты) // Соотношение времени образования магматических формаций и рудных месторождений в металлогенических провинциях Евразии: Мат-лы IX Рос. конф. по изотопной геохронологии. М., 2025а. С. 194–196.

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Кулешевич Л. В., Кевлич В. И. Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита // Геохимия. 2021. Т. 66, № 4. С. 291–307. doi: 10.31857/S0016752521040063

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Мудрук С. В., Максимов О. А., Кервинен А. В. Находка неоархейских (2.71 млрд лет) конгломератов в Костомукшском железорудном районе: к вопросу о самой молодой стратотектонической ассоциации архея Карельского кратона // Доклады РАН. Науки о Земле. 2025б. Т. 520, № 1. С. 33–46. doi: 10.31857/S2686739725010041

Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // Rev. Mineral. Geochem. 2003. Vol. 53. P. 27–62. doi: 10.2113/0530027

Nakamura N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites // Geochim. Cosmochim. Acta. 1974. Vol. 38. P. 757 –775. doi: 10.1016/0016-7037(74)90149-5

Sheshukov V. S., Kuzmichev A. B., Dubenskiy A. S., Okina O. I., Degtyarev K. E., Kanygina N. A., Kuznetsov N. B., Romanjuk T. V., Lyapunov S. M. U-Pb zircon dating by LA-SF-ICPMS at Geological Institute GIN RAS (Moscow) // Book of Abstracts, 10th Int. Conference of the Analysis of Geological and Environmental Materials: Macquarie University, Sydney. 2018. P. 63.

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Zircon from banded iron formation as a sensitive indicator of its polychronous background: a case study on the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield // Int. Geol. Rev. 2024. Vol. 66, no. 6. P. 1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

References

Ivanova A. A., Salnikova E. B., Kotov A. B., Plotkina Yu. V., Tolmacheva E. V., Syritso L. F., Bocharov V. N. U-Pb (ID-TIMS) geochronological studies of high-uranium metamict zircons: new opportunities of familiar approaches. *Petrology*. 2021;29(6):676–685. doi: 10.1134/S0869591121060047

Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem*. 2003;53:27–62. doi: 10.2113/0530027

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 (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. P. 3–41. (In Russ.). doi: 10.17076/geo444

Nakamura N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1974;38:757–775. doi: 10.1016/0016-7037(74)90149-5

Sheshukov V. S., Kuzmichev A. B., Dubenskiy A. S., Okina O. I., Degtyarev K. E., Kanygina N. A., Kuznetsov N. B., Romanjuk T. V., Lyapunov S. M. U-Pb zircon dating by LA-SF-ICPMS at Geological Institute GIN RAS (Moscow). *Book of Abstracts. 10th Int. Conference of the Analysis of Geological and Environmental Materials: Macquarie University, Sydney.* 2018. P. 63.

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Zircon from banded iron formation as a sensitive indicator of its polychronous background: a case study on the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield. *Int. Geol. Rev*. 2024;66 (6):1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Egorov A. V., Kuleshevich L. V., Kevlich V. I. Age of the Archean strata with banded iron formation in the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield: constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. *Geochem*. *Int*. 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Mudruk S. V., Maksimov O. A., Kervinen A.V. Finding of Neoarchean (2.71 Ga) conglomerates in the Kostomuksha Iron Province, Karelian Craton: on the youngest Archean stratotectonic association in the Karelian Craton. *Doklady Earth Sciences*. 2025;520(1):29–42. doi: 10.31857/S26867397250104e9

Slabunov A. I., Vasil'eva I. M., Rizvanova N. G., Kervinen A. V. Apatite geochronology from banded iron formation, Kostomuksha greenstone complex (first results). *Sootnoshenie vremeni obrazovaniya magmaticheskikh formatsii i rudnykh mestorozhdenii v metallogenicheskikh provintsiyakh Evrazii: Mat-ly IX Ros. konf. po izotopnoi geokhronologii = Correlation of forming time of magmatic complexes and ore deposits in the Eurasian metallogenic provinces. Proceedings of the IX Russian conference on isotope geochronology.* Moscow; 2025. P. 194–196. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 25.07.2025; принята к публикации / accepted: 06.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Слабунов Александр Иванович
д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геологии и геодинамики докембрия
e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

Кервинен Анна Валерьевна
научный сотрудник
e-mail: kervinen@mail.ru

Сальникова Екатерина Борисовна
канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: katesalnikova@yandex.ru

Ерофеева Ксения Геннадьевна
канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник
e-mail: xenin.erofeeva@ya.ru

Дубенский Александр Сергеевич
канд. хим. наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник
e-mail: alexchem206@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Slabunov, Alexander
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Chief Researcher

Kervinen, Anna
Researcher

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

Erofeeva, Ksenia
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher

Dubenskiy, Alexander
Cand. Sci. (Chem.), Head of Laboratory, Leading Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 130–133
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 130–133
DOI: 10.17076/geo2167

УДК 552.4

ЭВОЛЮЦИЯ ГРАНИТОИДНОГО МАГМАТИЗМА И ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОРЫ И АККРЕЦИОННО-КОЛЛИЗИОННЫХ СОБЫТИЙ НА ЮГО-ЗАПАДЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА В АРХЕЕ

О. М. Туркина

Институт геологии и минералогии СО РАН (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090)

Представлены данные по возрасту, составу и изотопным параметрам архейских гранитоидов Шарыжалгайского выступа (ЮЗ Сибирского кратона). От палеоархея к мезо- и неоархею произошло изменение в составе доминирующих гранитоидов с ростом содержания K_2O, снижением Eu/Eu* и уменьшением ε_{Nd} пород и ε_{Hf} цирконов. Палеоархейский этап ТТГ-магматизма отражает образование сиалической коры за счет плавления мафических субстратов, что подтверждается положительными значениями для пород (ε_{Nd} от 0 до + 3,1) и цирконов (ε_{Hf} от 0 до +6,3). В мезоархее было проявлено четыре этапа гранитоидного магматизма на рубежах ~ 3,0; 2,95; 2,88 и 2,86 млрд лет. Изотопные параметры, такие как отрицательные значения ε_{Nd} и ε_{Hf} мезоархейских калиевых гранитоидов и кислых вулканитов, отражают смену роста коры ее переработкой. Асинхронность этапов палео- и мезоархейского магматизма в различных блоках Шарыжалгайского выступа свидетельствует о различной эволюции их литосферы. Новый импульс формирования ювенильной коры на рубеже 2,7 млрд лет фиксируется неоархейскими кислыми метавулканитами с ε_{Nd} от +1,2 до –2,4 и ε_{Hf} от +2,9 до –0,5. Синхронное проявление неоархейского (2,55–2,53 млрд лет) гранитоидного магматизма и высокотемпературного метаморфизма фиксирует коллизионные процессы и амальгамацию архейских блоков в структуру неоархейского супертеррейна. Изотопные параметры неоархейских гранитоидов (ε_{Nd} от –4,4 до –1,7 и ε_{Hf} от –6,2 до – 3,7), а также мезоархейские ядра цирконов отражают рециклинг архейской коры путем внутрикорового плавления и ее кратонизацию.

Ключевые слова: архей; гранитоиды; геохимия; эволюция коры; кратонизация

Для цитирования: Туркина О. М. Эволюция гранитоидного магматизма и этапы формирования коры и аккреционно-коллизионных событий на юго-западе Сибирского кратона в архее // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 130–133. doi: 10.17076/geo2167

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ИГМ СО РАН (122041400044-2).

O. M. Turkina. EVOLUTION OF GRANTOID MAGMATISM AND STAGES OF CRUSTAL GROWTH AND ACCRETION-COLLISION EVENTS IN THE SOUTHWESTERN SIBERIAN CRATON IN THE ARCHAEAN

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Koptyuga Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)

The paper presents data on the age, composition, and isotopic parameters of Archean granitoids of the Sharyzhalgai uplift (southwestern Siberian Craton). From the Paleoarchean to the Meso- and Neoarchean, there was a change in the composition of the predominant granitoids with an increase in K_2O content, a decrease in Eu/Eu*, and a decrease in ε_{Nd} of the rocks and ε_{Hf} of zircons. The Paleoarchean stage of TTG magmatism reflects the growth of sialic crust due to melting of the mafic source, which is confirmed by positive values for rocks (ε_{Nd} from 0 to +3.1) and zircons (ε_{Hf} from 0 to +6.3). The Mesoarchean saw four stages of granitoid magmatism at ~ 3.0, 2.95, 2.88, and 2.86 Ga. The isotopic features, negative values of ε_{Nd} and ε_{Hf} of Mesoarchean potassium granitods and felsic volcanics are evidence that crustal growth was followed by crustal reworking. The asynchrony of the stages of Paleo- and Mesoarchean magmatism in different blocks of the Sharyzhalgai uplift indicates a distinct evolution of their lithosphere. A new impulse of juvenile crust formation at ca. 2.7 Ga is recorded in Neoarchean felsic metavolcanics with ε_{Nd} from +1.2 to –2.4 and ε_{Hf} from +2.9 to –0.5. The simultaneous Neoarchean (2.55–2.53 Ga) granitoid magmatism and high-grade metamorphism record collision processes and the amalgamation of crustal blocks into a Neoarchean superterrane structure. The Neoarchean granitoids' isotopic parameters (ε_{Nd} from –4.4 to –1.7 and ε_{Hf} from –6.2 to –3.7) as well as Mesoarchean inherited zircon cores reflect the recycling of the Archaean crust by intracrustal melting and its cratonization.

Keywords: Archaean; granitoids; geochemistry; crustal evolution; cratonization

For citation: Turkina O. M. Evolution of grantoid magmatism and stages of crustal growth and accretion-collision events in the Southwestern Siberian Craton in the Archaean. *Труды Карельского научного центра РАН.* 2025. № 5. С. 130–133. doi: 10.17076/geo2167

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to IGM SB RAS (122041400044-2).

Введение

Гранитоиды являются главным компонентом всех архейских провинций, их формирование на протяжении архея отражает различные стадии эволюции от роста ювенильной коры за счет мафических источников до ее дифференциации в результате внутрикорового плавления. Важным индикатором тектонических событий служит синхронность проявления гранитообразования в разных блоках коры, поскольку это маркирует этапы их амальгамации в ходе аккреционно-коллизионных событий, то есть гранитоиды выступают в качестве «сшивающих» комплексов. Синтез информации по архейскому гранитоидному магматизму [Laurent et al., 2014; Moyen, Laurent, 2018] показал изменение в характере гранитоидного магматизма на протяжении архея со сменой доминирующих в палео-мезоархее тоналит-трондьемит-гранодиоритовых (ТТГ) ассоциаций разнообразными типами гранитоидов (санукитоиды, калиевые биотитовые граниты, «гибридные» граниты) в неоархее, что отражает вовлечение в плавление различных мантийных и коровых источников. Результаты выполненного автором синтеза данных по геологии, возрасту, геохимии и изотопному составу гранитоидов и кислых вулканитов, развитых в Шарыжалгайском выступе, представленные в настоящей работе, позволяют проследить эволюцию литосферы юго-запада Сибирского кратона на протяжении архея.

Состав архейских гранитоидов

Шарыжалгайский выступ состоит из четырех блоков: Булунского и Онотского гранит-зеленокаменных (ГЗ) и Иркутного и Китойского гранулито-гнейсовых, финальная амальгамация которых произошла в палеопротерозое и фиксируется субсинхронным внедрением гранитоидов в интервале 1,84–1,86 млрд лет во всех блоках [Туркина, Капитонов, 2019].

Наиболее ранние проявления кислого магматизма представлены типичными для палеоархея ТТГ-комплексами (гнейсы и интрузии) в Онотском и Булунском ГЗ-блоках и протолитами гранулитов среднего состава в Иркутном блоке. Они формировались в узком диапазоне 3,4–3,3 млрд лет, представлены преимущественно низкокалиевыми трондьемитами и тоналитами, но обладают широкими вариациями $(La/Yb)_n$ (6–72) и Sr/Y (9–135), что указывает на генерацию расплавов из базитовых источников в условиях как умеренного, так и низкого давления [Туркина и др., 2013; Туркина, 2022].

Формирование мезоархейских гранитоидов и кислых вулканитов отвечает рубежам ~ 3,0; 2,95; 2,88 и 2,86 млрд лет. Первые три возрастные группы включают калиевые гнейсовидные граниты и метариолиты с низкими $(La/Yb)_n$ (3–16) и Sr/Y (0,6–2,3), а также резким Eu-минимумом (Eu/Eu* = 0,25–0,73) [Turkina et al., 2020; Туркина, Сухоруков, 2022]. Их формирование было связано с плавлением коровых сиалических источников в условиях низких давлений. Напротив, гнейсограниты с возрастом ~2,86 млрд лет и кислые гранулиты раннего неоархея (~2,7 млрд лет), представленные в Иркутном блоке, отличаются пониженным содержанием K_2O (тоналиты и гранодиориты), имеют фракционированные РЗЭ-спектры ((La/Yb)n = 144 и 10–78) практически без Eu-аномалии (Eu/Eu* = 0,7–1), а также повышенное Sr/Y (166 и 20–62). Их формирование происходило из базитовых источников при повышенных давлениях.

Неоархейские гранитоиды, образованные в узком временном интервале 2,53–2,55 млрд лет, отличаются наибольшим разнообразием составов. Среди них обособляется три группы. Первая представлена амфиболсодержащими тоналитами и гранодиоритами с повышенными $(La/Yb)_n$ (17–29) и Sr/Y (15–52) и слабой Eu-аномалией (Eu/Eu* = 0,5–0,92). Вторая группа отличается более высоким содержанием K_2O, включает гранодиориты, редко граниты, но сходна с гранитоидами первой группы по индикаторным отношениям: $(La/Yb)_n$ (15–31), Sr/Y (18–45) и Eu/Eu*(0,5–1,2). Генерация расплавов этих гранитоидов, вероятно, происходила из базитовых низко- и повышеннокалиевых источников. Третья доминирующая группа представлена высококалиевыми биотитовыми гранитами и лейкогранитами. Для большинства из них типичны фракционированные спектры РЗЭ ($(La/Yb)_n$ = 20–89) с отчетливым Eu-минимумом (Eu/Eu* = 0,13–0,52) при пониженном Sr/Y (7–34). Образование таких гранитоидов, вероятно, происходило из коровых сиалических субстратов.

Заключение

Синтез представленных геохимических данных и изотопного состава гранитоидов позволяет судить об этапах эволюции литосферы юго-запада Сибирского кратона в архее. Палеоархейский этап ТТГ-магматизма отражает образование инициальной сиалической коры за счет плавления мафических субстратов, что подтверждается положительными значениями для пород (ε_{Nd} от 0 до + 3,1) и цирконов (ε_{Hf} от 0 до +6,3). Мезоархейские калиевые гранитоиды и риолиты (3,0–2,88 млрд лет) характеризуются преимущественно отрицательными величинами ε_{Nd} (от –3,8 до +0,3), что предполагает доминирующую переработку палеоархейской коры и подтверждается изотопным составом Hf для цирконов из риолитов (ε_{Hf} от –8,5 до +1,1). Новый импульс формирования ювенильной коры с рубежа 2,86 до 2,7 млрд лет фиксируется проявлениями базитового магматизма, а также неоархейскими кислыми метавулканитами с ε_{Nd} от +1,2 до –2,4 и ε_{Hf} от +2,9 до –0,5. Асинхронность проявления палео- и мезоархейского магматизма в различных блоках Шарыжалгайского выступа свидетельствует об индивидуальной истории формирования их литосферы. Неоархейский этап характеризуется синхронным образованием разнообразных гранитоидов в трех из четырех блоков, что предполагает их амальгамацию на рубеже 2,55–2,53 млрд лет в структуру неоархейского супертеррейна. В пользу коллизионной природы гранитоидов свидетельствует разнообразие их геохимических типов, а также субсинхронный высокотемпературный метаморфизм. Изотопные параметры неоархейских гранитоидов (ε_{Nd} от –4,4 до –1,7 и ε_{Hf} от –6,2 до –3,7), а также мезоархейские ядра цирконов отражают рециклинг в результате внутрикорового плавления, что привело к кратонизации архейской коры.

Литература

Туркина О. М. Раннедокембрийская эволюция коры Иркутного блока Шарыжалгайского выступа (юго-запад Сибирского кратона): синтез U-Pb, Lu-Hf и Sm-Nd изотопных данных // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 2. С. 163–182. doi: 10.15372/GiG2020191

Туркина О. М., Капитонов И. Н. Источники палеопротерозойских гранитоидов (Шарыжалгайский выступ, юго-запад Сибирского кратона): от литосферной мантии до верхней коры // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 4. С. 489–513.

Туркина О. М., Капитонов И. Н., Сергеев С. А. Изотопный состав Hf в цирконе из палеоархейских

плагиогнейсов и плагиогранитоидов Шарыжалгайского выступа (юг Сибирского кратона) и его значение для оценки роста континентальной коры // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. С. 357–370.

Туркина О. М., Сухоруков В. П. Раннедокембрийский гранитоидный магматизм Китойского блока и этапы коллизионных событий на юго-западе Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 5. С. 745–763.

Laurent O., Martin H., Moyen J. F., Doucelance R. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of "modern-style" plate tectonics between 3.0-2.5 Ga // Lithos. 2014. Vol. 205. P. 208–235. doi: 10.1016/j.lithos.2014.06.012

Moyen J. F., Laurent O. Archean tectonic systems: a view from igneous rocks // Lithos. 2018. Vol. 302-303. P. 99–125. doi: 10.1016/j.lithos.2017.11.038

Turkina O. M., Sukhorukov V. P., Sergeev S. A. Mesoarchean bimodal volcanic rocks of the Onot greenstone belt, southwestern Siberian Craton: implications for magmatism in an extension/rift setting // Precambr. Res. 2020. Vol. 343. Art. 105731. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105731

References

Laurent O., Martin H., Moyen J. F., Doucelance R. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of "modern-style" plate tectonics between 3.0-2.5 Ga. *Lithos*. 2014;205:208–235. doi: 10.1016/j.lithos.2014.06.012

Moyen J. F., Laurent O. Archean tectonic systems: a view from igneous rocks. *Lithos*. 2018;302-303:99–125. doi: 10.1016/j.lithos.2017.11.038

Turkina O. M. Early Precambrian crustal evolution in the Irkut Block (Sharyzhalgai Uplift, southwestern Siberian Craton). *Russ. Geol. Geophys.* 2022;63:137–152.

Turkina O. M., Kapitonov I. N. The sources of Paleoproterozoic collisional granitoids (Sharyzhalgai Uplift, southwestern Siberian Craton): from lithospheric mantle to upper crust. *Russ. Geol. Geophys.* 2019. Vol. 60. P. 414–434.

Turkina O. M., Sukhorukov V. P. Early Precambrian granitoid magmatism of the Kitoy Block and stages of collisional events in the southwestern Siberian Craton. *Russ. Geol. Geophys.* 2022;63:620–635.

Turkina O. M., Kapitonov I. N., Sergeev S. A. The isotope composition of Hf in zircon from Paleoarchean plagiogneisses and plagiogranitoids of the Sharyzhalgai Uplift (southern Siberian Craton): implications for the continental crust growth. *Russ. Geol. Geophys*. 2013;54:272–282.

Turkina O. M., Sukhorukov V. P., Sergeev S. A. Mesoarchean bimodal volcanic rocks of the Onot greenstone belt, southwestern Siberian Craton: implications for magmatism in an extension/rift setting. *Precambr. Res.* 2020;343:105731. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105731

Поступила в редакцию / received: 04.08.2025; принята к публикации / accepted: 08.08.2025.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Туркина Ольга Михайловна

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: turkina@igm.nsc.ru

CONTRIBUTOR:

Turkina, Olga

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

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 134–149
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 134–149
DOI: 10.17076/geo2192

УДК 001 + 55 (470.22)

ВЕТЕРАНЫ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ – СОТРУДНИКИ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ

А. В. Первунина, В. В. Щипцов*

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

Статья подготовлена к 80-летию Великой Победы. Приводится информация об историческом опыте военно-геологического обслуживания в практике научных исследований во время Великой Отечественной войны. Подчеркнута роль политической географии и военной географии как двух взаимосвязанных дисциплин, изучающих пространственные аспекты политической и военной деятельности соответственно. Показана активная оборона войск Карельского фронта и тружеников тыла на территории Карелии и Кольского полуострова в 1941–1944 гг. Приводятся краткие очерки о ветеранах – сотрудниках Института геологии в военный период: профессоре П. А. Борисове, чл.-корр. АН СССР К. О. Кратце, профессоре К. А. Шуркине, А. И. Богачеве, Г. Ц. Лаке, Н. Ф. Демидове, Б. Я. Алексееве, А. В. Рылееве, А. С. Гуляеве, Б. А. Юдине, В. Н. Юдине и др. Описаны боевые и жизненные эпизоды с их участием и их научная деятельность в мирное время в стенах Карельского научного центра.

Ключевые слова: Великая Отечественная война; ветераны; геология; институт; Карельский научный центр РАН

Для цитирования: Первунина А. В., Щипцов В. В. Ветераны Великой Отечественной войны – сотрудники Института геологии // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 134–149. doi: 10.17076/geo2192

A. V. Pervunina, V. V. Shchiptsov*. GREAT PATRIOTIC WAR VETERANS AT THE INSTITUTE OF GEOLOGY

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

This article was prepared in connection with the 80th Victory Day. Information is provided on the historical experience of military geological services in scientific research practices during the Great Patriotic War. We emphasize the role of political geography and military geography as two interrelated disciplines, which study the spatial aspects of political and military activities, respectively. The active defense of the Karelian Front troops and home-front workers in Karelia and on Kola Peninsula in 1941–1944 is showcased. The article provides short notes about war veterans employed by the Institute of Geology during the Great Patriotic War: Professor P. A. Borisov, Corresponding

Academician K. O. Kratz, Professor K. A. Shurkin, A. I. Bogachev, G. Ts. Luck, N. F. Demidov, B. Ya. Alekseev, A. V. Ryleev, A. S. Gulyaev, B. A. Yudin, V. N. Yudin, and others. Some wartime episodes and their work at the Karelian Research Centre after the war are described.

Keywords: Great Patriotic War; veterans; geology; institute; Karelian Research Centre

For citation: Pervunina A. V., Shchiptsov V. V. Great Patriotic War veterans at the Institute of Geology. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 134–149. doi: 10.17076/geo2192

Введение

Организация научных исследований в Карелии началась с Распоряжения Совета народных комиссаров СССР от 24 октября 1945 года, разрешающего Академии наук СССР и Совету народных комиссаров КФССР создать в Петрозаводске Карело-Финскую научно-исследовательскую базу АН СССР. На распорядительном заседании 31 января 1946 года Президиум АН СССР рассмотрел вопрос об организации в Карелии Научно-исследовательской базы АН СССР, которая в 1949 г. была преобразована в Карело-Финский филиал АН СССР. Первым директором утвержден академик, геолог-петрограф А. А. Полканов. Одним из звеньев созданной базы стал сектор геологии с химической и шлифовальной мастерской. Заведовал сектором геологии профессор П. А. Борисов. Первое время по совместительству здесь работали старшие научные сотрудники к. г.-м. н. Г. М. Саранчина, д. г.-м. н. В. С. Слодкевич, к. г.-м. н. В. Д. Никитин, младшие научные сотрудники к. г.-м. н. Т. В. Перекалина, К. М. Кошиц, Н. А. Волотовская, В. Н. Нумерова, Г. О. Глебова-Кульбах, Г. С. Бискэ, З. В. Туробова, старший коллектор О. А. Рийконен, рабочий В. И. Робонен, руководитель химической лаборатории М. А. Тойкка, старший инженер В. А. Ахвонен и коллектор Г. Ц. Лак [Академическая…, 2006].

18 мая 1961 года вышел приказ по КФ АН СССР о том, что во исполнение Постановления Президиума АН СССР и Приказа по КФ АН СССР на базе существующих в Карельском филиале отдела петрографии и минералогии и отдела региональной геологии с их подразделениями организуется Институт геологии. Была определена и структура института, которая включала отдел региональной геологии (заведующий В. А. Соколов), отдел минералогии и петрографии (заведующий К. О. Кратц), отдел четвертичной геологии и геоморфологии (заведующая Г. С. Бискэ), отдел минерального сырья с группой экономики и лабораторией минерального сырья (заведующий П. А. Борисов), химико-аналитическую лабораторию с группами химического анализа, спектрального анализа, рентгеноскопии, шлихового анализа и механического разделения минералов (заведующая В. А. Ахвонен), а также геологический музей (руководитель В. Н. Юдин). В штате института числился 51 человек, в том числе 25 научных и 26 научно-технических сотрудников [Щипцов, Голованова, 2006].

К сожалению, сотрудники института – ветераны Великой Отечественной войны остались лишь в нашей памяти и в рядах Бессмертного полка (рис. 1). Имена их известны, и им, сражавшимся на фронтах или труженикам тыла, не дожившим до Победы или ушедшим из жизни уже в мирное время, посвящена наша статья. С 80-летием Великой Победы!

История военно-геологического обслуживания в практике и возобновление научных исследований в регионе

Во время Первой мировой войны военно-геологическое обслуживание армий стало планомерным, приняло широкий и систематический характер. В английской, американской, германской и австро-венгерской армиях создавались специальные военно-геологические службы, а в русской, французской и некоторых других армиях к решению геологических вопросов в театре военных действий привлекались научно-исследовательские учреждения и гражданские геологи.

В 1930-х годах в европейских странах данные военной геологии использовались при строительстве оборонительных линий (Мажино, Зигфрида, Маннергейма). В дальнейшем широкое распространение в военных целях получило изготовление геологических и гидрогеологических карт, которые использовались при организации водных преград и осуществлении войсковых маневров [Ферсман, 1941б].

Рис. 1. Ветераны Великой Отечественной войны – сотрудники Карельского научного центра. 7 мая 1985 года. Слева направо: Н. Ф. Демидов, Б. А. Юдин, А. В. Рылеев, Н. П. Лебедев, Г. М. Кириленко, В. А. Доильницына, Г. Ц. Лак, А. И. Богачев, Е. В. Нефедов

Fig. 1. Veterans of the Great Patriotic War – employees of the Karelian Research Centre. May 7, 1985. From left to right: N. F. Demidov, B. A. Yudin, A. V. Ryleev, N. P. Lebedev, G. M. Kirilenko, V. A. Doilnitsyna, G. Ts. Lak, A. I. Bogachev, E. V. Nefedov

Военно-геологическое обслуживание в России включает в себя комплекс мероприятий, направленных на обеспечение нужд армии и флота в области геологии. Это изыскание и добыча полезных ископаемых для военных нужд, водоснабжение войск, инженерно-геологическое изучение местности для строительства и обороны, а также создание военно-геологических карт и проведение разведки [Ферсман, 1941б].

В СССР военно-геологические отряды (ВГО) были созданы и использовались во время Великой Отечественной войны. В них в основном входили геологи-четвертичники и почвоведы. Геологов-поисковиков мобилизовывали для разведки и добычи полезных ископаемых. Оценивались запасы минеральных ресурсов противника и союзников [Козловский, 2009]. Создавались оперативные оборонные комиссии по маскировке, аэросъемке, редким элементам, географии соседних стран, гидрогеологии, строительным материалам фронта.

В 1941 году А. Е. Ферсман определил, что основные задачи геолога в тылу и на фронте должны быть обращены к проблемам военной геологии. Он стремился зажечь геологов энтузиазмом борьбы тем оружием, которым они научились пользоваться при овладении природой, – геологическим знанием и пониманием местности, ее строения и богатства недр. Личный опыт первой мировой войны А. Е. Ферсман связывал с опытом иностранных геологов, полученным ими при мировых столкновениях военной техники, военных знаний и военного духа [Ферсман, 1941б].

В укреплении обороны страны огромное значение отводилось строительству Беломорско-Балтийского канала, которое завершилось в 1939 году. Канал намного сократил путь между Ленинградом и Архангельском. Железная дорога, построенная в 1941 году вдоль южного берега Белого моря от станции Сорока до пункта Обозерский, также имела важное стратегическое значение. По этой дороге из Архангельска уже в августе 1941 года шли эшелоны с войсками и грузами.

Известно, чтобы захватить Кольский полуостров, фашисты разработали специальный план под условным названием «Голубой песец». Враг планировал нанести внезапный удар сразу по нескольким направлениям, отрезать Заполярье от остальной территории страны и прервать северные морские коммуникации СССР. С первого дня войны Мурманская область была отнесена к прифронтовым и находилась на военном положении. Мобилизационная телеграмма за подписью наркома обороны СССР С. К. Тимошенко пришла в Кировск 22 июня в 18.45 (в июле 1941 года пост наркома обороны занял И. В. Сталин, а С. К. Тимошенко стал его заместителем).

В 1941 году против СССР в стане союзников нацистской Германии выступила Финляндия. Половина Карелии (в то время – Карело-Финской ССР), включая Петрозаводск, была оккупирована финскими войсками. Петрозаводск был переименован финнами в Яанислинна, что в переводе с финского означает «Онежская крепость».

В Карелии финские войска действовали самостоятельно, участвуя в реализации плана «Барбаросса». В июне–сентябре 1941 года финны заняли принадлежавшие им до 1940 года Карельский перешеек и Северное Приладожье, затем перешли старую границу, замкнув на Карельском перешейке блокаду Ленинграда с севера, а в Восточной Карелии продвигаясь к Мурманской железной дороге и Онежскому озеру. Одновременно часть аэродромов в Северной Финляндии были предоставлены самолетам Люфтваффе, которые бомбили Мурманск и советские порты на Кольском полуострове и в Карелии.

Карельский фронт был образован директивой Ставки Верховного Главнокомандования от 23 августа 1941 года путем разделения протяженного (1600 км) Северного фронта на Ленинградский и Карельский с целью надежно обеспечить северный стратегический фланг Советских Вооруженных Сил, а также сухопутные и морские коммуникации страны на Севере. Местом расположения штаба фронта был определен г. Беломорск. На особую инженерную группу под командованием полковника М. П. Полуэктова возлагалась задача создать зоны оперативных заграждений в Повенецком и Заонежском заливах, по льду Онежского озера и его восточному берегу. В результате принятых мер врагу так и не удалось выйти на восточный берег Повенецкого и Заонежского заливов.

Физико-географические условия Карелии создавали большие трудности для ведения боевых действий: ограничивали маневр, затрудняли инженерные работы, постройку дорог, аэродромов и других сооружений, применение танков и артиллерии. Даже зимой, когда болота и озера замерзали, проходимость автотранспорта и военной техники из-за глубокого снега не улучшалась, а ухудшалась. Работа тыла была сложная, требовались специальные меры по бытовому устройству личного состава и дорожному обеспечению. Труднопроходимая местность и слабая дорожная сеть в полосе фронта допускали ведение боевых действий только по отдельным направлениям. Важнейшие из них: мурманское, кандалакшское, кестеньгское, ухтинское, ребольское, поросозерское, петрозаводское и олонецкое. Бои на этих направлениях могли вестись лишь вдоль дорог в полосе 20–50 км, изолированно друг от друга на 30–200 км, а вне их, хотя полностью не исключались, требовали тщательной подготовки войск и инженерного обеспечения.

В 1941 году в нескольких километрах от Лоухи и Чупы было остановлено наступление дивизии СС «Эдельвейс», которая стремилась перерезать Кировскую (бывшую Мурманскую) железную дорогу. Заключенных из лагерей заранее перевели в центральные области. Все старинные карельские деревни между Белым морем и финской границей, как и 300 лет назад, были сожжены, но теперь уже отступающими частями Красной Армии – нужно было лишить врага опорных баз. Население эвакуировали в Чупу. Чупа-пристань и Чупа-станция оказались почти на передовой. Мужчины ушли на фронт, их рабочие места заняли женщины и дети. В Чупу немцы не прорвались. В начале войны население было эвакуировано в Архангельскую область. С развязыванием войны в Лоухи началась постройка аэродрома силами женщин, стариков и детей. Мужчины в постройке аэродрома участия почти не принимали, так как все были на фронте. Рудники начали работать с января 1942 г. В шахтах работали в основном женщины. На этой территории была необходимость в защите железной дороги как важного стратегического объекта. Дорогу бомбили, рельсы разлетались, а их требовалось постоянно поддерживать в целостности. Поэтому большинство работников станции не эвакуировали.

25 июня 1941 года А. Е. Ферсмана вызвали в Москву для организации в Академии наук СССР оборонных комиссий с привлечением геологов, географов, минералогов, ботаников, почвоведов. Ставились задачи по определению условий фортификационного строительства и добычи строительных материалов,

по водоснабжению, маскировке, поиску новых месторождений стратегического сырья – источников алюминия, хрома, никеля, кобальта, марганца, корунда, серы, солей [Козловский, 2009]. А. Е. Ферсман писал, что современная война ставит огромные и совершенно новые задачи перед геологической мыслью и настоятельно зовет геологов на передовые позиции борьбы [Ферсман, 1941б].

По инициативе академика Ферсмана общий план и развитие работ были одобрены Президиумом Академии наук СССР. В соответствии с утвержденным Президиумом АН СССР планом работ силами своих научно-исследовательских групп и лабораторий оборонная комиссия самостоятельно осуществляла научно-исследовательскую, опытно-производственную и оперативную работу, а также руководила и координировала работы по оборонной тематике институтов, входящих в Отделение геолого-географических наук [Козловский, 2009].

Военные инженеры относили Карельский фронт к «некультурным» (изобилие лесов, болот и озер, бездорожье – это большие трудности для инженерного обеспечения действий войск) и особенно нуждались в помощи геологов. Командиром военно-геологического отряда Карельского фронта был назначен известный геоморфолог, профессор Московского университета К. К. Марков. В 1942 г. Марков разработал лекционный курс «Военная география». По заданию штаба инженерных войск Карельского фронта он занимался вопросами военной географии. Военные геологи выполнили поставленные задачи на Карельском фронте.

Политическая география и военная география – две взаимосвязанные, но разные дисциплины, изучающие пространственные аспекты политической и военной деятельности соответственно. Политическая география рассматривает территориальную организацию политической жизни, включая государства, границы, политические системы и процессы. Военная география, в свою очередь, изучает географическую среду с точки зрения ее влияния на военные действия и стратегии, включая театры военных действий, стратегические ресурсы и возможности [Коллинз, 2005].

Войска Карельского фронта зимой 1941/42 гг. вели активную оборону. Одновременно продолжалось совершенствование оборонительных сооружений, укреплялись старые и создавались новые защитные рубежи. Привлечение новых документов позволило детально рассмотреть инженерное оборудование обороны в условиях горной местности Заполярья и лесисто-болотистых районов Карелии. Характерными чертами военного искусства в обороне было умение советского командования сосредоточить имеющиеся силы и средства на направлениях возможных ударов врага с учетом выгодных для обороны участков местности. В ходе обороны и благодаря трудовому подвигу трудящихся Заполярья и Карелии, оказывавших помощь воинам, были созданы условия для перехода в наступление. Наступление проводилось в третьем периоде боевых действий и охватывало шесть месяцев с июня по ноябрь 1944 года.

В августе 1941 года Кольская база АН СССР была эвакуирована в г. Сыктывкар Коми АССР и объединена с Северной базой АН СССР (г. Архангельск). Директор базы – А. Е. Ферсман, его заместитель – Ф. М. Терновский, ученый секретарь и руководитель спецотдела – К. В. Хоменко. Б. Н. Мелентьев и З. М. Гилева приступили к работам по разложению различными реагентами перовскита Африкандского месторождения. «В основу исследований, которые мы тогда начинали, – вспоминал Б. Н. Мелентьев, – был положен принцип: разрабатывать технологию и изучать такие виды сырья, которые определяют лицо Кольского полуострова». Это великолепно показал академик А. Е. Ферсман в своей книге «Полезные ископаемые Кольского полуострова» [1941а]. В книге он отметил «двенадцать китов», среди которых одним из главных являются руды титана. В результате исследований Б. Н. Мелентьева, З. М. Гилевой и Я. Г. Горощенко был впервые разработан метод кислотной переработки перовскита, сохраняющий практическое значение и сегодня. За эту книгу А. Е. Ферсман удостоен Сталинской премии в 1943 году. В том же году большинство ученых постепенно начали возвращаться в Кировск. Возобновил работу комбинат «Апатит», а Кольской научной базе были предоставлены помещения в поселке Кукисвумчорр взамен сгоревшего в 1941 году здания «Тиетты» на оз. Малый Вудъявр. Постановление о возобновлении деятельности Кольской научной базы им. С. М. Кирова АН СССР принято в апреле 1944 года.

7 октября 1944 года части 14-й армии и корабли Северного флота при поддержке авиации 7-й воздушной армии и ВВС флота начали Петсамо-Киркенесскую наступательную операцию, имевшую целью полное изгнание немецко-фашистских захватчиков из Советского Заполярья. Героическая оборона Заполярья, самоотверженность тружеников Мурманской области сковали значительные силы противника в Арктике, обеспечили бесперебойную

работу стратегических морских и сухопутных коммуникаций на Севере страны, регулярное поступление военных грузов от наших союзников по антигитлеровской коалиции.

Подвиги советских воинов и тружеников тыла на Кольской земле были по достоинству оценены Советским государством. Указом Президиума Верховного Совета СССР от 5 декабря 1944 года учреждена медаль «За оборону Советского Заполярья», которой награждены более 300 тысяч защитников северных рубежей Отчизны и 24 тысячи трудящихся области. В 1982 году Мурманск, а в 1984 г. Кандалакша награждены орденами Отечественной войны 1-й степени. Указом Президиума Верховного Совета СССР от 6 мая 1985 года за мужество и стойкость, проявленные при защите города трудящимися, воинами Советской Армии и Военно-Морского Флота в годы Великой Отечественной войны, Мурманску присвоено звание «Город-герой» с вручением ордена Ленина и медали «Золотая Звезда».

Летом 1944 года началась Выборгско-Петрозаводская наступательная операция. 20 июня Красная Армия взяла Выборг, а на следующий день перешла в наступление в Восточной Карелии, где начала теснить войска финской Олонецкой группы (*Aunuksen ryhmä*). Финны отступали в некоторых местах без боя и к концу августа полностью ушли за линию границы СССР. В июне 1944 года началась Свирско-Петрозаводская операция против финских войск в Южной Карелии как часть Выборгско-Петрозаводской стратегической наступательной операции. Наступление началось из района Лодейного Поля. Понимая бессмысленность сопротивления, финны не стали удерживать Петрозаводск, и 28 июня 1944 года в город без боя вошли бойцы Онежского десанта. Эта дата в наши дни отмечается как День города. Указом Президента РФ 6 апреля 2015 года за мужество, стойкость и массовый героизм, проявленный защитниками города в борьбе за свободу и независимость Отечества, Петрозаводску присвоено почетное звание Российской Федерации «Город воинской славы».

Участники Великой Отечественной войны – сотрудники Института геологии КарНЦ РАН

П. А. БОРИСОВ (1877–1963)

Рассказ о ветеранах войны начнем с патриарха карельской геологии, выдающегося ученого и педагога Петра Алексеевича Борисова [Соколов, 1972] (рис. 2). Доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки КФССР П. А. Борисов награжден двумя орденами Трудового Красного Знамени и медалями, в том числе «За оборону Ленинграда». В 1903 г. окончил естественное отделение физико-математического факультета Петербургского университета. Первые его печатные работы опубликованы в «Трудах Петербургского общества естествоиспытателей» в 1907 году. В 1910 году вышла работа «Очерк геологии и полезных ископаемых Олонецкой губернии». С 1923 года П. А. Борисов возвращается в полюбившуюся Карелию и приступает к изучению пегматитов Сороко-Кемского района. Ведутся систематические экспедиционные исследования керамических и слюдяных пегматитов Северной Карелии, проводимые Институтом Севера. Открыты крупнейшие месторождения пегматитов, которые выдвинули Карелию как первоклассную сырьевую базу керамического сырья, что позволило уже в 1926 году отказаться от его ввоза [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012; Борисов…, 2013].

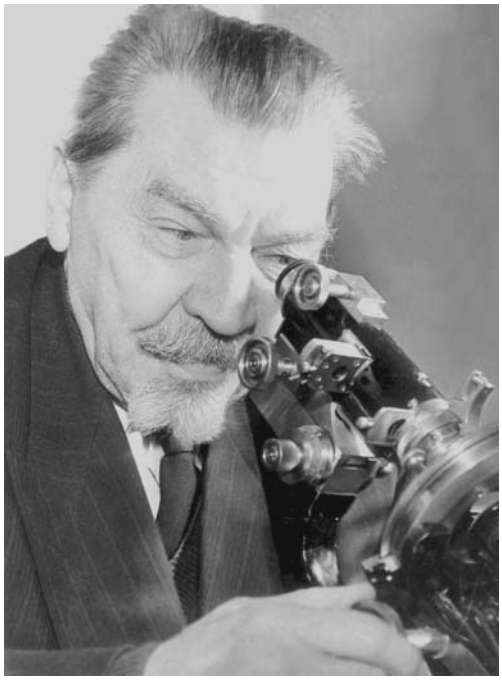


Рис. 2. Петр Алексеевич Борисов
Fig. 2. Petr A. Borisov

С момента организации Ленинградского геологического управления П. А. Борисов руководит всеми работами Управления по горнорудному сырью. Воспитана большая семья геологов-поисковиков, разведчиков и исследователей, открывших крупные промышленные месторождения. Это Н. И. Рябов, Г. Н. Бунтин, Л. А. Косой, П. В. Соколов, В. А. Токарев,

Л. Я. Харитонов, Н. А. Волотовская, В. Н. Нумерова и др. [Борисов…, 2013]. По его инициативе поставлена проблема нового в СССР вида абразивов – граната. Им же выдвинута проблема кианитов.

С начала войны по постановлению Военного совета Северного флота П. А. Борисов консультировал работы по военной геологии. До определенного момента он жил в своем родном Пушкине, но в августе ему предложили переехать в Ленинград. К. О. Кратц сумел достать машину, пользуясь служебным положением бойца истребительного батальона, и вывез П. А. Борисова с женой из Пушкина. Через несколько дней город был занят врагом. В январе 1942 года по причине большой потери сил П. А. Борисов был эвакуирован из блокадного Ленинграда в г. Советск Кировской области. Здоровье стало улучшаться [Соколов, 1972].

Петр Алексеевич продолжал работать над комплексным изучением проблемы кейвских сланцев. Ей посвящена сводная работа «Минеральные ресурсы Кейвской геологической формации». С 1942 по 1944 г. он исполнял обязанности старшего инженера-геолога Горьковского геологического управления Министерства геологии СССР, а в 1944–1946 гг. был старшим научным сотрудником и профессором кабинета минералогии Института земной коры Ленинградского госуниверситета.

В 1946 году именно по инициативе крупнейшего и авторитетнейшего знатока недр П. А. Борисова создана Карело-Финская научная база Академии наук СССР в Петрозаводске. В секторе геологии были заложены традиции и зародились предпосылки для создания Института геологии, первым директором которого в мае 1961 года стал профессор П. А. Борисов.

В адресе 1948 года в связи с его 70-летием указано: «Крупный ученый и педагог, обаятельный человек, отзывчивый товарищ, всегда оказывавший поддержку молодым геологам в их движении по пути научного совершенствования, Вы, Петр Алексеевич, всей своей деятельностью показываете пример беззаветного служения Родине и Народу. Желаем Вам еще многих лет плодотворной работы на благо нашей Социалистической Отчизны…». Это пожелание осуществилось. Жизнь и деятельность профессора П. А. Борисова – это летопись геологических исследований Карело-Кольского региона, прекрасный пример самоотверженного служения Родине [Борисов, 1948, 1956, 1963].

К. О. КРАТЦ (1914–1983)

Кауко Оттович Кратц (рис. 3), член-корреспондент АН СССР, доктор геолого-минералогических наук, лауреат Государственной премии СССР, лауреат премии им. А. П. Карпинского, заслуженный деятель науки Карельской АССР, кавалер двух орденов Трудового Красного Знамени. В Садбери (Канада) окончил горно-техническое училище. В 1932 г. переехал вместе с родителями в СССР. В 1939 г. окончил геолого-почвенный факультет Ленинградского государственного университета и был направлен на работу на Кольский полуостров [Кратц…, 2004; Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012; Митрофанов, Щипцов, 2014].

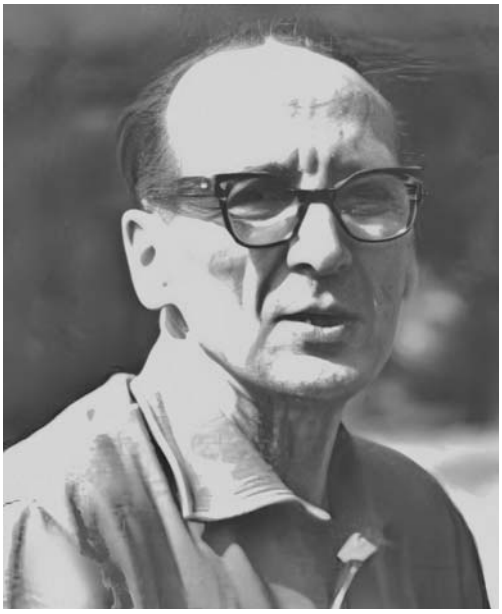


Рис. 3. Кауко Оттович Кратц
Fig. 3. Kauko O. Kratts

В 1941 году призван в истребительные части УНКВД на военную службу, но летом 1942-го демобилизован по состоянию здоровья и по выходе из госпиталя направлен в Иркутск, где участвовал в геологической съемке слюдяных месторождений Бирюсинской и Мамско-Витимской провинций. В Петрозаводске погрузился в исследования геологических объектов Карелии – аспирантская учеба и серьезная петрологическая камеральная обработка материалов. Весной 1950 г. К. О. Кратц защищает кандидатскую диссертацию «Иотнийские диабазовые интрузии Карелии и их железорудное оруденение». Примечательно, что А. А. Полканов называл своих аспирантов К. О. Кратца и Д. А. Великославинского

соавторами в разработке важного петрологического направления [Митрофанов, Щипцов, 2014].

К. О. Кратц стал одним из ведущих специалистов по геологии докембрия СССР [Геология..., 1960]. В 1962 году защитил докторскую диссертацию «Геология карелид Карелии». С таким же названием вышла его книга [Кратц, 1963]. С 1962 по 1966 г. был директором Института геологии в Петрозаводске. В 1966 году К. О. Кратц назначается директором Лаборатории геологии докембрия СССР и переезжает в Ленинград. В 1967 году Лаборатория получает новый статус – Института геологии и геохронологии АН СССР. С этого времени К. О. Кратц определял основной тренд идей советской геологической науки в области докембрия.

К. А. ШУРКИН (1913–1994)

Кирилл Александрович Шуркин (рис. 4), доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик РАЕН. В 1932 году поступил в Ленинградский государственный университет и в 1938 году окончил его с отличием по специальности «геолог-геохимик» [Ученые..., 2012]. Работал начальником геологической партии Наркомата стройматериалов (1938–1939 гг.) и главным геологом Хетоламбинского районного управления (1939–1941 гг.).

Рис. 4. Кирилл Александрович Шуркин, 1945 г.

Fig. 4. Kirill A. Shurkin, 1945

Кирилл Александрович был призван на войну 26 июня 1941 года в звании лейтенанта. С 7 июля 1941 года находился в действующей армии начальником химической службы артиллерийско-пулеметного батальона, в августе 1941 года получил ранение в ногу – пуля вошла в бедро и вышла из голени (по воспоминаниям дочери, https://pobeda.spbu.ru/vospominaniya/item/2493-shurkin-kirill.html). Госпиталь оставили при отступлении, и Шуркин около трех недель ползал по лесам, пока его не нашел лесник, который потом скрывал К. А. Шуркина в землянке до ноября. В ноябре выпал снег, теперь следы могли выдать укрытие. Один из местных жителей предложил проводить К. А. Шуркина к партизанам. Но проводник оказался предателем, таким образом Кирилл Александрович с ноября 1941 года находился в плену сначала в поселке Оредеж, затем в Даугавпилсском концлагере. В июне 1944 года он бежал из лагеря и, перейдя линию фронта, стал рядовым бойцом стрелковой дивизии 2-го Прибалтийского фронта. Закончил войну в латвийском городе Тукумс. Награжден орденом Отечественной войны 1-й степени, орденом «Знак Почета», медалями «За боевые заслуги», «За отвагу» и др.

С 1946 по 1952 г. работал в Карело-Финской научно-исследовательской базе АН СССР на разных научных должностях (рис. 5). В 1949 году по материалам исследований в Карелии защитил кандидатскую диссертацию «Геология северной части Питкярантского поля керамических пегматитов» [Ученые..., 2012].

Рис. 5. К. А. Шуркин консультирует К. Н. Инину и З. Г. Митрофанову в рабочем кабинете Института геологии в Петрозаводске, 1952 г.

Fig. 5. K. A. Shurkin advises K. N. Inina and Z. G. Mitrofanova in the office of the Institute of Geology in Petrozavodsk, 1952

В 1952 г. К. А. Шуркин переехал Ленинград и стал работать в ЛАГЕД, а затем в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН до выхода на пенсию с должности заведующего лабораторией магматизма. К его капитальным трудам относятся «Магматические

формации раннего докембрия территории СССР» (в трех книгах) [Магматические..., 1980а, б, в] и «Стратиграфия СССР. Нижний докембрий. Европейская часть СССР» [Беккер и др., 1989]. С. В. Обручев считал его одним из крупнейших специалистов по геологии докембрия Балтийского щита. Старший научный сотрудник ИГГД РАН Т. Ф. Зингер так писала о нем: «В моей памяти запечатлелось отношение Кирилла Александровича к полевой документации. К. А. Шуркин был замечательным учителем. Его полевые дневники до сих пор не устарели. С ним очень интересно было работать на обнажениях. Сначала он просил самых молодых по «рангу» геологов описать увиденные структурные взаимоотношения пород, а потом рассказывал, что видит сам».

А. И. БОГАЧЕВ (1921–1999)

Алексей Иванович Богачев, геолог, петрограф, кандидат геолого-минералогических наук. В 1938 году поступил на геологический факультет Ленинградского госуниверситета, учеба продолжалась в МГУ, размещенном в тот период в Ашхабаде. Уже после войны, в 1949 г. окончил геолого-почвенный факультет ЛГУ [Ученые..., 2012; Щипцов, 2021].

В 1942 г. был призван в армию и зачислен курсантом Академии химической защиты им. К. Ворошилова. С июля 1943 года и до окончания Великой Отечественной войны воевал на Ленинградском (с июля 1943 по февраль 1945 г.) и Белорусском (с февраля по май 1945 г.) фронтах. Имеет боевые награды – орден Красной Звезды, медали «За оборону Ленинграда», «За взятие Берлина», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». Его служба в Красной Армии закончилась только в 1947 г. в должности командира химической службы воинской части зенитного артиллерийского полка в советской оккупационной зоне в Германии в звании капитана [Щипцов, 2021] (рис. 6).

Рис. 6. Капитан А. И. Богачев перед демобилизацией, 1947 г.

Fig. 6. Captain A. I. Bogachev before demobilization, 1947

После окончания учебы в ЛГУ был направлен на работу в Северо-Западное геологическое управление на должность старшего геолога, а с 1953 года работал отраслевым инженером по цветным и редким металлам. В период 1954–1959 гг. основным объектом был Елетьозерский массив. В 1961 г. А. И. Богачев защитил кандидатскую диссертацию «Дифференцированные габброиды Елетьозерского массива». В 1963 году вышла в свет коллективная монография с его участием «Геология и петрология Елетьозерского массива» [Богачев и др., 1963]. А. И. Богачев стал одним из первых сотрудников Института геологии и в 1962 году назначается на должность заведующего отделом минералогии и петрографии. В 1964 году избран на должность старшего научного сотрудника. В 1966 году стал заместителем директора по научной работе, а в апреле 1968 года Президент АН СССР М. В. Келдыш подписал указ об утверждении А. И. Богачева в должности заместителя председателя Президиума Карельского научного центра АН СССР по научной работе.

В 1977 году Алексей Иванович избран по конкурсу на должность заведующего лабораторией минералогии, геохимии и металлогении (с 1978 года это лаборатория металлогении). Деятельно и заинтересованно участвовал в организации совместных исследований ПГО СЗТГУ и Института геологии. Пример – совместная программа «Принципы выделения рудоносных структур Карелии и методы локального прогнозирования».

Г. Ц. ЛАК (1925–2013)

Гарри Цалелович Лак, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник. Главные исторические трагедии XX века зацепили его юность и молодость. Однако он не только нашел дело своей жизни, но и оказал большое влияние на развитие геологической науки в Карелии [Горюнова, Лак, 2010].

Рис. 7. Г. Ц. Лак и летчик М. Косюк, 1954 г.
Fig. 7. G. Ts. Lak and pilot M. Kosyuk, 1954

Походы в начале войны в военкомат в Туве в Красноярском крае наталкивались на безоговорочный отказ, но однажды нашелся выход из тупика. Шел 1944 год. После трехмесячного обучения в полку в Омске Г. Лак назначен командиром отделения разведки и направлен в разведроту артиллерийского полка 70-й армии 2-го Белорусского фронта (рис. 7). Он принимал участие в боевых действиях в Польше и Германии, не раз лишь случай спасал ему жизнь. Воспоминания об этих эпизодах включены в биографическую книгу «Во власти своей судьбы». Например: «Однажды нас крепко зацепило. От прямого попадания снаряда нам удалось увернуться, бросившись в канаву, по-зимнему влажную и сырую, но осколки все же накрыли меня. К счастью, весь осколочный пучок принял на себя теодолит в деревянной коробке. А если бы на спине у меня его не было? Вот из таких «если» и состоит война». Затем его перевели в штаб полка переводчиком. И там очередной минометный шквал обернулся для молодого бойца тяжелым ранением. Обычно такие травмы завершались демобилизацией, но знание немецкого языка сделало Г. Лака незаменимым, и его вернули в полк. Даже по завершении войны он в качестве переводчика участвовал в работе Особого отдела. Г. Ц. Лак вернулся к матери и сестре только в октябре 1945 года [Лак, 2000].

Гарри Цалелович был принят на работу в Карело-Финскую научно-исследовательскую базу АН СССР на должность младшего коллектора 1 ноября 1947 года. Выходец из буржуазной Латвии, он не имел даже восьмилетнего образования (рижская гимназия на латышском языке в СССР не засчитывалась). Пришлось начинать его с нуля: в 1949–1951 гг. обучался диатомовому анализу на кафедре низших растений ЛГУ, в 1961 г. окончил в Петрозаводске заочную среднюю школу, экстерном в МГУ защитил диплом по специальности «геоморфология», в 1970 г. завершил обучение в заочной аспирантуре и в том же году защитил кандидатскую диссертацию на ученом совете геолого-химического отделения Академии наук Эстонии в Таллине [Лак, 2000; Академическая…, 2006].

Он проработал в Институте геологии более 40 лет. В 1954 г. опубликовал первый очерк по ископаемым диатомитам на Северо-Западе России. Среди его публикаций видное место занимают монографии «Строение и геологическая история котловины Онежского озера» [1971] и «Ладожское озеро (развитие рельефа и условия формирования четвертичного покрова котловины)» [1978]. А еще Г. Ц. Лак написал воспоминания в жанре романа-исповеди [Лак, 2000; Горюнова, Лак, 2010].

Награжден орденом и медалями, в том числе боевыми: «За боевые заслуги», «За взятие Варшавы», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» [Академическая…, 2006].

Б. Я. АЛЕКСЕЕВ (1912–1977)

Борис Яковлевич Алексеев (рис. 8), геолог, химик, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии и разведки слюды. Окончил геологический факультет Ленинградского госуниверситета в 1941 году. Участник Великой Отечественной войны. Отмечен боевыми наградами [Академическая…, 2006].

С 1946 года работал в поисково-разведочных и геолого-съемочных партиях в Карелии, на Кольском полуострове, в Средней Азии, преимущественно связанных с работами на слюду. В 1964 г. избран по конкурсу на должность заведующего отделом слюды Института геологии КФ АН СССР. Разработал и внедрил методику разведки глубоко залегающих пегматитовых тел. Основной труд – монография с соавторами «Геологические основы разведки слюдяных месторождений Карелии» [Алексеев и др., 1974].

Рис. 8. Борис Яковлевич Алексеев, 1974 г.

Fig. 8. Boris Ya. Alekseev, 1974

Н. Ф. ДЕМИДОВ (1920–1999)

Николай Федорович Демидов, геолог, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник. Окончил геологический факультет Карело-Финского госуниверситета [Академическая…, 2006; Геологическое…, 2008] (рис. 9).

Н. Ф. Демидов принимал участие в Великой Отечественной войне в составе 952-й стрелковой дивизии на Ленинградском фронте в районе г. Пушкина с марта 1942 года. Мобилизован военкоматом г. Сыктывкара, где он планировал поступить на геологический факультет эвакуированного Карело-Финского госуниверситета. На Ленинградском фронте проявил исключительную отвагу, смелость и мужество (источник – «Книга памяти», https:/pamyat-naroda.ru). В бою перед ранением вел перестрелку с противником и наносил удары по появляющимся одиночным целям. Задача взвода автоматчиков состояла в том, чтобы захватить и удержать мост до перехода наших частей через реку. В бою при атаке огневых точек противника получил тяжелое пулевое ранение в левую руку, когда в непосредственном соприкосновении расстреливал врага из своего автомата в упор, открывая путь пехотным подразделениям. За этот бой награжден медалью «За боевые заслуги». Позже по состоянию здоровья признан негодным к военной службе.

В 1948 году, по окончании учебы в госуниверситете (это был второй выпуск), стал работать в Карело-Финской научно-исследовательской базе АН СССР и затем в новых геологических подразделениях, в частности, в созданном

Рис. 9. В. И. Робонен, Н. Ф. Демидов, Б. А. Юдин, студенты Карело-Финского госуниверситета, 1948 г.

Fig. 9. V. I. Robonen, N. F. Demidov, B. A. Yudin, students of the Karelian-Finnish State University, 1948

в 1961 г. Институте геологии. Изучал протерозойские образования Карелии. В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию «Протерозой Кукасозерско-Тикшеозерской зоны карелид Северной Карелии». С 1968 по 1972 г. был ученым секретарем института.

А. В. РЫЛЕЕВ (1927–1991)

Александр Васильевич Рылеев, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией природного и технического камня.

Рис. 10. Студент Александр Рылеев, 1955 г.

Fig. 10. Student Alexander Ryleev, 1955

В 1944 году поступил в военное училище. Награжден медалью «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». Демобилизован в 1953 году в звании старшего лейтенанта. В 1953 году поступил на геологоразведочный факультет Карело-Финского госуниверситета (рис. 10). Окончил ПГУ в 1958 году в возрасте 31 года [Геологическое..., 2008]. В 1958–1961 гг. – инженер-геолог Читинского ГУ. С 1961 года работал в Институте геологии на разных должностях. В 1970 году защитил кандидатскую диссертацию «Литолого-фациальный анализ ятулийских отложений Центральной Карелии – основа для поисков месторождений полезных ископаемых» по специальности «петрография, литология, минералогия». Основное научное направление определилось как изучение и поиски месторождений блочного камня, научным руководителем которого он стал, возглавив лабораторию природного и технического камня. Исследовано 800 проявлений природного камня, из них 70 отнесены к перспективным. Его имя занесено в Книгу трудовой славы КАССР [Академическая..., 2006].

Б. А. ЮДИН (1925–1997)

Борис Александрович Юдин, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник (рис. 1 и 9).

Родился в Прионежском районе Карелии. С 1943 года участвовал в боевых операциях Красной Армии в звании старшего сержанта в составе 109-го артиллерийского корпуса на Ленинградском фронте. Один из примеров, когда начальник поста Б. А. Юдин отлично организовал разведку: было засечено и затем уничтожено 5 артиллерийских батарей противника. Отличная работа способствовала прорыву обороны финнов. 20 июня 1944 года младший сержант 28-го артиллерийского полка Ленинградского фронта Б. А. Юдин при выполнении боевого задания получил тяжелое осколочное ранение левого предплечья и левой кисти с отрывом фаланги второго пальца, в результате демобилизован (источник – «Книга памяти», https:/pamyat-naroda.ru). Боевые награды – орден Славы 3-й степени, медаль «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.»

В 1949 году окончил обучение на геологическом факультете Карело-Финского государственного университета по специальности «геолог-минералог» [Геологическое..., 2008]. Работал в Геологическом институте КФ АН СССР. В 1960 году защитил кандидатскую диссертацию «Цагинский массив габбро-лабрадоритов и связанные с ними титано-магнетитовые месторождения». В Институте геологии КарНЦ РАН работал в должности старшего научного сотрудника в 1981–1986 гг. в лаборатории рудных месторождений [Академическая..., 2006]. Главной темой была связь титано-магнетитовых руд с магматическими комплексами [Юдин, 1980]. Наиболее важный результат – монография «Окисные железо-титановые и железные руды магматических формаций Карелии и Кольского полуострова» [Юдин, 1987].

В. Н. ЮДИН (1920–1978)

Виктор Николаевич Юдин, геолог-геохимик. В армию был призван в ноябре 1939 года, служил в гаубичном артиллерийском полку. Участвовал в осаде и штурме крепости Бреслау (Вроцлав) 13 февраля – 6 мая 1945 года в ходе Нижне-Силезской операции. Демобилизован в мае 1945 года в звании капитана. Награжден орденом Красной Звезды и медалью «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (источник – «Книга памяти», https:/pamyat-naroda.ru)

Окончил геологический факультет Карело-Финского госуниверситета (выпуск 1950 г.) [Геологическое..., 2008] (рис. 11). Там же обучался в аспирантуре на кафедре минералогии и петрографии. С 1953 по 1960 г. – на преподавательской работе в ПГУ, в 1958 году – и. о. декана геологоразведочного факультета. С 1961 по 1978 год работал в Институте геологии КФ АН СССР [Академическая..., 2006].

Рис. 11. В. Н. Юдин, студент Карело-Финского госуниверситета, 1947 г.

Fig. 11. V. N. Yudin, student of the Karelian-Finnish State University, 1947

А. С. ГУЛЯЕВ (1923–1993)

Александр Сергеевич Гуляев – сотрудник института с 1971 по 1991 год, воевал на 2-м Белорусском фронте в истребительных авиационных полках с 24 июня 1944 г. В приводимых материалах использованы некоторые данные из «Книги памяти» (https:/pamyat-naroda.ru).

В 1944 году произвел 15 успешных боевых вылетов, из них 10 на сопровождение штурмовиков и 5 на прикрытие своих войск над полем боя. 13 августа 1944 года истребители противника пытались атаковать штурмовиков, но благодаря решительным и дерзким атакам пары ЛА-5 атаки отражены и штурмовики успешно выполнили задание без потерь в этом бою. Младший лейтенант А. С. Гуляев показал себя смелым воздушным бойцом, отлично пилотирующим самолет. В Померании произвел 23 боевых вылета, а 25 апреля 1945 г. сбил самолет противника. Вылетев на свободную охоту в паре со старшим лейтенантом В. А. Леонтьевым, встретили два Ме-109. В результате сбили оба самолета, один из которых на счету Гуляева. При штурмах живой силы и техники противника уничтожил 12 автомашин с живой силой и грузом, поджег три строения и один воинский эшелон. Младший лейтенант А. С. Гуляев проявлял смелость и находчивость, умело маневрируя, надежно прикрывал ведущего, среди летного состава пользовался боевым авторитетом.

За боевые заслуги награжден орденами Красного Знамени, Отечественной войны 1-й и 2-й степени, Красной Звезды и медалями «За боевые заслуги», «За освобождение Варшавы» и «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». После войны служба в армии продолжалась до 1971 года. Закончил службу в звании полковника. С 1971 по 1991 г. работал лаборантом в лаборатории шунгитов Института геологии КарНЦ АН СССР (рис. 12).

Рис. 12. Лаборатория шунгитов, во втором ряду второй справа А. С. Гуляев, 1974 г.

Fig. 12. Shungite laboratory, in the second row, second from the right A. S. Gulyaev, 1974

Из старшего поколения сотрудников института надо вспомнить еще несколько имен участников Великой Отечественной войны: Доильницына Валентина Александровна, старший химик аналитической лаборатории с 1946 по 1975 г. (рис. 13); Кириленко Гранит Михайлович, старший инженер лаборатории региональной геологии с 1965 по 1985 г., выпускник Карело-Финского госуниверситета 1954 года (рис. 14); Нефедов Егор Васильевич, старший инженер геологического музея с 1979 по 1983 г., выпускник Карело-Финского университета 1951 года (рис. 15); Лебедев Николай Павлович, старший лаборант лаборатории региональной геологии с 1966 по 1985 г. (рис. 1). Все они «нюхали порох» и имеют боевые награды. В 1944 году поступил в военное училище Владимир Алексеевич Соколов (рис. 16), но затем перешел на геологоразведочный факультет в Карело-Финский госуниверситет (выпуск 1950 года).

Заключение

В крайне непростой обстановке военного времени определялись контуры политических решений в организации научных исследований в области военной геологии. Мужской контингент будущих научных кадров уходит на фронт. В Сыктывкар эвакуируется молодой Карело-Финский госуниверситет. Первые две группы студентов-геологов представлены почти только девушками. Юноши, мечтавшие стать геологами, призваны в ряды Красной Армии.

Рис. 13. Валентина Александровна Доильницына

Fig. 13. Valentina A. Doilnitsyna

Рис. 14. Гранит Михайлович Кириленко

Fig. 14. Granit M. Kirilenko

Рис. 15. Егор Васильевич Нефедов

Fig. 15. Egor V. Nefedov

Рис. 16. Владимир Алексеевич Соколов

Fig. 16. Vladimir A. Sokolov

В июне 1944 года принято решение о реэвакуации университета, и 7 августа 1944 года преподаватели с семьями и 171 студент, в том числе 29 выпускников, вернулись в Петрозаводск. В 1945 году начинается подготовка к созданию Карело-Финской научно-исследовательской базы АН СССР. Она открывается в Петрозаводске в январе 1946 года, и сектор геологии входит в ее структуру. Ветераны войны активно включаются в геологические исследования Карелии. Подтягивается новое звено – дети войны. Именно они становятся студентами геологоразведочного факультета ПГУ (бывшего Карело-Финского университета). В 1961 году по Постановлению АН СССР создан Институт геологии – один из самых молодых институтов в стране, в руководстве которого стоят ветераны войны, ставшие первыми кандидатами и докторами наук.

Авторы публикации и коллектив Института геологии КарНЦ РАН в ознаменование двух юбилейных дат – 80-летия Великой Победы и 85-летия ПетрГУ отдают дань памяти и уважения сотрудникам института – героям Великой Отечественной войны и труженикам тыла.

Литература

Академическая наука в Карелии 1946–2006 / Отв. ред. А. Ф. Титов. М.: Наука, 2006. Т. 1. 175 с.

Алексеев Б. Я., Голованова Л. С., Крохин А. И. Геологические основы разведки слюдяных месторождений Карелии. Л.: Наука, 1974. 94 с.

Беккер Ю. Р., Кратц К. О., Соколов В. А., Шуркин К. А., Щербак Н. П. Стратиграфия СССР. Нижний докембрий. Европейская часть СССР. М.: Недра, 1989. Кн. 1. 262 с.

Борисов П. А. Каменные строительные материалы Карелии. Петрозаводск: Карел. кн. изд-во, 1963. 367 с.

Борисов П. А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: Госиздат КФССР, 1956. 92 с.

Борисов П. А. Керамические пегматиты Карело-Финской ССР. Петрозаводск: Госиздат, 1948. 187 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.

Богачев А. И., Зак С. И., Сафронова Г. П., Инина К. А. Геология и петрология Елетьозерского массива габброидных пород Карелии. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 160 с.

Геологическое образование в Петрозаводском государственном университете / Сост. Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 104 с.

Геология СССР. Карельская АССР. Геологическое описание / Ред. К. О. Кратц. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 740 с.

Горюнова Н. Н., Лак Г. Ц. Геологическая судьба Надежды и Гарри (биографический очерк). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 54 с.

Козловский Е. А. Уроки великой войны: геология и национальная безопасность. М.: ВНИИгеосистем, 2009. 598 с.

Коллинз Д. М. Военная география. М.: Научная книга, 2005. 566 с.

Кратц К. О. Геология карелид Карелии // Труды ЛАГЕД АН СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. Вып. 16. 210 с.

Кратц Кауко Оттович. К 90-летию со дня рождения / Сост. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 48 с.

Ладожское озеро (развитие рельефа и условия формирования четвертичного покрова котловины) / Отв. ред. Г. С. Бискэ. Петрозаводск: Карелия, 1978. 205 с.

Лак Г. Ц. Во власти своей судьбы: повесть о жизни. Петрозаводск: Карелия, 2000. 237 с.

Магматические формации раннего докембрия территории СССР. Кн. 1. Магматизм древнейшего докембрия / Отв. ред. В. М. Шемякин, К. А. Шуркин. М.: Недра, 1980а. 285 с.

Магматические формации раннего докембрия территории СССР. Кн. 2. Магматизм подвижных поясов раннего докембрия / Отв. ред. Ф. П. Митрофанов, К. А. Шуркин. М.: Недра, 1980б. 283 с.

Магматические формации раннего докембрия территории СССР. Кн. 3. Орогенный и субплатформенный магматизм раннего докембрия / Отв. ред. К. А. Шуркин. Ф. П. Митрофанов. М.: Недра, 1980в. 266 с.

Митрофанов Ф. П., Щипцов В. В. О К. О. Кратце и К. О. Кратц о себе // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 17. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 7–19.

Соколов В. А. Человек, влюбленный в камни. Рассказ о жизни и деятельности профессора Петра Алексеевича Борисова. Петрозаводск: Карелия, 1972. 108 с.

Строение и геологическая история котловины Онежского озера / Отв. ред. Г. С. Бискэ. Петрозаводск: Карелия, 1971. 74 с.

Ученые Карельского научного центра РАН. Библиографический словарь / Гл. ред. А. Ф. Титов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 420 с.

Ферсман А. Е. Полезные ископаемые Кольского полуострова: Современное состояние, анализ, прогноз. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1941а. 345 с.

Ферсман А. Е. Война и стратегическое сырье. Красноуфимск: Госполитиздат, 1941б. 64 с.

Щипцов В. В. Алексей Иванович Богачев // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 10. С. 109–111.

Щипцов В. В., Голованова Л. С. Институт геологии // Академическая наука в Карелии 1946–2006. М.: Наука, 2006. Т. 2. С. 153–221.

Юдин Б. А. Габбро-лабрадоритовые формации Кольского полуострова и ее металлогения. Л.: Наука, 1980. 169 с.

Юдин Б. А. Окисные железо-титановые и железные руды магматических формаций Карелии и Кольского полуострова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1987. 204 с.

References

Alekseev B. Ya., Golovanova L. S., Krokhin A. I. Geological foundations of mica deposits exploration in Karelia. Leningrad: Nauka; 1974. 94 p. (In Russ.)

Bekker Yu. R., Kratts K. O., Sokolov V. A., Shurkin K. A., Shcherbak N. P. Stratigraphy of the USSR. Lower Precambrian. European part of the USSR. Moscow: Nedra; 1989. Book 1. 262 p. (In Russ.)

Biske G. S. (ed.). Lake Ladoga (development of relief and conditions of formation of the Quaternary cover of the basin). Petrozavodsk: Karelia; 1978. 205 p. (In Russ.)

Biske G. S. (ed.). Structure and geological history of the Lake Onega basin. Petrozavodsk: Karelia; 1971. 74 p. (In Russ.)

Bogachev A. I., Zak S. I., Safronova G. P., Inina K. A. Geology and petrology of the Eletyozersky massif of gabbroic rocks in Karelia. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1963. 160 p. (In Russ.)

Borisov P. A. Ceramic pegmatites of the Karelo-Finnish SSR. Petrozavodsk: Gosizdat; 1948. 187 p. (In Russ.)

Borisov P. A. Karelian shungites. Petrozavodsk: Gosizdat KFSSR; 1956. 92 p. (In Russ.)

Borisov P. A. Stone building materials of Karelia. Petrozavodsk: Karel. kn. izd-vo; 1963. 367 p. (In Russ.)

Collins D. M. Military geography. Moscow: Nauchnaya kniga; 2005. 566 p. (In Russ.)

Fersman A. E. Useful minerals of the Kola Peninsula: current status, analysis, forecast. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1941. 345 p. (In Russ.)

Fersman A. E. War and strategic raw materials. Krasnoufimsk: Gospolitizdat; 1941. 64 p. (In Russ.)

Goryunova N. N., Lak G. Ts. Geological fate of Nadezhda and Harry (a biographical essay). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 54 p. (In Russ.)

Kozlovsky E. A. Lessons of the Great War: geology and national security. Moscow: VNII geosistem; 2009. 598 p. (In Russ.)

Kratts K. O. (ed.). Geology of the USSR. Karelian ASSR. Geological description. Moscow: Gosgeoltekhizdat; 1960. 740 p. (In Russ.)

Kratts K. O. Geology of the karelides in Karelia. *Trudy LAGED AN SSSR = Proceedings of the Laboratory of Precambrian Geology of the Academy of Sciences of the USSR*. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1963. Iss. 16. 210 p. (In Russ.)

Lak G. Ts. In the power of one's destiny: a tale of life. Petrozavodsk: Karelia; 2000. 237 p. (In Russ.)

Mitrofanov F. P., Shchiptsov V. V. About K. O. Kratz and K. O. Kratz about himself. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 17. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. P. 7–19. (In Russ.)

Mitrofanov F. P., Shurkin K. A. (eds.). Igneous formations of the Early Precambrian in the USSR. Book 2. Magmatism of the Early Precambrian mobile belts. Moscow: Nedra; 1980. 283 p. (In Russ.)

Titov A. F. (ed.). Academic science in Karelia in 1946–2006. Moscow: Nauka; 2006. Vol. 1. 175 p. (In Russ.)

Titov A. F. (ed.). Scientists of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Bibliographic dictionary. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 420 p. (In Russ.)

Sharov N. V., Shchiptsov V. V. (comp.). Geological education at Petrozavodsk State University. Petrozavodsk: PetrGU; 2008. 104 p.

Shchiptsov V. V. (comp.). Kratts Kauko Ottovich. On the 90th anniversary of his birth. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. 48 p. (In Russ.)

Shurkin K. A., Mitrofanov F. P. (eds.). Igneous formations of the Early Precambrian in the USSR. Book 3. Orogenic and subplatform magmatism of the Early Precambrian. Moscow: Nedra; 1980. 266 p. (In Russ.)

Shemyakin V. M., Shurkin K. A. (eds.). Igneous formations of the Early Precambrian in the USSR. Book 1. Magmatism of the Oldest Precambrian. Moscow: Nedra; 1980. 285 p. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. Aleksey Ivanovich Bogachev. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2021;10:109–111. (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. Vol. 2. P. 153–221. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. (ed.). Borisov Petr Alekseevich. Dedicated to the 135th anniversary of P. A. Borisov's birth. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 66 p. (In Russ.)

Sokolov V. A. A man in love with stones. A story about the life and work of professor Petr Alekseevich Borisov. Petrozavodsk: Karelia; 1972. 108 p. (In Russ.)

Yudin B. A. Gabbro-labradorite formations of the Kola Peninsula and its metallogeny Leningrad: Nauka; 1980. 169 p. (In Russ.)

Yudin B. A. Oxide iron-titanium and iron ores of igneous formations of Karelia and the Kola Peninsula. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1987. 204 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 04.08.2025; принята к публикации / accepted: 08.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Первунина Аэлита Валерьевна

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

e-mail: aelita@krc.karelia.ru

Щипцов Владимир Владимирович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник

e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Pervunina, Aelita

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

Shchiptsov, Vladimir

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

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 150–152
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 150–152

«ДОКЕМБРИЙСКИЙ САММИТ-2025» – ПУТЬ К ПОЗНАНИЮ НЕВЕДОМОЙ ЗЕМЛИ

Международная научная конференция «Докембрийский саммит-2025» проходила в Карелии с 11 по 17 августа 2025 г. Этот научный форум является продолжением традиционной серии конференций, начатых Институтом геологии в 1997 г. и направленных на обсуждение проблем геологии и геодинамики докембрия. На полях «Докембрийского саммита-2025» ученые из России, Индии, ЮАР, Мексики, США делились новыми результатами исследований ранней истории Земли. Основные темы, которым были посвящены выступления участников: 1) геодинамика ранней Земли и ее численное моделирование; 2) особенности геологического строения, эволюции и металлогении докембрийских комплексов Восточно-Европейского, Сибирского, Антарктического, Африканского, Индийского кратонов, а также Уральского и Гималайского орогенов; 3) магматические и метаморфические процессы в докембрии; 4) глубинное строение литосферы докембрийских структур.

Главным организатором саммита являлся Институт геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск),

Участники международной научной конференции «Докембрийский саммит-2025». Петрозаводск, 11 августа 2025 г.

Группа членов организационного комитета конференции «Докембрийский саммит-2025». Ялгора, 13 августа 2025 г.

но следует отметить и большую роль организационного комитета, в состав которого входили ведущие специалисты по докембрию из Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Иркутска, Апатитов, Воронежа. Работа конференции проходила 11–12 августа в зале заседаний ИГ КарНЦ РАН и транслировалась зарегистрированным пользователям, а 13 августа – в Центре активного отдыха «Ялгора». В оргкомитет конференции поступило 64 тезиса докладов, которые были размещены на сайте ИГ КарНЦ РАН.

Программа конференции включала 44 устных пленарных доклада (из которых девять сделаны онлайн) и девять стендовых, обсуждение докладов и общую дискуссию.

Член оргкомитета д. г.-м. н. Ш. К. Балтыбаев (ИГГД РАН, Санкт-Петербург) выступает в рамках общей дискуссии

Участники научной экскурсии «Ранний докембрий Карельского кратона» на горе Воттоваара

Непосредственное (очное) участие в конференции принимали ученые из России и Индии. География российских участников: Москва (ГЕОХИ РАН, ГИН РАН, ИГД РАН, ИГЕМ РАН, ИМГРЭ, ИФЗ РАН, МГУ им. Ломоносова), Санкт-Петербург (ИГГД РАН, ВНИМИ), Апатиты (ГИ КНЦ РАН), Воронеж (Воронежский государственный университет), Сыктывкар (ИГ Коми НЦ УрО РАН), Новосибирск (ИГМ СО РАН), Иркутск (ИЗК СО РАН), Петрозаводск (ИГ КарНЦ РАН), Костомукша (акционерное общество «Карельский окатыш»). Обращает на себя внимание участие в конференции сотрудников геологической службы действующего горно-обогатительного комбината из Костомукши, что позволяет говорить о взаимном интересе науки и производства.

Кроме докладов и дискуссий для участников конференции проведена серия научных экскурсий. Так, уже 13 августа они осматривали палепротерозойские (суйсарские) вулканиты Ялгоры. А вечером того же дня 18 человек отправились в многодневную (с 14 по 17 августа) научную геологическую экскурсию по маршруту Костомукша–Суккозеро–Воттоваара–Гирвас. Путеводитель этой экскурсии под названием «Ранний докембрий Карельского кратона» был подготовлен в ИГ КарНЦ РАН и вручен всем участникам. В ходе научной экскурсии участники ознакомились с Костомукшским и Гимольским зеленокаменными комплексами (в том числе с недавно открытыми неоархейскими конгломератами), с гранитоидами из их обрамления, с разрезом палеопротерозоя западной и центральной частей Карельского кратона.

Главным итогом прошедшей конференции можно считать то, что она показала: российская наука в области изучения геологии ранней Земли развивается в общемировом тренде, совершенствует методы геохронологических, геохимических исследований, но значительно меньшее внимание уделяется детальному геологическому картированию, использованию стабильных изотопов.

«Докембрийский саммит-2025» продемонстрировал формат конференции, посвященной ранней (докембрийской) геологической истории Земли, не имеющий аналогов в России. В ней участвуют как ведущие ученые, так и начинающие научную карьеру исследователи. Таким образом, ясно, что саммит востребован, и мы будем накапливать знания для новых встреч.

А. И. Слабунов, С. В. Егорова

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 153–154
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 153–154

К 85-летию ПетрГУ

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В ПЕТРОЗАВОДСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

85 лет назад в Петрозаводске был образован Карело-Финский государственный университет. В состав университета входил географо-гидрогеологический факультет, с 1944 года он стал геологическим, а позже был переименован в геологоразведочный (в период с 1951 по 1954 г. находился в составе инженерно-технического факультета). Первым заведующим кафедрой, а позже деканом стал В. С. Слодкевич, который в 1957–1960 гг. руководил Карельским филиалом АН СССР. Помимо него в разные годы деканами факультета были А. Н. Малявкин, В. С. Артамонов, В. Н. Юдин. В памяти выпускников остались обстоятельные лекции профессора Слодкевича, который вел курсы геологии, исторической геологии и палеонтологии. Прекрасно проводили занятия по своим предметам зав. кафедрой и ст. преподаватель П. А. Лупанов (химия), старший преподаватель В. А. Слободская (высшая математика), зав. кафедрой, доцент к. г.-м. н. З. В. Туробова (петрография), старший преподаватель к. г.-м. н. В. М. Рейман (геоморфология, биостратиграфия), старший преподаватель к. г.-м. н. В. И. Робонен (геологическое картирование и геотектоника), и. о. доцента, старший преподаватель Е. А. Гедовиус (разведка месторождений), старший преподаватель к. г.-м. н. К. О. Кратц (физико-химические основы петрографии) и другие.

До 1961 г. факультет выпустил 356 специалистов. Среди выпускников – будущие руководители государственных учреждений, главные геологи партий и экспедиций, лауреат Ленинской премии Б. В. Сулимов, лауреаты Государственной премии В. В. Морозов и Р. В. Цой, доктора наук И. Д. Батиева, А. В. Востряков, В. Я. Горьковец, А. И. Елисеев, В. И. Лебедев, Б. Г. Лутц, А. С. Калинин, А. П. Светов, В. А. Соколов, В. М. Чернов, К. И. Хейсканен, А. Н. Шулепова и целый ряд кандидатов наук. Выпускники факультета стали кадровой основой Института геологии Карельского филиала АН СССР. Вот их имена: Н. Ф. Демидов. В. Я. Мейльбаум (выпуск 1948 года), В. И. Робонен, Б. А. Юдин (выпуск 1949 года), В. А. Костин, А. С. Пекки, В. А. Соколов, Н. Д. Сыромятина, В. Н. Юдин (выпуск 1950 года), В. М. Чернов (выпуск 1952 года), Г. М. Кириленко, А. И. Тухас, И. М. Экман (выпуск 1954 года), 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 (выпуск 1955 года), Ю. И. Сацук (выпуск 1956 года), В. А. Ильин, Р. Б. Бутин (выпуск 1957 года), В. И. Горлов, А. И. Крохин, Т. К. Кулмала, Ю. И. Лазарев, Н. В. Мельянцев, М. Г. Попов, А. В. Рылеев, А. С. Семенов (выпуск 1958 года), 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 (выпуск 1959 года), Е. Ф. Белоусов, В. Я. Горьковец, А. К. Полин, К. И. Хейсканен (выпуск 1960 года).

В 1961 году прием студентов на геологоразведочный факультет в Петрозаводском университете был закрыт. Кадровое пополнение молодыми геологами и геофизиками проходило за счет выпускников Ленинградского, Московского и Воронежского университетов, Ленинградского горного института, а также других вузов страны. С 1990 года распределение молодых специалистов в вузах СССР было отменено, что вызвало приостановку притока выпускников на Север. Так появилась необходимость восстановления подготовки студентов-геологов в ПетрГУ. Для этого потребовалось время и определенные усилия. Благодаря этим усилиям в конце концов университету было выдано разрешение на обучение по специальности 011200 «Геофизика».

Осенью 1997 года первая группа студентов-геофизиков приступила к обучению. Кафедра геофизики на физико-техническом факультете была утверждена приказом ректора ПетрГУ В. Н. Васильева. Заведующим кафедрой назначили в то время доцента Г. Б. Стефановича. Декан факультета профессор В. И. Сысун способствовал эффективному процессу подготовки и проведения обучения. Подготовка кадров геолого-геофизического направления осуществлялась в соответствии с Договором о сотрудничестве и совместной деятельности Петрозаводского университета и Института геологии КарНЦ РАН и «Положением о научно-образовательном геолого-геофизическом центре», которые 18 марта 2003 г. были утверждены ректором ПетрГУ В. Н. Васильевым и директором ИГ КарНЦ РАН В. В. Щипцовым.

В 2009 году приказом ректора ПетрГУ организован горно-геологический факультет (ГГФ). В состав факультета вошла кафедра геологии и геофизики. В 2010 году кафедру возглавил доктор геолого-минералогических наук, профессор В. В. Щипцов. В те годы стали традиционными учебно-ознакомительные экскурсии в геологические музеи, вузы и ведущие геологические организации Москвы, Санкт-Петербурга, Апатитов, такие как МГУ, РГГРУ, СПбГУ, СПбГИ (ТУ), ИХТРЭМС, ВСЕГЕИ, ВИМС и др.

Ученые из ИГ КарНЦ РАН всегда активно участвовали в преподавательской работе на факультете. Штатными сотрудниками кафедры были В. В. Щипцов (зав. кафедрой), 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, П. А. Рязанцев, С. Я. Соколов, Д. В. Рычанчик, М. Ю. Нилов, А. В. Климовский, внештатными – 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, Т. С. Шелехова.

Профессора В. В. Щипцов, член Президиума совета деканов классических университетов России, и Н. В. Шаров, член геофизической секции совета классических университетов, ежегодно участвовали в работе пленума Учебно-методического совета (УМС) по геологии, который проходил на геологическом факультете МГУ и на котором рассматривались вопросы методического характера, проводились консультации и обмен опытом с деканами и заведующими кафедрами геолого-геофизического профиля. Кроме того, профессора, доктора наук В. В. Щипцов, В. Я. Горьковец, Н. В. Шаров и старший преподаватель к. г.- м. н. А. В. Первунина были членами Ученого совета горно-геологического факультета.

На базе Института геологии для студентов факультета в разные годы организовывались курсы лекций и практические семинары приглашенных ведущих ученых страны и иностранных специалистов, таких как член-корр. РАН Л. И. Красный (ВСЕГЕИ), д. г.-м. н. Ю. К. Щукин (Институт динамики литосферы РАН), проф. Б. И. Пирогов (РГГРУ), д. г.-м. н. Е. Г. Ожогина (ВИМС), д. г.-м. н. М. Г. Леонов (ГИН РАН), проф. Г. Штраус (Вестфальский университет, Германия), проф. В. А. Мележик (Геологическая служба Норвегии), проф. П. С. Хёлтта (Университет Хельсинки, Геологическая служба Финляндии).

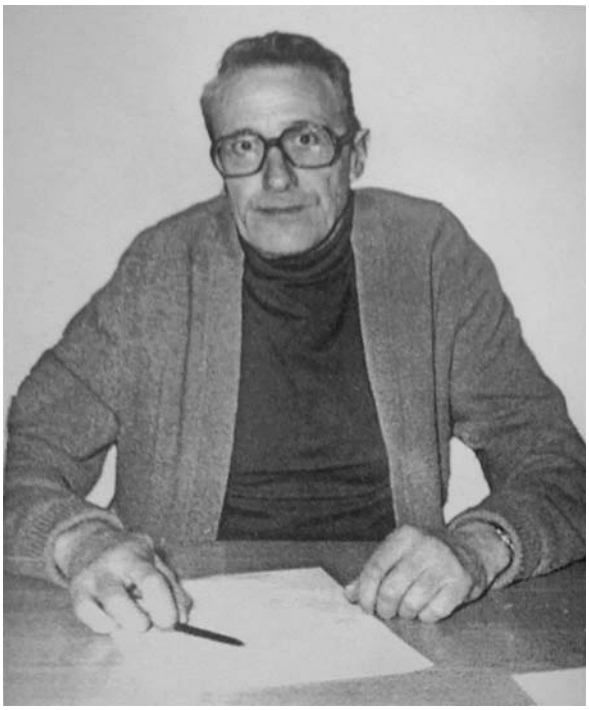
Впоследствии произошла крупная реорганизация в структуре ПетрГУ, как и во многих вузах страны. Горно-геологический факультет был упразднен. В настоящее время обучение по специальности «Геология» проводится в Институте лесных, горных и строительных наук ПетрГУ. В структуре института существует кафедра наук о Земле и геотехнологий. На кафедре реализуется программа бакалавриата 05.03.01 «Геология» и осуществляется комплексный подход к подготовке специалистов, включающий в себя не только традиционные классические методы, но и современные образовательные технологии.

Неотъемлемой частью подготовки геологов являются учебные и производственные практики, где студенты закрепляют теоретический материал и получают практические навыки. Студентам созданы условия для ведения научно-исследовательской деятельности на лабораторной базе кафедры, для участия в научных конференциях, конкурсах и олимпиадах, получения грантов. Выпускники кафедры востребованы на рынке труда и имеют возможность трудоустройства не только в Республике Карелия, но и практически в любом регионе России.

В. В. Щипцов

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 155–156
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 155–156

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ГАРРИ ЦАЛЕЛОВИЧА ЛАКА (1925–2013)



Гарри Цалелович Лак родился 10 марта 1925 года в г. Риге в достаточно состоятельной интеллигентной семье. С младенчества его воспитанием занималась высокопрофессиональная немецкая гувернантка Эльза, имевшая на то специальное образование. Первый язык, на котором он стал говорить, и первая школа были немецкими. Затем по воле отца Гарри, сдав все необходимые вступительные экзамены, поступил в гимназию, где обучение велось только на латышском языке. Счастливое детство длилось ровно пятнадцать лет.

...Только благодаря знанию немецкого языка, и в особенности готического письменного, на котором писались все самые секретные приказы вермахта, осенью 1943 года Лак получил призывное удостоверение в Омский 320-й запасной полк. Через месяц был переведен в разведроту командиром отделения, а затем отправлен в штаб артиллерийского полка Второго Белорусского фронта.

Г. Ц. Лак поступил на работу в Карело-Финскую научно-исследовательскую базу Академии наук СССР на должность младшего коллектора 1 ноября 1947 года. В отряде Галины Сергеевны Бискэ с 25 мая 1947 г. началось его путешествие в геологию, а между тем, он не имел даже восьмилетнего образования (рижская гимназия на латышском языке в СССР не засчитывалась).

По признанию Гарри Цалеловича, переломным стал сезон сорок девятого года, когда ему было доверено самостоятельно провести все аэровизуальные и наземные наблюдения в районе Ухты (ныне Калевала). Осенью он был переведен на должность старшего лаборанта. К 1951 году прошел полный курс обучения диатомовому анализу в Ленинградском университете под руководством известнейшего диатомолога страны, заведующей кафедрой низших растений Валентины Сергеевны Порецкой. Г. Лаком была подготовлена статья под названием «Ископаемые диатомовые четвертичных отложений Западной Карелии». Работа вышла в 1954 году в Ленинградском издательстве АН СССР.

Судьба сложилась так, что привязал его к себе Сайнаволок. Это обстоятельство сыграло существенную роль в судьбе Лака. В 1954 году в Сайнаволоке состоялось знакомство Гарри Лака и Надежды Горюновой.

Зимой 1956 года выходит из печати статья «Позднеледниковые отложения Карело-Финской ССР» (авторы Г. С. Бискэ и Г. Ц. Лак). Той же зимой П. А. Борисов вынес на Президиум филиала Академии наук представление

о переводе Г. Лака на должность младшего научного сотрудника. Президиум поначалу не хотел или не посмел взять на себя такую ответственность. И это было достаточно обоснованным, поскольку у претендента не было даже законченного среднего образования. Но в конце концов Президиум все-таки принял положительное решение с выделением дополнительной ставки. Таким образом, Г. Лак был переведен на должность младшего научного сотрудника с присвоением звания, что было исключительным и невероятным. Весной 1958 года Лак сдал экзамены за неполную среднюю школу, а осенью – вступительные в восьмой класс Республиканской заочной средней школы г. Петрозаводска. Он окончил ее за два года, а затем в 1965 году экстерном окончил МГУ по специальности «геоморфология», за четыре года прошел аспирантскую подготовку. В 1970 г. в Таллине на Большом ученом совете геолого-химического отделения АН Эстонии Г. Лак защищает кандидатскую диссертацию.

На протяжении многих лет он занимался изучением ископаемой диатомовой флоры четвертичных отложений Карелии, а также вопросами геоморфологии. Возглавлял Карельское отделение северного филиала Всесоюзного географического общества. В 1975 году на Ученом совете института был избран на должность старшего научного сотрудника. Гарри Лак автор более 60 печатных научных работ. Самые значительные из них «Диатомовая флора морских и озерных надморенных отложений в котловине Ладожского озера» (Петрозаводск, 1976 г.) и «Экологические особенности ископаемой диатомовой флоры северо-восточного побережья Ладожского озера» (Петрозаводск, 1986 г.). В ноябре 1987 г. Г. Лак вышел на пенсию.

Жизнь на этом не останавливалась, она приобретала другие формы и другое содержание. В возрасте семидесяти лет Гарри Цалелович издал в журнале «Север» (№ 5, 1998) повесть «Дом на Зареке», стал писать воспоминания в жанре роман-исповедь «Во власти своей судьбы» (Петрозаводск, 2000 г.), а затем «Путешествие на родину Моисея и Иисуса» (Петрозаводск, 2003 г.), «Земля – наш дом» (Петрозаводск, 2005 г.), «Геологическая судьба Надежды и Гарри (биографический очерк)» (Петрозаводск, 2010 г.) и другие. За неделю до смерти он передал в институт короткие воспоминания о П. А. Борисове. Надо сказать, что в геологической судьбе Гарри Цалеловича большую роль сыграли Галина Сергеевна Бискэ, Петр Алексеевич Борисов и Кауко Оттович Кратц.

Наш очерк хотелось бы завершить словами самого Гарри Лака: «Возраст и болезни иногда, конечно, наводят на грустные мысли. Однажды я задумался: а что это значит, если меня не будет? Это значит, что ничего не будет для меня, но для других ведь что-то будет! Вот для этих других я и решил оставить повесть о своей жизни, с ее ошибками и удачами, радостью и печалью и счастливым сознанием, что я еще живу, что я еще дышу и что со мной рядом мой человек по имени НАДЕЖДА».

9 октября 2013 года не стало уважаемого и дорогого Гарри Цалеловича Лака, ветерана Великой Отечественной войны, ученого, талантливого очеркиста со сложной жизненной судьбой. В Институте геологии 10 марта 2025 г. проведено расширенное заседание, посвященное 100-летию Г. Ц. Лака, на котором с докладом о его жизни и деятельности выступила старший научный сотрудник, кандидат географических наук Т. С. Шелехова.

Редакционная коллегия серии
«Геология докембрия»

Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 157–158
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 5. P. 157–158

90 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЛЬВА ЛЬВОВИЧА ГРОДНИЦКОГО (1935–1998)

Видный исследователь геологии и петрологии гранитных пегматитов Фенноскандинавского щита, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки Республики Карелия, первооткрыватель слюдяного месторождения Слюдозеро Лев Львович Гродницкий родился 30 мая 1935 года в городе Саратове.

В 1958 г. окончил геологический факультет Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского и получил диплом с отличием по специальности «геология и разведка месторождений полезных ископаемых». Работал коллектором, ст. техником, геологом, ст. геологом, начальником тематической партии Северной экспедиции СЗГУ (пос. Чупа КАССР), начальником геологической партии Института геологии при Саратовском университете. С 1967 года младший, затем старший и ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник (1997–1998) Института геологии КарНЦ РАН.

Принимал участие в работе и был соавтором отчета по теме «Разработка рациональной методики разведки и подсчета запасов мусковита глубоких горизонтов эксплуатирующихся месторождений Карелии» (совместно с Б. Я. Алексеевым, Л. С. Голованової и А. И. Крохиным). В 1986 году Л. Л. Гродницкому присуждается ученая степень доктора геолого-минералогических наук (тема диссертации «Формации гранитных пегматитов Балтийского щита») по специальности «петрография, вулканология». В марте 1991 г. была организована лаборатория геологии и петрологии пегматитов, и Л. Л. Гродницкий избран заведующим лабораторией. В 1997 году он избран на должность главного научного сотрудника. Основное направление деятельности Л. Л. Гродницкого – исследование процессов пегматитогенеза, регионального метаморфизма, метасоматоза, гранито- и рудообразования. Он внес значительный вклад в научные и практические исследования мусковитовых и керамических пегматитов. Под его руководством изучена и систематизирована внутренняя структура пегматитов всех фациальных групп и парагенетических типов Карело-Кольского региона. Он создатель научной школы по геологии, минералогии и геохимии пегматитов Карело-Кольского региона. Провел многолетние детальные геолого-петрологические исследования крупных пегматитовых полей мусковитовых, мусковит-редкометалльных и керамических пегматитов восточной части Фенноскандинавского щита: в Беломорском поясе – Слюдозеро, Плотина, Чкаловский рудник, Малиновая варакка, Хетоламбина, Хитогора, Полярная гора, Тэдино, Риколатва, Лейвойва, Неблагора, Слюдяной Бор; в Приладожском поясе – Люпикко, Питкярантский архипелаг, Уконлампи, Нуолайниеми, Мурсула, Линнаваара, Импиниеми, о. Путсаари. Л. Л. Гродницкий с группой исследователей

(А. И. Крохин, А. К. Полин, В. А. Коншин, А. М. Ручьев) составил детальные (на основе масштаба 1:2000) геологические погоризонтные карты и разрезы изученных месторождений, базисом для которых были результаты комплексного исследования состава вмещающих толщ, процессов регионального полиметаморфизма, гранитообразования, метасоматоза и генетически связанных с ними пегматито- и рудогенеза. Мусковитовые пегматиты некоторых объектов исследованы до глубины 500–700 м с использованием результатов детального картирования и изучением керна сотен глубоких скважин. Составлены погоризонтные планы в масштабах 1:20, 1:50, 1:100 и 1:200. К этим планам приложены разрезы и блок-диаграммы пегматитовых тел, подробно представляющие внутреннее строение и состав пегматитов. Это пример уникальнейшего сбора фактического материала. Л. Л. Гродницкий разработал авторскую схему последовательности эндогенных событий, прямо или косвенно управляющих процессами пегматито- и рудогенеза. Им были выделены этапы и фазы структурной эволюции, этапы и стадии регионального метаморфизма, гранитообразования и метасоматоза с детальной характеристикой минеральных парагенезисов и оценками PT-условий их формирования, а также данными по химизму минералов переменного состава. Сравнительный анализ процессов был построен на разработанных им структурно-петрологической классификации пегматитовых систем и парагенетической классификации пегматитовых тел. Очень важным выводом стали представления ученого о гетерогенности пегматитов Фенноскандинавского щита. Мусковитовые пегматиты Беломорья, по мнению Л. Л. Гродницкого, формировались по схеме жил альпийского типа в связи с метаморфизмом высоких давлений. Исследования имели практический характер. Так, им была сделана общая оценка запасов и промышленных перспектив изученных площадей на мусковит, керамическое сырье и жильный кварц. Из списка научных трудов необходимо выделить следующие публикации: «Пегматиты северной Карелии и их ореолы» (Петрозаводск, 1975. Совместно с А. К. Полиным); «Формации и парагенетические типы пегматитов восточной части Балтийского щита» («Записки ВМО». 1975. Вып. 1); «Эволюция химического состава биотитов в процессе формирования мусковитовых и мусковит-редкометальных пегматитов Карелии и Кольского полустрова» (в сб. «Минералогия и геохимия докембрия Карелии». Петрозаводск, 1979); «Гранитные пегматиты Балтийского щита» (Л., 1982); «Пегматитовые формации и пояса Балтийского щита» (в сб. «Геология и генезис пегматитов». Л., 1983. Совместно с В. В. Щипцовым, Г. П. Сафроновой); «Лоушское пегматитовое поле (структурное развитие, полиметаморфизм, гранито- и пегматитообразование)» (Петрозаводск, 1985. Совместно с А. М. Ручьевым, А. И. Крохиным); «Рудогенерирующие пегматитовые системы Кольской части Беломорского пояса (Петрозаводск, 1992); «Перспективы научно-исследовательских и поисково-разведочных работ на благородные, редкие и цветные металлы» (Петрозаводск, 1995. Совместно с Ш. Ш. Байбусиновым); «Закономерности размещения свекофеннских диафторитов в Беломорском подвижном поясе» (в сб. «Геология и полезные ископаемые Карелии». Вып. 1. Петрозаводск, 1998).

В последние годы, когда уже близко подошла к нему тяжелая болезнь, Л. Л. Гродницкий, несмотря на недуг, активно занялся сравнительным анализом условий формирования благородных, редких и цветных металлов на территории Карелии и зарубежной части щита. В этот же период он стал одним из учредителей Общественно-политического центра «Контакт», который был создан в феврале 1998 года, в период выборов председателя правительства Республики Карелия, депутатов Законодательного собрания РК и глав местного самоуправления республики, когда наблюдалась резкая поляризация политических сил. Центр с первых дней не примкнул к той или иной команде, а занял независимую позицию.

Лев Львович был всегда душой компании, обладал артистическими способностями со студенческой поры. Он остается в памяти общительным, добрым и эрудированным человеком, большим знатоком классической музыки и литературы. «Виноградная косточка» Булата Окуджавы была его песней до конца и очень соответствует ему:

«Виноградную косточку
в теплую землю зарою,
И лозу поцелую и спелые гроздья сорву,
И друзей созову,
на любовь свое сердце настрою.
А иначе зачем
на земле этой вечной живу?..».

Его сердце остановилось 17 июня 1998 г. Похоронен Лев Гродницкий на Бесовецком кладбище г. Петрозаводска.

В 2005 году в Институте геологии состоялась презентация, посвященная 75-летию со дня рождения талантливого геолога Льва Львовича Гродницкого.

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. 5, 2025
PRECAMBRIAN GEOLOGY Series

TABLE OF CONTENTS

EDITORIAL 5

REVIEWS

V. V. Shchiptsov, S. A. Svetov. KARELIA'S PROVEN MINERAL RESOURCES: METAL ORES 6

SHORT COMMUNICATIONS

A. Slabunov, A. Kervinen, S. Mishra, V. Singh. NEOARCHEAN GABBROIDS OF THE SOUTHERN BUNDELKHAND TERRANE, BUNDELKHAND CRATON: NEW GEOCHRONOLOGY DATA AND GEODYNAMIC SETTINGS 39

I. A. Abdrakhmanov, G. L. Leitchenkov, S. G. Skublov, P. G. Talalay, L. I. Salimgaraeva, N. Zhang. FIRST DATA ON THE COMPOSITION AND AGE OF SUBGLACIAL ROCK FROM A MAGNETIC ANOMALY ZONE (PRINCESS ELIZABETH LAND, EAST ANTARCTICA) 44

A. V. Bakaeva, S. Yu. Chazhengina, S. A. Svetov, A. V. Kervinen. PALEOPROTEROZOIC MOLASSOID COMPLEXES OF CENTRAL KARELIA 49

N. A. Bozhko. ON THE CHANGE IN THE SIZE AND NUMBER OF CONTINENTAL BLOCKS IN THE EVOLUTION OF THE SUPERCONTINENTAL CYCLE 54

T. V. Donskaya, D. P. Gladkochub, O. M. Turkina, U. S. Efremova. EARLY PROTEROZOIC OROGENIC BELTS OF THE SOUTHERN AND CENTRAL PARTS OF THE SIBERIAN CRATON AS INDICATORS OF ITS FORMATION 58

S. V. Egorova, A. V. Stepanova, K. G. Erofeeva. SARIOLA LARGE IGNEOUS PROVINCE IN THE FENNOSCANDIAN SHIELD: COMPOSITION, LATERAL ZONING, MELT SOURCES 64

V. I. Ivashchenko. METALLOGENIC AND ORE-FORMING SYSTEMS OF THE LADOGA STRUCTURE OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD 69

A. A. Krylov, I. I. Likhanov. EARLY STAGES OF THE PALEO-ASIAN OCEAN EVOLUTION AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON: PETROLOGICAL, GEOCHEMICAL AND GEOCHRONOLOGICAL EVIDENCE 74

I. I. Likhanov. THE "TRIPLE POINT" PARADIGM OF ALUMINOSILICATES REVISITED 80

I. I. Likhanov, P. S. Kozlov, A. D. Nozhkin, Yu. L. Ronkin, A. A. Krylov. MESOPROTEROZOIC PICRITE-PICROBASALT VOLCANISM OF PRECAMBRIAN COMPLEXES IN THE YENISEI RANGE: PETROGEOCHEMISTRY, METAMORPHISM, Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS SYSTEMATICS 85

N. V. Lubnina, T. R. Zaripov, O. A. Maksimov, A. V. Andreev, A. I. Slabunov. TYPIFICATION OF BANDED IRON FORMATIONS OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT (FENNOSCANDIAN SHIELD): PETROMAGNETIC EVIDENCE 91

N. V. Lubnina, A. I. Slabunov, A. V. Stepanova, V. P. Vorontsova, N. S. Nesterova. PALEOMAGNETISM OF THE BELOMORIAN MOBILE BELT: INTEGRATED STUDIES AND GEODYNAMIC CONSEQUENCES 98

P. V. Medvedev, N. I. Kondrashova, A. V. Lyutikov. RESULTS OF A COMPREHENSIVE STUDY OF PALEOPROTEROZOIC CARBONATE ROCKS IN EASTERN FENNOSCANDIA 104

N. S. Nesterova, A. I. Slabunov. MESO-NEOARCHEAN FELSIC VOLCANICS OF THE GIMOLY GREENSTONE BELT, KARELIAN CRATON, FENNOSCANDIAN SHIELD 109

A. D. Nozhkin, O. M. Turkina, I. I. Likhanov, Yu. L. Ronkin. EVIDENCE OF GREENVILLE AGE EVENTS AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON: THE CASE OF THE RYAZANOVSKY GRANITOID MASSIF (YENISEI RANGE) 114

S. A. Svetov, Z. P. Rybnikova, A. V. Bakaeva, M. A. Gogolev. MAGMATISM AND GEODYNAMIC SCENARIOS AT THE ARCHEAN-PALEOPROTEROZOIC BOUNDARY. A VIEW FROM KARELIA 119

A. I. Slabunov, A. V. Kervinen, E. B. Salnikova, K. G. Erofeeva, A. S. Dubenskiy. A NEW MESOPROTEROZOIC (1546 MA) THERMAL EVENT IN THE CENTRAL KARELIAN TERRANE OF THE KARELIAN CRATON: RESULTS OF DATING ZIRCON FROM NEOARCHEAN FELSIC ROCK OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT 124

O. M. Turkina. EVOLUTION OF GRANTOID MAGMATISM AND STAGES OF CRUSTAL GROWTH AND ACCRETION-COLLISION EVENTS IN THE SOUTHWESTERN SIBERIAN CRATON IN THE ARCHAEAN 130

HISTORY OF SCIENCE

A. V. Pervunina, V. V. Shchiptsov. GREAT PATRIOTIC WAR VETERANS AT THE INSTITUTE OF GEOLOGY 134

CHRONICLE

A. I. Slabunov, S. V. Egorova. The Precambrian Summit-2025 – getting to know unchartered land . . . 150

DATES AND ANNIVERSARIES

V. V. Shchiptsov. Geological education at the Petrozavodsk University: the past and the present 153

100th anniversary of birth of Garri Ts. Lak (1925–2013) 155

90th anniversary of birth of Lev L. Grodnitskii (1935–1998) 157

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 159

Научный журнал

Труды Карельского научного центра
Российской академии наук
№ 5, 2025

ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»

Выходит 8 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 А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Л. Э. Бюркланд

Подписано в печать 25.09.2025. Дата выхода 30.09.2025. Формат 60x84 1/8.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 17,7. Усл. печ. л. 19,3.
Тираж 100 экз. Заказ 864. 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: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185030, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50