

Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр Российской академии наук»



# **ТРУДЫ**

## **КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

№ 6, 2024

ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

Петрозаводск  
2024

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.; 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](mailto:trudy@krc.karelia.ru)

Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences



# **TRANSACTIONS**

**of the KARELIAN RESEARCH CENTRE  
of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES**

No. 6, 2024

PRECAMBRIAN GEOLOGY

Petrozavodsk  
2024

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 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.); 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](mailto: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, 2024  
© Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2024

УДК 551.248. 1

## ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА В РАМКАХ СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ

**Н. А. Божко**

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Геологический факультет (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991)*

В результате проведенного анализа геодинамики восточной части Балтийского щита в последние 3 млрд лет ее истории на фоне суперконтинентальной цикличности установлено полное участие этой территории в двух суперконтинентальных циклах, связанных с развитием суперконтинентов Кенорленд и Колумбия. В течение остальных циклов рассматриваемая территория находилась в составе более крупных континентальных фрагментов, не участвуя непосредственно в создании и распаде суперконтинентов, испытывая внутриплитный режим под влиянием тектоники мантийных плюмов.

Ключевые слова: суперконтинент; суперконтинентальный цикл; внутриплитный режим; магматизм; рифтогенез; мантийный плюм

Для цитирования: Божко Н. А. Геодинамическая эволюция восточной части Балтийского щита в рамках суперконтинентальной цикличности // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 6. С. 5–16. doi: 10.17076/geo1887

### **N. A. Bozhko. GEODYNAMIC EVOLUTION OF THE EASTERN PART OF THE BALTIC SHIELD AGAINST THE BACKGROUND OF SUPERCONTINENTAL CYCLICITY**

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology (1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia)*

An analysis of the geodynamics of the eastern part of the Baltic shield in the last 3 billion years of its history, set against the background of supercontinental cyclicality, showed the territory was fully involved in two supercontinental cycles associated with the development of the Kenorland and Columbia supercontinents. During the rest of the cycles, the territory was part of larger continental fragments and was not directly involved in the creation and disintegration of supercontinents, experiencing an intraplate regime under the impact of mantle plume tectonics.

Keywords: Supercontinent; supercontinental cycle; intraplate regime; magmatism; rifting; mantle plume

For citation: Bozhko N. A. Geodynamic evolution of the Eastern part of the Baltic shield against the background of supercontinental cyclicality. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 6. P. 5–16. doi: 10.17076/geo1887

## Введение

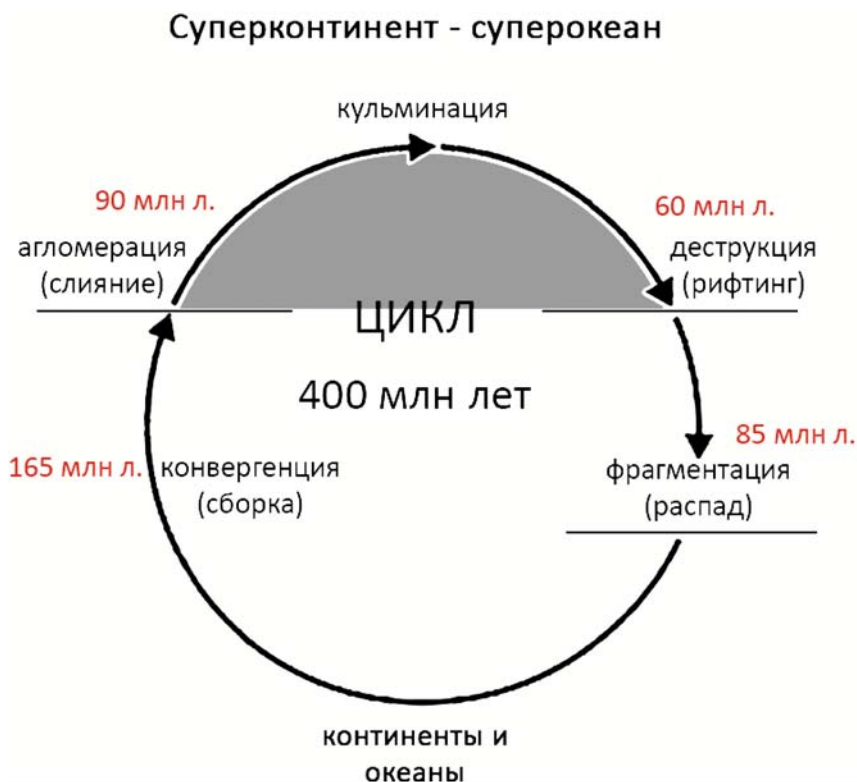
Настоящее исследование посвящено анализу почти трехмиллиардной истории восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в ходе глобальной суперконтинентальной цикличности.

Современное состояние геотектоники характеризуется признанием того, что в истории Земли было несколько суперконтинентов и что Пангея является лишь самым молодым из них. Это привело к обособлению нового самостоятельного направления в геологии, изучающего древние суперконтиненты и содержащего обширный круг специфических проблем. При этом под термином «суперконтинентальный цикл» (СЦ) понимается круговорот процессов в литосфере, вначале приводящих к объединению всех существовавших на Земле разобщенных континентальных масс в единый суперконтинент, его последующей фрагментации и распаду, а на заключительной стадии – к сборке нового суперконтинента. Последовательность СЦ составляет суперконтинентальную цикличность.

В структуре любого СЦ предполагается существование двух стадий, отражающих два

состояния литосферы: *собственно суперконтинентальной* (один континент – один океан) и *межсуперконтинентальной* (несколько континентов и несколько океанов) [Божко, 2009] (рис.). Каждая из этих стадий состоит из двух фаз. В рамках первой стадии различаются фаза агломерации, или слияния (слипания) континентальных фрагментов в новообразованном суперконтиненте и фаза его деструкции в виде проявлений континентального рифтогенеза, намечающих будущий распад. Первая фаза (фрагментации) второй стадии СЦ, соответствующая распаду, характеризуется быстрым спредингом в раскрывшихся океанах, а вторая фаза (конвергенции) – активными процессами субдукций и коллизий, приводящими к закрытию океанов, формированию коллизионных орогенов и сборке нового суперконтинента.

В настоящее время отсутствует общепринятая оценка длительности СЦ. В нашем анализе используется цикличность с продолжительностью СЦ в 400 млн лет (рис.) [Божко, 2009] с фазами агломерации (90 млн лет), деструкции (60 млн лет), фрагментации (85 млн лет) и конвергенции (165 млн лет). Исходя из этой схемы и на основании имеющихся геолого-геохронологических данных в последние 3 млрд лет



Структура суперконтинентального цикла  
The structure of the supercontinent cycle

истории Земли можно выделить семь СЦ и, соответственно, такое же число суперконтинентов. При этом важно выявить влияние СЦ на ход геодинамических и других процессов в конкретном регионе на основе имеющихся геолого-геохронологических данных.

В этом плане территория Балтийского щита представляется подходящей для такого анализа, учитывая богатый докембрийский материал, содержащийся в ней, и то обстоятельство, что все суперконтиненты на Земле, за исключением Пангеи, существовали в докембрии. Балтийский щит характеризуется длительным изучением, включая работы зарубежных и отечественных классиков геологии докембрия, а также выдающиеся последующие и современные исследования. На основании этих весьма многочисленных работ в восточной части Балтийского щита с СВ на ЮЗ в основном выделяются четыре крупные тектонические единицы: Кольский архейский кратон, Лапландско-Беломорский архейско-палеопротерозойский гранулитогнейсовый пояс, Карельский архейский кратон и Свекофеннский раннепротерозойский орогенический пояс.

Ниже рассмотрены особенности геодинамики восточной части Балтийского щита в циклах различных суперконтинентов.

**Суперконтинент Ваалбара (~3120–2970 млн лет) и СЦ (~3120–2720 млн лет).** Под таким названием Т. Зегерсом был выделен суперконтинент, образованный в интервале 3,3–3,1 млрд лет, объединявший ныне разобщенные кратоны Пилбара и Каапвааль, представляющие древнейшие мезоархейские гранит-зеленокаменные области (ГЗО). Предполагаемые границы и этого суперконтинента и СЦ даны согласно вышеуказанной схеме цикличности. Сравнительный анализ показывает, что в ряде неоархейских кратонов обнаруживаются древнейшие палео-мезоархейские сегменты (протократоны), окруженные неоархейскими образованиями, которые могут рассматриваться как «ядра» консолидации, фрагменты более обширной Ваалбары, такие как блоки Токве в кратоне Зимбабве, Антон в кратоне Слейв и другие. В этом плане интерес представляет Водлозерский блок в юго-восточной части Карельского кратона [Лобач-Жученко и др., 1989 и др.]. Он выделяется как область развития древнейших на Балтийском щите пород, представленных образованиями тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации с возрастом более 3,0 млрд лет, и по своему тектоническому строению в этом отношении сходен с другими протократонами, упомянутыми выше.

Распад Ваалбары отмечен в геологической летописи важным событием – заложением и развитием позднеархейской генерации зеленокаменных поясов, эволюция которых привела к созданию многочисленных гранит-зеленокаменных областей (ГЗО) – архейских кратонов.

Для формирования фундамента Карельского кратона используется аккреционно-коллизийная геодинамическая модель присоединения молодых террейнов к древним континентальным ядрам зеленокаменных поясов [Кожеников, 2000]. В отличие от Водлозерского блока – ядра мезоархейской консолидации основная часть Центральной Карелии образовалась путем аккреции – последовательного приращения серии позднеархейских островных дуг с востока на запад. Аккреция террейнов около 2,83–2,75 млрд лет сменилась коллизией, когда была сформирована современная структура Карельского кратона.

Формирование Кольского кратона [Митрофанов, 2009] в составе Мурманского блока, зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья и Кольско-Норвежского домена завершилось на рубеже в 2,74 млрд лет и фиксируется внедрением интрузий габбро-гранитного Колмозерского комплекса [Петровский и др., 2010].

На основании обобщения данных [Ранний..., 2005; Слабунов и др., 2006; Слабунов, 2008, 2019 и др.] можно предположить следующую геодинамическую модель. К рубежу около 2,75 млрд лет сформировались два стабильных блока континентальной коры – Кольский и Карельский, которые были разделены Беломорским океаническим бассейном. Начиная примерно с 2,72 млрд лет эта система вступила в коллизийную стадию развития, которая маркируется проявлениями покровной тектоники, высокобарического метаморфизма, гранитообразованием и в результате – образованием Беломорского коллизийного пояса. Коллизия Карельского и Кольско-Мурманского блоков (супертеррейнов) датируется периодом 2,71–2,68 млрд лет [Слабунов, 2019]. В структурном отношении она выразилась в создании архейского Карельского – Беломорско-Кольского палеоконтинентального сегмента. В пользу такой трактовки истории развития Беломорского пояса может свидетельствовать и присутствие здесь архейских эклогитов [Володичев и др., 2004], которые, по-видимому, отражают субдукцию и закрытие океанического бассейна, за которым последовала коллизия, образование Беломорского пояса и создание единого континентального образования, вошедшего в состав суперконтинента Кенорленд. В его формировании, таким образом, выделяются все

фазы суперконтинентального цикла: существование древнего суперконтинента, его распад и сборка нового.

**Суперконтинент Кенорленд (~2720–2570 млн лет) и СЦ (~2720–2320 млн лет).** Позднеархейский суперконтинент с возрастом около 2,7 млрд лет был выделен под названием Пангея 0 [Хаин, Божко, 1988]. Х. Вильямс с соавторами в 1991 г. [Williams et al., 1991] предложили термин «Кенорленд» для неоархейского суперконтинента, который ныне широко используется в геологической литературе [напр., Лубнина, Слабунов, 2011].

Структура восточной части Балтийского щита в составе суперконтинента Кенорленд аналогична структуре кратона Калахари в Южной Африке, состоящего из кратонов Каапвааль и Зимбабве, разделенных гранулитовым поясом Лимпопо, или Северо-Китайского кратона с двумя блоками, разделенными Транссеверокитайским поясом. Это время отмечено проявлением внутриплитного магматизма и тектоники. В пределах Карельской провинции выделены базит-ультрабазитовые комплексы интервала 2,74–2,60 млн лет в виде многофазных санукитоидов, коматиитов, базальтов, а также интрузий и даек базитов [Арестова и др., 2019].

Распад Кенорленда и образование молодых океанов охватили в основном территории современных Южной Австралии, Антарктиды, Индии, Северного Китая. Их закрытие привело к проявлению коллизий и орогений и формированию суперконтинента Ятулия [Божко, 2009]. В кратонах этих континентов отмечаются процессы магматизма, деформаций и метаморфизма в интервале 2,56–2,42 млрд лет [Barley et al., 2005].

В Евразии тектонические процессы времени распада и формирования нового суперконтинента проявлялись преимущественно в виде внутриплитных тектоно-термальных событий. Это относится и к территории Балтийского щита, где отмечается отсутствие корообразующих процессов, синхронных означенным выше, и проявление плюмовых тектоники и магматизма. Этой эпохе по времени здесь в значительной степени соответствует сумийско-сариолийский этап развития (2,55–2,30 млрд лет), проходивший во внутриплитной обстановке. Интрузивный магматизм сумийско-сариолийского этапа носит типичный кратонный характер и уникален образованием расслоенных ультрамафит-мафитовых плутонов.

Базиты палеопротерозойского этапа (2,45–2,41 млрд лет) в Карельской провинции представлены крупными расслоенными интрузиями: Бураковской, интрузиями Олангской группы,

коматиитами Ветреного пояса, а также сумийскими базальтами и дайками во всех доменах провинции [Арестова и др., 2019]. Внедрение этих магматитов происходило в виде поясов, приуроченных к рифтам северо-восточного простирания: Кеми-Койлиσμα (Финляндия) – Кивакка – Кундозеро (С Карелия) и Бураковско-Монастырскому (ЮВ Карелия).

Дайки базитов с возрастом около 2,5–2,4 млрд лет установлены в Кольско-Мурманской и Карельской провинциях [Степанова и др., 2019], соответствуя по времени деструкции суперконтинента.

Магматизм этого времени хорошо развит в пределах Беломорского пояса в виде большого числа средних и мелких тел базитов, ультрабазитов, габбро-анортозитов (друзитов) и в меньшей степени – диоритов, гранодиоритов и гранитов, которые секут метаморфизованные и деформированные породы беломорского комплекса и с которыми связано проявление высокотемпературного метаморфизма селецкого цикла в интервале 2,40–2,43 млрд лет, проходившего в анорогенных условиях. В породах беломорской эклогитовой провинции Балтийского щита установлено проявление палеопротерозойского высокотемпературного гранулитового метаморфизма с возрастом ~ 2,45 млрд лет [Докукина и др., 2019], который в отличие от высокобарического указывает на внутриплитный характер процесса.

**Суперконтинент Ятулия (~2320–2170 млн лет) и СЦ (~2320–1800 млн лет).**

В списке «общепринятых» суперконтинентов за Кенорлендом следует Колумбия. Однако ранее [Божко, 2009] автор выделил между ними в разработанной им суперконтинентальной цикличности суперконтинент Ятулия (~2320 млн лет) на основании анализа тектонических событий, произошедших после распада неоархейского суперконтинента Кенорленд.

Эпоха существования суперконтинента Ятулия приблизительно соответствует подразделению Ятулий (2,3–2,1 млрд лет) местной шкалы. Ему соответствовало суперплюмовое событие около 2,25 млрд лет, сопровождавшееся излиянием траппов, формированием дайковых комплексов и рифтовых систем [Cadman et al., 1993]. В это время территория Карельского кратона представляла собой эпиконтинентальный мелководный бассейн, в пределах которого накапливались терригенные осадки и происходило периодическое излияние трапповых базальтов. Трещинные излияния лав в ятулийское время охватили огромную территорию в пределах Балтийского щита и образовали обширное



лавовое плато. Образование суперконтинента и последующее тектоническое затишье привели к потере архейского метана, оледенениям и кислородному составу атмосферы. В интервале 2,40–2,22 млрд лет кратоны Сьюпириор, Карельский и Калахари испытали три последовательных оледенения. К этому времени относится накопление протоплатформенных чехлов в виде эпиконтинентальных отложений группы Претория (2350–2050 млн лет) супергруппы Трансвааль, групп Пиривири (>2,15 млрд лет) и Чиванда (>2,16 млрд лет) Африки; групп Тури Крик (2,4–2,2 млрд лет) и Вилу (2,2 млрд лет) во впадине Хамерсли Австралии; группы Гурон (2,4–2,2 млрд лет) и пород впадин оз. Верхнее Северной Америки; группы Парасикаба супергруппы Минас Бразилии; Удоканской серии Алданского щита.

В восточной части Балтийского щита по времени им соответствуют образования Ятулия (2,3–2,1 млрд лет) [Ранний..., 2005]. Палеопротерозойские ятулийские вулканические породы возрастом 2,22–2,06 млрд лет широко распространены в пределах всего Фенноскандинавского щита и наиболее полно представлены на территории Карелии. Трещинные излияния лав в ятулийское время охватили огромную территорию и образовали обширное лавовое плато. По геологическим и геохимическим характеристикам ятулийские вулканические сопоставимы с фанерозойскими континентальными платобазальтами. К этому времени относится становление дайковых комплексов Финляндии с возрастом 2200 млн лет, продолжение формирования рифтогенной структуры Печенга-Имандра-Варзуга (2,3–1,97 млрд лет).

В Людиковии (2,1–1,92 млрд лет) обстановка обширной платформы изменяется. Распространение магматизма характеризуется отчетливой приуроченностью к зонам глубинных разломов, а особенности продуктов магматизма указывают на внутриконтинентальный рифтогенный режим этого периода. Переход к Людиковию отмечен появлением интенсивного пикритового вулканизма в Онежской структуре, синхронного с таковым в Печенгской структуре Кольского полуострова, что рассматривалось как признак раскрытия океана. По своему содержанию это время соответствует фазе деструкции суперконтинентального цикла. Пространственно сближенные вулканы центрального типа, образующие линейные зоны, мелководный характер бассейнов осадконакопления и геохимические особенности продуктов магматизма указывают на внутриконтинентальный рифтогенный режим этого периода.

Людиковийское время на территории Онежской впадины завершилось всплеском суйсарского базит-гипербазитового вулканоплутонизма, образовавшим мощные толщи лавовых потоков, покровов и субвулканических тел от пикрит-базальтового до плагиобазальтового составов и подавившим терригенное осадконакопление.

На людиковийское время приходится важнейшее событие в регионе – раскрытие Свекофеннского (Людиковийского) океана.

Распад суперконтинента Ятулия на Балтийском щите отражен в раскрытии Лапландско-Кольского и Свекофеннского океанов [Ранний..., 2005]

Образование океанического бассейна на месте будущего Лапландско-Кольского коллизионного орогена начинается около 2.0 Ga с раскола древней континентальной коры и формирования относительно неширокого океана красноморского типа, о чем свидетельствуют палеомагнитные и изотопные данные [Daly et al., 2006].

Формированию Свекофеннского аккреционного орогена также предшествовало образование океана в период 2,0–1,95 млрд лет, о чем свидетельствуют офиолиты Йормуа с возрастом 1,97 млрд лет. Их существование указывает на то, что длительный этап глобального рифтогенеза привел на рубеже 1,97–1,96 млрд лет к раскрытию Людиковийского океана. После его раскрытия примыкающая к краю Карельского кратона (Саво-Ладожская зона) в калевийское время (1,920–1,800 млн лет) территория перешла в тектонический режим пассивной окраины и формирования ритмичных турбидитных осадков с участием привносимой пирокластики из размывающихся людиковийских образований. Этому времени во внутриконтинентальных структурах соответствуют проявления мощного весьма специфического пикритового вулканизма и образование дайковых роев.

Формирование Балтийского щита как фрагмента суперконтинента Колумбии происходило, таким образом, в две стадии с образованием Лапландско-Кольского коллизионного и Свекофеннского аккреционного орогенов [Балаганский и др., 2016].

Лапландско-Кольский ороген является структурой второго порядка по отношению к архейско-протерозойскому Лапландско-Беломорскому гранулитогнейсовому поясу [Божко и др., 2021]. Он представляет собой типичный коллизионный пояс дивергентного покровного строения. Эволюция пояса завершилась субдукцией, сопровождавшейся образованием эклогитов [Щукина и др., 2015] и коллизией Кольского и Карельско-Беломорского

эпиархейских континентальных блоков в конце раннего протерозоя, в интервале 1,93–1,9 млрд лет [Daly et al., 2006] с пиком 1,90–1,91 млрд лет [Balagansky et al., 2014], что привело к формированию современной структуры докембрийских образований региона. Эти события сопровождались гранулитовым метаморфизмом и формированием зон пластического сдвигового течения субширотного и северо-западного простирания. Коллизионные высокобарические гранулиты Лапландско-Колвицкого гранулитового пояса были сформированы в интервале 1900–1910 млн лет при  $T$  850 °C и  $P$  11–12 кбар [Balagansky et al., 2014]. В свою очередь, палеопротерозойские коллизионные события Лапландско-Кольского орогена проявились в Беломорском поясе в виде тектоно-термальной переработки его пород, включающей наложенные деформации, магматизм, метаморфизм, изотопное омоложение пород.

Одновременно с окончанием коллизии в Лапландско-Кольском орогене на юго-западной окраине Карельского кратона начались главные свекофеннские аккреционные события в виде причленения островодужных террейнов к краю Карельского кратона. Этот процесс закончился Свекофеннской орогией 1,83–1,80 млрд лет тому назад [Ранний..., 2005].

На свекофеннском этапе деформаций территория Балтийского щита подверглась интенсивным складчато-разрывным деформациям. Проявления деформаций в центральной части Балтийского щита, вызвавших значительную перестройку сформированных структур (в том числе Онежской впадины), и определили характер рисунка их современной тектонической структуры.

Периоду завершения коллизионных процессов в Лапландско-Кольском орогене и началу аккреционных процессов в Свекофеннском поясе отвечает формирование крупной магматической провинции (КМП) в пределах Кольского и Карельского блоков Восточной Фенноскандии на уровне 1980 млн лет, представленной комплексами толеитовых базальтов, пикритов, дифференцированных габбро-анортозит-сиенитовых интрузий, щелочных интрузий и кимберлитов [Самсонов и др., 2019]. Проявление такого масштабного внутриплитного магматизма во фрагменте континентальной коры, окруженном орогеническими поясами, требует самостоятельного рассмотрения. Возможно, оно вызвано действием неглубоких мантийных плюмов, возникающих во время субдукции при движении литосферного слэба вдоль границы нижней и верхней мантии.

После раскрытия Свекофеннского (Людикийского) океана в калевийское время территория, примыкающая к краю Карельского кратона, перешла в режим пассивной окраины и формирования толщи ритмичных турбидитных осадков с участием привносимой пирокластике и размывающихся людикийских образований. В северо-восточной части Балтийского щита свекофеннский этап характеризовался рифтогенным тектоническим режимом.

Завершение указанных выше и синхронных с ними орогений на всех материках спаяло разрозненные фрагменты континентальной коры в интервале 2,1–1,8 млрд лет в суперконтинент Колумбия. Как видим, в процессе его создания проявились все фазы суперконтинентального цикла.

#### **Суперконтинент Колумбия (~1920–1770 млн лет) и СЦ (~1920–1520 млн лет).**

Суперконтинент конца раннего протерозоя под названием Пангея 1 был выделен [Хаин, Божко, 1988] на основе геохронологических и геологических данных того времени. Существование суперконтинента, созданного в период 2,0–1,8 млрд лет, предполагалось рядом исследователей. Роджерс и Сантош в 2002 г. назвали этот суперконтинент «Колумбия» по наименованию реки Колумбия на западе Северной Америки. Его существование отмечено распространением петрологически идентичных и разновозрастных пород на расстояние тысяч км через границы ныне существующих континентов. На всех кратонах отмечено распространение протоплатформенных чехлов, которые с угловым несогласием перекрывают разновозрастные подстилающие комплексы в условиях нового суперконтинента Колумбия: Рорайма (1,95–1,88 млрд лет), Атабаска (1,76 млрд лет), Умкондо (1,9–1,5 млрд лет) и другие. В это время на Балтийском щите накапливаются отложения Вепсия (1,8–1,7 млрд лет) [Ранний ..., 2005].

Суперконтинентальная эпоха Колумбии отмечена внедрением анорогенных интрузий и комагматичных кислых субаэральных вулкаников: лополита Седбери (1,85 млрд лет), Кодар (1,9 млрд лет), Бушвельдского комплекса (2,09–1,92 млрд лет), рапакиви Наберру (1,76 млрд лет), вулкаников Уатума (1,85 млрд лет) и др.

После завершения формирования людикийских и, возможно, части калевийских образований территория Онежской впадины претерпела структурную перестройку и деформации, проявление которых определило трансгрессивный характер залегания вышележащих толщ вепсия (1800–1650 млн лет), которые с угловым несогласием перекрывают разновозрастные подстилающие комплексы.

Постсвекофенским событиям в пределах Карельского кратона отвечает по времени формирование Западно-Онежского комплекса, представленного лавовыми потоками (базальты Кайлахта) и пластовым интрузивом габбродолеритов (Ропручейский силл), а также кимберлитами Кимозеро. Вепсийское событие силлообразования с возрастом 1770 млн лет в Южно-Онежской мульде последовало после накопления в континентальных стабильных условиях отложений сероцветной толщи петрозаводской свиты с маломощными лавами основного состава и корами выветривания в кровле потоков, а также красноцветных кварцито-песчаников шокшинской свиты вепсия, полого залегающих с угловым несогласием на деформированных породах более древних горизонтов.

Фрагментация Колумбии сопровождалась более значительным дроблением южной полушария. В пределах Восточной Гондваны (Индия, Антарктида, Австралия) возник ряд микроконтинентов, в то время как Лавразия, по видимому, представляла собой обособленный когерентный блок, окаймленный океанами, в районе Гренвильской провинции Канады, юго-запада США и Прибалтики.

Распад Колумбии, соответствующий приблизительно интервалу 1770–1685 млн лет, отмечен широким проявлением анорогенного магматизма на площади суперконтинента и рифтогенезом на его окраинах. Он не проявился в прямой форме на территории восточной части Балтийского щита, которая продолжала развиваться во внутриплитном режиме. По времени ему отвечает формирование Западно-Онежского комплекса, представленного лавовыми потоками (базальты Кайлахта) и Ропручейским силлом габбродолеритов (1770 млн лет). Конвергентная фаза данного СЦ проявлена орогеническими событиями в раскрывшихся после распада Колумбии океанических бассейнах, значительное число которых было сосредоточено в южной полушарии Земли. В ЮЗ части Балтийского щита она выражена последовательностью коробразующих событий в интервале 1,7–1,55 млн лет (готская орогенция), включающих аккрецию островных дуг на фоне обращенной к западу субдукции [Mansfeld, Andersen, 1999; Connolly, 2001]. Эта и синхронные орогенции в других частях света привели к объединению почти всех континентальных фрагментов в новый суперконтинент Готия к рубежу около 1500 млн лет.

В восточной части Балтийского щита, находившегося в составе континентального фрагмента, они не нашли прямого отражения, здесь продолжался внутриплитный режим. Эта эпоха

примечательна широким проявлением анорогенного магматизма в интервале 1,4–1,5 млрд лет в виде субаэральных вулканитов, анортозитов, гранитов-рапакиви. Раннемезопротерозойские магматические породы широко распространены в Северном и Восточном Приладожье. Здесь они представлены потоками Салминских ферробазальтов, габбромонцитонитовыми Валаамским и Мантсинсаарским силлами, интрузией Хопунваара и дайками двух генераций.

**Суперконтинент Готия (1520–1370 млн лет) и СЦ (1520–1120 млн лет)** был выделен [Божко, 2009], как указывалось, в результате анализа коллизионных событий, предшествующих этому рубежу, в раскрывшихся после распада Колумбии океанических бассейнах; значительное их число было сосредоточено в южной полушарии Земли: Восточной Австралии, Антарктиде, Индостане, Африке, Южной Америке, а также Скандинавии в северо-восточной Лаврентии. Современные данные подтверждают правомочность выделения суперконтинента. Так, Л. Песонен с соавторами [Pesonen et al., 2012] представили палеомагнитную реконструкцию суперконтинента на уровне 1,53 млрд лет.

Время существования мезопротерозойского суперконтинента Готия отвечает в основном раннему рифею отечественной шкалы и характеризуется преобладанием поднятий. Протоплатформенные чехлы Готии имели ограниченное распространение. В Евразии они представлены карбонатно-терригенными олигомиктовыми толщами, генетически тесно связанными с корами выветривания и формировавшимися в плоских изолированных впадинах, наложенных на древние образования. Более значительное осадконакопление имело место в это время в Индостане, Австралии, Южной Америке.

Распад Готии отразился в формировании пассивной окраины на северо-востоке Балтики, впоследствии вовлеченной в тиманский орогенез, и связанной с ней палеорифтовой системы Белого моря около 1,2 млрд лет назад. Эта система образована узкими линейными прогибами, впадинами северо-западного простирания в древнем гранитогнейсовом кристаллическом фундаменте, которые заполнялись терригенными отложениями, турбидитами среднего и верхнего рифея. Онежско-Кандалакшский палеорифт своим северо-западным концом раскалывает восточную часть Балтийского щита, а Баренцевоморский (Мезенский) обрамляет последний с севера и северо-востока.

Конвергентная фаза цикла связана со сборкой суперконтинента Родиния. В его формировании принимали участие орогенции в интервале между 1300 и 900 млн лет [Li et al., 2008].

К ним относится фаза Свеконорвежской орогении на юго-западе Балтийского щита в интервале 1,14–0,96 млрд лет [Bogdanova et al., 2008]. Со сборкой Родинии (1285–1120 млн лет) совпадает внедрение кимберлитов и лампроитов Кухмо-Лентира-Костомукша Карелии (1230 млн лет) [Божко, Прусакова, 2014].

**Суперконтинент Родиния (1120–970 млн лет) и СЦ (1120 – ~650 млн лет).** В большинстве реконструкций Родинии западная часть щита помещается совместно с Лаврентией, Гренландией и Амазонией [Buchan et al., 2001]. В восточной части Балтийского щита, не затронутой орогеническими процессами, имело место развитие рифтогенеза и плюмового магматизма. Вдоль пассивной окраины продолжают развиваться рифтовые зоны Беломорской рифтовой системы. В неопротерозое (позднем рифее) рифтовые впадины палеорифтовой системы Белого моря продолжали углубляться. В них откладывались терригенные отложения верхнего рифея. На рубеже рифея и венда в Онежско-Кандалакшском палеорифте проявился вулканизм толеитовой серии. Позднерифейский импульс растяжения тиманской окраины Балтики связан с распадом Родинии и раскрытием палеоокеана Япетус [Балуев, 2013].

Начало конвергентной стадии рассматриваемого цикла отмечено континентальными коллизиями. Главнейшие из них происходили в Южном полушарии, что привело к образованию мегаконтинента Гондвана. По-видимому, Балтика была относительно монолитным приподнятым фрагментом после распада Родинии.

Этому времени соответствуют кимберлиты (759–756 млн лет) поля Куусамо, расположенного в Восточной Финляндии близ границы с Россией [Божко, Прусакова, 2014].

В результате слияния евразийских осколков Родинии между собой и с новообразованной Гондваной образовался суперконтинент Паннотия.

**Суперконтинент Паннотия (~650–570 млн лет) и СЦ (~650–320 млн лет).** Неопротерозойский суперконтинент, о существовании которого предполагали многие исследователи, был выделен в 1995 г. С. Пауэллом. Паннотия располагалась целиком в Южном полушарии, что обусловило этимологию этого названия («пан» – все и «нотиус» – южный).

Существованию Паннотии соответствует глобальное развитие оледенений в интервале 750–580 млн лет. В пределах раннедокембрийских платформ лавразийского ряда завершили развитие древние континентальные рифтовые системы (авлакогены), сформированные в позднем рифее в связи с раскрытием палеоокеанов.

Как указывалось выше, время распада Паннотии принимается на уровне около 570 млн лет. Распад ее привел к обособлению Гондваны, которая в раннем палеозое сохраняла свою цельность и стабильность, тогда как в пределах Лавразии шло активное океанообразование (океаны Япетус, Палеоазиатский, Прототетис). Новообразованные океаны замкнулись в основном в результате каледонских и герцинских орогений. На северо-востоке Восточно-Европейского кратона, по-видимому, произошел переход пассивной окраины в активную и формирование кадомско-тиманского орогена в интервале около 600–550 млн лет [Пучков, 2008].

К рубежу 320 млн лет коллизия новообразованной Лавразии и Гондваны привела к возникновению Пангеи. Восточная часть Балтийского щита не была затронута орогеническими процессами. Это время отвечает проявлению в ее пределах палеозойской тектоно-магматической активизации, которая выразилась в поднятии, рифтогенезе и плюмовом платформенном магматизме. Раннепалеозойские интрузии щелочных гранитов отмечены на Кольском полуострове (хребет Кейвы). В среднем и позднем палеозое образовались Хибинский и Ловозерский интрузивные щелочные массивы в центральной части полуострова. Оба массива в основном выражены нефелиновыми сиенитами. В среднем-позднем девоне произошла регенерация заложенных в рифее рифтовых зон и развитие внутриплитного магматизма. В юго-восточной погребенной части палеорифтовой системы Белого моря (Зимнебережный район) и на ее поднятых блоках фундамента формируются известные поля кимберлитовых и базальтовых трубок с сопутствующими им дайками щелочного состава. Сборке Пангеи (485–320 млн лет) по времени соответствует внедрение трубки Гриба в Архангельской провинции (372 млн лет) и кимберлитов Терского берега Кольского полуострова (375–372 млн лет) [Арзамасцев и др., 2001; Божко, Прусакова, 2014].

**Суперконтинент Пангея (320–170 млн лет) и СЦ (320–? млн лет).** Формирование Пангеи произошло 320 млн лет назад в среднем карбоне в результате объединения крупных палеоматериков Гондваны и Лавразии. Окончательная же сборка и кульминация слитности суперконтинента завершилась на границе верхнего и среднего триаса (230 млн лет).

Последующие мезо-кайнозойские события, такие как распад Пангеи в геологической истории рассматриваемой территории, уже не нашли значительного отражения. Это время характеризуется достаточно спокойным режимом без существенных проявлений

внутриплитной тектоники и магматизма. Импульсы высокой тектонической активности имели место в неогене и плиоцене, выражаясь в вертикальном перемещении блоков вдоль новых и обновленных древних разломов. В течение всего мезозоя на Балтийском щите господствовали континентальные условия.

Неоген-четвертичная активизация тектонических движений особенно сильно проявилась на территории Беломорья, выразившись в образовании системы разломов северо-западного простирания, проявлением вдоль них многочисленных очагов землетрясений, и в частности, вдоль Кандалакшского рифта.

Современный (позднекайнозойский) план – образование современных тектонических впадин Белого моря, наследующих рифейские рифты, связывается с раскрытием Североатлантического и Арктического океанов [Балуев, 2013].

## Заключение

Тектоническая эволюция восточной части Балтийского щита в последние 3 млрд лет отражает последовательность суперконтинентальных циклов в ее истории. Эта территория испытала лишь два полных суперконтинентальных цикла с проявлением всех его фаз. Эти циклы связаны с формированием суперконтинентов Кенорленд и Колумбия.

Рассматриваемая территория в других суперконтинентальных циклах входила в состав крупных континентальных фрагментов, непосредственно не затронутых распадом и сборкой суперконтинентов, развивалась во внутриплитном режиме, испытывая тектоно-термальную активизацию под воздействием тектоники мантийных плюмов. Эти процессы выражались в проявлениях внутриплитного магматизма, высокотемпературного метаморфизма, континентального рифтогенеза, деформациях.

Вместе с тем отмечается еще плохо изученный контроль развития внутриплитной тектоники и магматизма восточной части Балтийского щита фазами суперконтинентальных циклов. Так, общему распаду и сборке суперконтинентов в сегментах, непосредственно не затронутых этими процессами, соответствует усиление проявлений внутриконтинентального рифтогенеза и связанного с ним магматизма.

Интенсивность процессов тектоно-магматической активизации определялась также степенью удаленности территории от развивающихся орогенов соответствующих циклов. Краевые части территории на границе с ними вовлекались в рифтогенез.

## Литература

Арестова Н. А., Чекулаев В. П., Егорова Ю. С., Кучеровский Г. А. Эволюция состава и источников основных и ультраосновных пород при переходе от неогархея к палеопротерозою в Карельской провинции, Балтийский щит // Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика: Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (Санкт-Петербург, 22–24 октября 2019 г.). СПб.: Свое издательство, 2019. С. 23–25.

Арзамасцев А. А., Беа Ф., Глазнев В. Н., Арзамасцева Л. В., Монтеро П. Кольская щелочная провинция в палеозое: оценка состава первичных мантийных расплавов и условий магмогенерации // Российский журнал наук о Земле. 2001. Т. 3, № 1. С. 1–35.

Балаганский В. В., Горбунов И. А., Мудрук С. В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит) // Вестник Кольского научного центра РАН. 1916. № 3(26). С. 5–11.

Балуев А. С. Континентальный рифтогенез севера Восточно-Европейской платформы в неогее: геология, история развития, сравнительный анализ: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 2013.

Божко Н. А. Суперконтинентальная цикличность в истории Земли // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 2. С. 13–27.

Божко Н. А., Прусакова Н. А. О перспективах коренной алмазности Карельского кратона // Руды и металлы. 2014. № 4. С. 5–13.

Божко Н. А., Прусакова Н. А., Громцев К. В. Особенности тектонического строения Лапландско-Беломорского гранулитогнейсового пояса и перспективы его коренной алмазности // Отечественная геология. 2021. № 6. С. 45–64. doi: 10.47765/0869-7175-2021-10031

Володичев О. И., Слабунов А. И., Бибикина Е. В., Конилов А. Н., Кузенко Т. И. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология. 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631.

Докукина К. А., Конилов А. Н., Ван К. В., Баянова Т. Б., Шешуков В. С., Хубанов В. Б., Голованова Т. И. Палеопротерозойский гранулитовый метаморфизм с возрастом ~ 2.45 млрд лет в породах Беломорской эклогитовой провинции Фенноскандинавского щита, Россия // Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика: Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (Санкт-Петербург, 22–24 октября 2019 г.). СПб.: Свое издательство, 2019. С. 68–70.

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

Лобач-Жученко С. Б., Сергеев С. А., Левченков Г. М., Овчинникова Г. В., Котова Л. Н., Крылов И. Н., Яковлева С. З. Водлозерский гнейсовый комплекс раннего архея и его структурно-

метаморфическая эволюция // Изотопная геохронология докембрия. Л.: Наука, 1989. С. 14–45.

Лубнина Н. В., Слабунов А. И. Реконструкция неорархейского суперконтинента Кенорленд по палеомагнитным и геологическим данным // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2011. № 4. С. 23–30.

Митрофанов Ф. П. Раннедокембрийская геодинамика, магматизм и металлогения Кольской провинции // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 4. С. 567–570.

Петровский М. Н., Петровская Л. С., Баянова Т. Б. Эволюция магматизма в геологической истории мурманского неорархейского кратона // Магматизм и метаморфизм в истории Земли: XI Всероссийское петрографическое совещание: Тезисы докладов. Т. 2. Екатеринбург, 2010. С. 130–131.

Пучков В. Н. Тектоника и геодинамика тиманид // Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики докембрия фанерозойских орогенов: Мат-лы междунар. науч. конф. (III чтения памяти С. Н. Иванова). Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2008. С. 104–109.

Ранний докембрий Балтийского щита / Под ред. В. А. Глебовицкого. СПб.: Наука, 2005. С. 711.

Самсонов А. В., Степанова А. В., Арзамасцев А. А., Сальникова Е. Б., Ларионова Ю. О., Ларионов А. И., Егорова С. В. Крупная магматическая провинция Восточной Фенноскандии: парагенетическое разнообразие в геодинамическом единстве // Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика: Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (Санкт-Петербург, 22–24 октября 2019 г.). СПб.: Свое издательство, 2019. С. 198–200.

Слабунов А. И. Архейские и палеопротерозойские орогены: сравнительный анализ геодинамических процессов при их формировании (на примере Фенноскандинавского щита) // Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика: Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (Санкт-Петербург, 22–24 октября 2019 г.). СПб.: Свое издательство, 2019. С. 210–212.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008. 294 с.

Слабунов А. И., Лобач-Жученко С. Б., Бибикова Е. В., Балаганский В. В., Сорьонен-Вард П., Володичев О. И., Щипанский А. А., Светов С. А., Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Степанов В. С. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки // Геотектоника. 2006. № 6. С. 1–29.

Степанова А. В., Самсонов А. В., Сальникова Е. Б., Арзамасцев А. А., Егорова С. В., Веселовский Р. В., Ларионова Ю. О., Ерофеева К. Г., Стафеева М. В. Палеопротерозойские мафические дайки Карельской и Кольско-Мурманской провинций Фенноскандинавского щита: геохронология, корреляция, тектонические следствия // Этапы формирования и

развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика: Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (Санкт-Петербург, 22–24 октября 2019 г.). СПб.: Свое издательство, 2019. С. 221–222.

Хаин В. Е., Божко Н. А. Историческая геотектоника Докембрий. М.: Недра, 1988. 381 с.

Щукина Е. В., Агашев А. М., Головин Н. Н., Похиленко Н. П. Эквигранулярные эклогиты из кимберлитовой трубки им. В. Гриба: свидетельства палеопротерозойской субдукции на территории Архангельской алмазонасной провинции // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. С. 208–212. doi: 10.7868/S0869565215140248

Balagansky V. V., Gorbunov L. A., Mudruk S. V. Paleoproterozoic Lapland-Kola collisional orogen, Northern Fennoscandia. Baltic shield // Precambrian high-grade mobile belts: Extended abstracts. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 7–10.

Barley M. E., Bekker A., Krapez B. Late Archean to Early Paleoproterozoic global tectonics, environmental change and the rise of atmospheric oxygen // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. Vol. 238. P. 156–171. doi: 10.1016/j.epsl.2005.06.062

Bogdanova S. V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T. N., Kozlov V. I., Puchkov V. N., Volozh Yu. A. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // Precamb. Res. 2008. Vol. 160(1). P. 23–45. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.024

Buchan K. L., Ernst R. E., Hamilton M. A., Mertaanen S., Pesonen L., Elming S.-Å. Rodinia the evidence from integrated palaeomagnetism and U-Pb geochronology // Precamb. Res. 2001. Vol. 110, no. 1–4. P. 99–631. doi: 10.1016/S0301-9268(01)00178-4

Cadman A. C., Heaman L., Tarney J., Wardle R., Krogh T. E. U-Pb geochronology and geochemical variation within two Proterozoic mafic dyke swarms, Labrador // Can. J. Earth Sci. 1993. Vol. 30(7). P. 1490–1504. doi: 10.1139/e93-128

Connelly J. N. Accretionary growth of the Sveconorwegian province of the Baltic shield between 1,7–1,5 Ga and links to intracontinental magmatism // GSA Annual Meeting, November 5–8, 2001 Sess. 11: Proterozoic tectonic evolution of the Grenville Orogen in Eastern North America I. 2001. Pap. 11.

Daly J. S., Balagansky V. V., Timmerman M. J., Whitehouse V. J. The Lapland-Cola orogen: Paleoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere // European Lithosphere Dynamics. Geological Society, London memoirs. 2006. Vol. 32. P. 579–598. doi: 10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.35

Li Z. X., Bogdanova S. V., Collins A. S., Davidson A., De Waele B., Ernst R. E., Fitzsimons I. C. W., Fuck R. A., Gladkochub D. P., Jacobs J., Karlstrom K. E., Lu S., Natapov L. M., Pease V., Pisarevsky S. A., Thrane K., Vernikovsky V. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis // Precamb. Res. 2008. Vol. 160. P. 179–210. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.021

Mansfeld J., Andersen T. Formation of New Crust in Scandinavia Between 1,75 and 1,55 Ga as Evident from the Gothian Units of the stfold – Akershus Sector,

SE Norway // J. Conf. Abstr. EUG 10. 1999. Vol. 4, no. 1. P. 137.

Pesonen L. J., Mertanen S., Veikkolainen T. Paleoproterozoic supercontinents – A paleomagnetic view // *Geophysics*. 2012. Vol. 48, no. 1-2. P. 5–47.

Williams H., Hoffman P. F., Lewry J. F., Monger J. W. H., Rivers T. Anatomy of North America: thematic portrayals of the continent // *Tectonophysics*. 1991. Vol. 187. P. 117–134. doi: 10.1016/0040-1951(91)90416-P

## References

Arestova N. A., Chekulaev V. P., Egorova Yu. S., Kucherovskii G. A. Evolution of the composition and sources of basic and ultrabasic rocks during the transition from the Neoproterozoic to the Paleoproterozoic in the Karelian province, Baltic Shield, Russia. *Etapy formirovaniya i razvitiya proterozoiskoi zemnoi kory: stratigrafiya, metamorfizm, magmatizm, geodinamika: Materialy VI Rossiiskoi konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya = Stages of formation and development of the Proterozoic crust: stratigraphy, metamorphism, magmatism, geodynamics. Proceed. VI Russian conference on Precambrian geology and geodynamics*. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2019. P. 23–25. (In Russ.)

Arzamastsev A. A., Bea F., Glaznev V. N., Arzamastseva L. V., Montero P. The Kola Alkaline Province in the Paleozoic: an assessment of the composition of primary mantle melts and magmogenesis conditions. *Rossiiskii zhurnal nauk o Zemle = Russian Journal of Earth Sciences*. 2001;3(1):1–35. (In Russ.)

Balagansky V. V., Gorbunov L. A., Mudruk S. V. Paleoproterozoic Lapland-Kola collisional orogen, Northern Fennoscandian, Baltic Shield. Precambrian high-grade mobile belts: Extended abstracts. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. P. 7–10.

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 the Russian Academy of Sciences*. 1916;3(26):5–11. (In Russ.)

Baluyev A. S. Continental rifting of the north of the East European Platform in the Neogene: geology, history of development, comparative analysis: DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow; 2013. (In Russ.)

Barley M. E., Bekker A., Krapez B. Late Archean to Early Paleoproterozoic global tectonics, environmental change and the rise of atmospheric oxygen. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005;238:156–171. doi: 10.1016/j.epsl.2005.06.062

Bogdanova S. V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T. N., Kozlov V. I., Puchkov V. N., Volozh Yu. A. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia. *Precambrian Res.* 2008;160(1):23–45. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.024

Bozhko N. A. Supercontinental cyclicity in the history of the Earth. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 4. Geologiya = Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2009;4(2):13–27. (In Russ.)

Bozhko N. A., Prusakova N. A. On the prospects of the indigenous diamond content of the Karelian cra-

ton. *Rudy i metally = Oresand Metals*. 2014;4:5–13. (In Russ.)

Bozhko N. A., Prusakova N. A., Gromtsev K. V. Features of the tectonic structure of the Lapland-White Sea granulite-gneiss belt and prospects of its indigenous diamond content. *Otechestvennaya geologiya = National Geology*. 2021;6:45–64. (In Russ.). doi: 10.47765/0869-7175-2021-10031

Buchan K. L., Ernst R. E., Hamilton M. A., Mertanen S., Pesonen L., Elming S.-Å. Rodinia the evidence from integrated palaeomagnetism and U-Pb geochronology. *Precamb. Res.* 2001;110(1–4):99–631. doi: 10.1016/S0301-9268(01)00178-4

Cadman A. C., Heaman L., Tarney J., Wardle R., Krogh T. E. U-Pb geochronology and geochemical variation within two Proterozoic mafic dyke swarms, Labrador. *Can. J. Earth Sci.* 1993;30(7):1490–1504. doi: 10.1139/e93-128

Connelly J. N. Accretionary growth of the Sveconorwegian province of the Baltic shield between 1.7–1.5 Ga and links to intracontinental magmatism. *GSA Annual Meeting, November 5–8, 2001 Sess. 11: Proterozoic tectonic evolution of the Grenville Orogen in Eastern North America I*. 2001. Pap. 11.

Daly J. S., Balagansky V. V., Timmerman M. J., Whitehouse J. J. The Lapland-COLA orogen: Paleoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere. *European Lithosphere Dynamics. Geological Society, London memoirs*. 2006;32:579–598. doi: 10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.35

Dokukina K. A., Konilov A. N., Wang K. V., Bayanova T. B., Sheshukov V. S., Khubanov V. B., Golovanova T. I. Paleoproterozoic granulite metamorphism with an age of ~2.45 billion years in rocks of the White Sea eclogite province of the Fennoscandian Shield, Russia. *Etapy formirovaniya i razvitiya proterozoiskoi zemnoi kory: stratigrafiya, metamorfizm, magmatizm, geodinamika: Materialy VI Rossiiskoi konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya = Stages of formation and development of the Proterozoic crust: stratigraphy, metamorphism, magmatism, geodynamics. Proceed. VI Russian conference on Precambrian geology and geodynamics*. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2019. P. 68–70. (In Russ.)

Glebovitskii V. A. (ed.). Early Precambrian of the Baltic Shield. St. Petersburg: Nauka; 2005. P. 711. (In Russ.)

Khain V. E., Bozhko N. A. Historical geotectonics. Precambrian. Moscow: Nedra; 1988. 381 p. (In Russ.)

Kozhevnikov V. I. Archean greenstone belts of the Karelian craton as accretion orogens. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. 223 p. (In Russ.)

Li Z. X., Bogdanova S. V., Collins A. S., Davidson A., De Waele B., Ernst R. E., Fitzsimons I. C. W., Fuck R. A., Gladkochub D. P., Jacobs J., Karlstrom K. E., Lu S., Natapov L. M., Pease V., Pisarevsky S. A., Thrane K., Vernikovskiy V. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precamb. Res.* 2008;160:179–210. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.021

Lobach-Zhuchenko S. B., Sergeev S. A., Levchenkova G. M., Ovchinnikova G. V., Kotova L. N., Krylov I. N., Yakovleva S. Z. Vodlozersky gneiss complex of the Early Archean an dits structural and metamorphic evolution.

*Izotopnaya geokhronologiya dokembriya = Isotopic geochronology of the Precambrian.* Leningrad: Nauka; 1989. P. 14–45. (In Russ.)

Lubnina N. V., Slabunov A. Reconstruction of the Neoproterozoic supercontinent Kenorland based on paleomagnetic and geological data. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya = Moscow University Bulletin. Series 4. Geology.* 2011;4(4):23–30. (In Russ.)

Mansfeld J., Andersen T. Formation of New Crust in Scandinavia Between 1,75 and 1,55 Ga as Evident from the Gothian Units of the stfold – Akershus Sector, SE Norway. *J. Conf. Abstr. EUG 10.* 1999;4(1):137.

Mitrofanov F. P. Early Precambrian geodynamics, magmatism and metallogeny of the Kola province. *Vestnik MG TU = Bulletin of the Moscow State Technical University.* 2009;12(4):567–570. (In Russ.)

Pesonen L. J., Mertanen S., Veikkolainen T. Paleoproterozoic supercontinents – A paleomagnetic view. *Geophysics.* 2012;48(1-2):5–47.

Petrovsky M. N., Petrovskaya L. S., Bayanova T. B. Evolution of magmatism in the geological history of the Murmansk Neoproterozoic craton. *Magmatizm i metamorfizm v istorii Zemli: XI Vserossiiskoe petrograficheskoe soveshchanie: Tezisy dokladov = Magmatism and metamorphism in the history of the Earth. Proceed. XI All-Russian petrographic meeting.* Vol. 2. Ekaterinburg; 2010. P. 130–131. (In Russ.)

Puchkov V. N. Tectonics and geodynamics of timanides. *Strukturno-veshchestvennye komplekсы i problemy geodinamiki dokembriya fanerozoiskikh orogenov: Mat-ly mezhdunar. nauch. konf. (III chteniya pamyati S. N. Ivanova) = Structural-material complexes and problems of geodynamics of the Precambrian Phanerozoic orogens. Proceed. Scientific conference (III Readings in memory of S. N. Ivanov).* Ekaterinburg: IGIG UrO RAN; 2008. P. 104–109. (In Russ.)

Samsonov A. V., Stepanova A. V., Arzamastsev A. A., Sal'nikova E. B., Larionova Yu. O., Larionov A. I., Egorova S. V. The large magmatic province of Eastern Fennoscandia: paragenetic diversity in geodynamic unity. *Etapy formirovaniya i razvitiya proterozoiskoi zemnoi kory: stratigrafiya, metamorfizm, magmatizm, geodinamika: Materialy VI Rossiiskoi konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya = Stages of formation and development of the Proterozoic crust: stratigraphy, metamorphism, magmatism, geodynamics. Proceed. VI Russian conference on Precambrian geology and geodynamics.* St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2019. P. 198–200. (In Russ.)

Shchukina E. V., Agashev A. M., Pokhilenko N. P., Golovin N. N. Equigranular eclogites from the V. Grib

kimberlite pipe: evidence for Paleoproterozoic subduction on the territory of the Arkhangelsk diamondiferous province. *Doklady Earth Sciences.* 2015;462(1): 497–501. doi: 10.1134/S1028334X15050165

Slabunov A. I. Archean and Paleoproterozoic orogens: a comparative analysis of geodynamic processes during their formation (on the example of the Fennoscandian Shield). *Etapy formirovaniya i razvitiya proterozoiskoi zemnoi kory: stratigrafiya, metamorfizm, magmatizm, geodinamika: Materialy VI Rossiiskoi konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya = Stages of formation and development of the Proterozoic crust: stratigraphy, metamorphism, magmatism, geodynamics. Proceed. VI Russian conference on Precambrian geology and geodynamics.* St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2019. P. 210–212. (In Russ.)

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of Archean mobile belts (on the example of the White Sea province of the Fennoscandian Shield). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 294 p. (In Russ.)

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Balagansky V. V., Soryonen-Ward P., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. Archean of the Baltic Shield: geology, geochronology, geodynamic conditions. *Geotektonika = Geotectonics.* 2006;6:1–29. (In Russ.)

Stepanova A. V., Samsonov A. V., Sal'nikova E. B., Arzamastsev A. A., Egorova S. V., Veselovskii R. V., Larionova Yu. O., Erofeeva K. G., Stafeeva M. V. Paleoproterozoic mafic dykes of the Karelian and Kola-Murmansk provinces of the Fennoscandian Shield: geochronology, correlation, tectonic consequences. *Etapy formirovaniya i razvitiya proterozoiskoi zemnoi kory: stratigrafiya, metamorfizm, magmatizm, geodinamika: Materialy VI Rossiiskoi konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya = Stages of formation and development of the Proterozoic crust: stratigraphy, metamorphism, magmatism, geodynamics. Proceed. VI Russian conference on Precambrian geology and geodynamics.* St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2019. P. 221–222. (In Russ.)

Volodichev O. I., Slabunov A. I., Bibikova E. V., Konilov A. N., Kuzenko T. I. Archean eclogites of the White Sea Mobile Belt (Baltic Shield). *Petrologiya = Petrology.* 2004;12(6):609–631.

Williams H., Hoffman P. F., Lewry J. F., Monger J. W. H., Rivers T. Anatomy of North America: tectonic portrayals of the continent. *Tectonophysics.* 1991; 187:117–134. doi: 10.1016/0040-1951(91)90416-P

Поступила в редакцию / received: 28.03.2024; принята к публикации / accepted: 23.09.2024.  
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



УДК 553.3:551.71/72

## ПОЛОСЧАТЫЕ ЖЕЛЕЗИСТЫЕ ФОРМАЦИИ ДОКЕМБРИЯ: ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОБИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

**П. В. Медведев**

*Институт геологии КарНЦ, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)  
Петрозаводский государственный университет (пр. Ленина, 33,  
Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

Полосчатые железистые формации (BIF) являются экономически важными осадочными породами в докембрийской геологической летописи Земли. Это морские хемогенные отложения, состоящие из чередующихся полос, богатых железом и кремнеземом, которые накапливались на протяжении большей части докембрия. BIF представляют собой важные индикаторы геохимического состава докембрийской морской воды и свидетельствуют о ранней микробной жизни. Железо, присутствующее в BIF, вероятно, осаждалось в виде минералов  $Fe^{+3}$ , таких как ферригидрит ( $Fe(OH)_3$ ), либо в результате метаболической активности бескислородных фотоавтотрофных окисляющих двухвалентное железо бактерий (фотоферротрофов), микроаэрофильных бактерий или путем окисления растворенного  $Fe^{+2}$  кислородом, вырабатываемым цианобактериями. BIF осаждались, хотя и с перерывами, в течение более чем 4 миллиардов лет, но по мере того, как земная система фундаментально менялась, менялся и характер выпадения железа. Ранние исследования указывали на континентальный источник железа для BIF, получаемого в результате интенсивного химического выветривания. Открытие современных донных гидротермальных систем, обеспечивающих поступление железа и марганца в морскую воду, привлекло внимание к гидротермальным процессам в океанских глубинах как к наиболее вероятному источнику железа. О биологической роли микроорганизмов в осаждении железа говорилось более ста лет, однако лишь недавно они получили широкое признание. Компоненты земной системы, которые в наибольшей степени влияют на отложение BIF, включают магматизм, биосферу, окислительно-восстановительные условия и состав морской воды.

Ключевые слова: архей; протерозой; полосчатые железистые формации; условия образования; микроорганизмы

Для цитирования: 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

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-17-00026).

## P. V. Medvedev. PRECAMBRIAN BANDED IRON FORMATIONS: PALEOECOLOGICAL AND PALEOBIOLOGICAL ASPECTS

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*  
*Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

Banded iron formations (BIF) are economically important sedimentary deposits in Earth's Precambrian rock record. They are marine chemical sediments consisting of alternating iron-rich and silica-rich bands, which were deposited throughout much of the Precambrian. BIFs are important proxies for the geochemical composition of Precambrian seawater and provide evidence for early microbial life. Iron in BIFs was likely precipitated in the form of Fe<sup>3+</sup> minerals, such as ferrihydrite (Fe(OH)<sub>3</sub>), either through the metabolic activity of anoxygenic photoautotrophic Fe<sup>2+</sup>-oxidizing bacteria (photoferrotrophs), by microaerophilic bacteria, or by the oxidation of dissolved Fe<sup>2+</sup> by oxygen produced by early cyanobacteria. BIFs were deposited, albeit intermittently, for more than 4 billion years, but as the Earth system changed fundamentally, so did the style of iron precipitation. Earlier studies have invoked a continental source of iron for BIFs, derived via intense chemical weathering. The discovery of modern seafloor-hydrothermal systems, supplying Fe and Mn to seawater, shifted attention to the hydrothermal processes in the deep ocean as the most likely source. A biological role in iron precipitation has been suggested for over a century, however only recently the importance of microorganisms has received wider acceptance. Components of the Earth system that are most relevant to deposition of BIFs include magmatism, biosphere, and sea-water redox state and composition.

**Keywords:** Archean; Proterozoic; Banded Iron Formations; depositional environments; microorganisms

For citation: Medvedev P. V. Precambrian banded iron formations: paleoecological and paleobiological aspects. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 6. P. 17–29. doi: 10.17076/geo1953

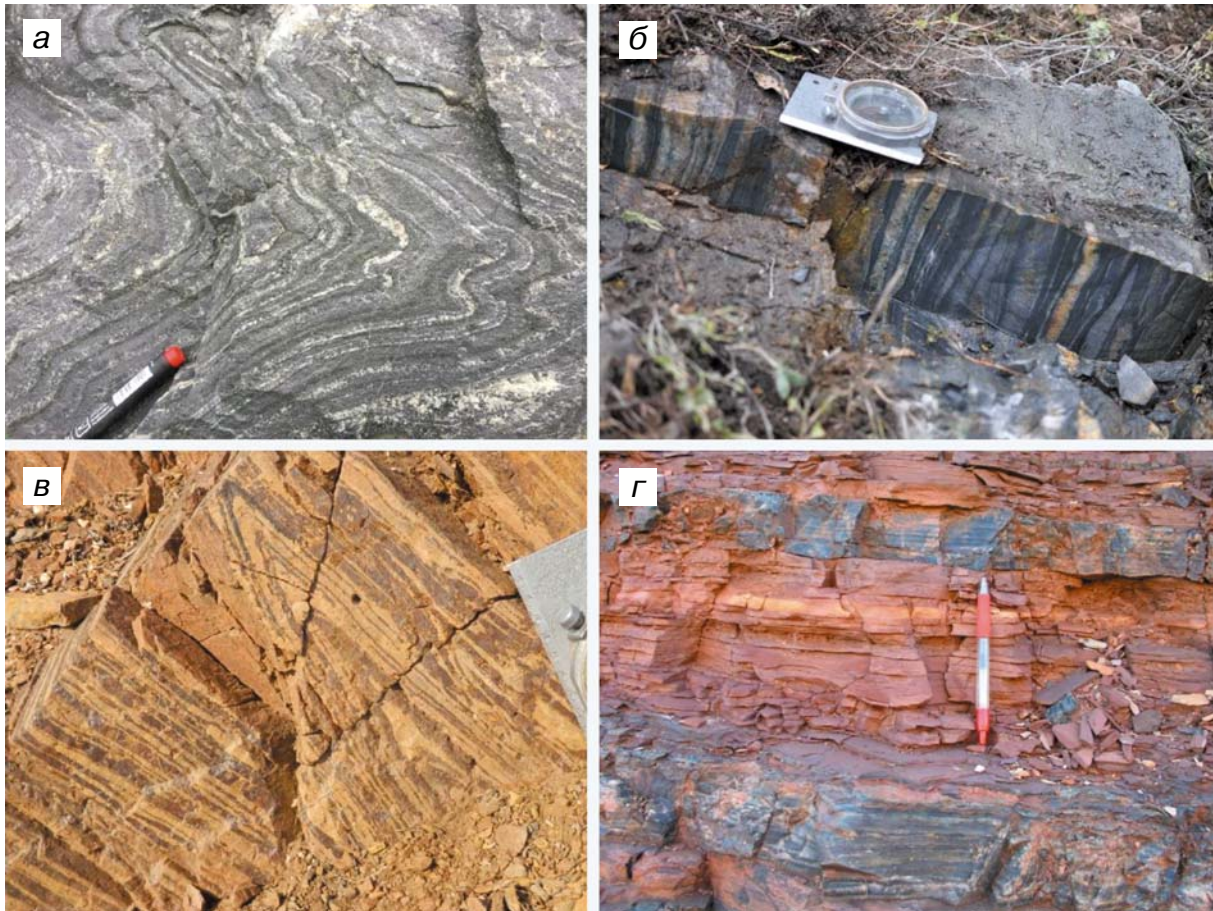
**Funding.** The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (grant 22-17-00026).

### Введение

Древние полосчатые железистые формации – Banded Iron Formations (BIF) – богатые железом и кремнеземом химические осадочные породы, которые формировались на протяжении докембрия, обеспечивают значительную часть доказательств современного научного понимания палеоэкологических условий в хадейско-архейском (4,1–2,5 млрд лет) и протерозойском (2,5–0,539 млрд лет) зонах. Несмотря на разногласия относительно механизмов их образования, железорудные формации являются свидетельством влияния докембрийской биосферы на химический состав древнего океана. Поскольку многие BIF являются хомогенными отложениями, отражающими состав вод, из которых они выпали в осадок, они также могут служить подробными геохимическими архивами для изучения древних морских температур, окислительно-восстановительных состояний и круговорота элементов, если должным образом разобраться в их седиментологическом контексте.

BIF представляют собой богатый железом тип горных пород, который характерен для многих архейских и протерозойских супракристалльных толщ (рис. 1).

Учитывая, что они накапливались на морском дне в течение более двух миллиардов лет ранней истории Земли, перемены в химическом, минеральном и изотопном составе BIF дают уникальную возможность проследить за изменениями окружающей среды на эволюционирующей Земле. Одним из наиболее значимых событий в истории Земли стал переход от бескислородных условий на планете к обстановке, где кислород постоянно присутствовал в толще морской воды и атмосфере. С постепенным глобальным насыщением кислородом была связана эволюция аэробного микробного метаболизма, который фундаментально повлиял на процессы континентального выветривания, поступление питательных веществ в океаны и в конечном счете – на диверсификацию биосферы и возникновение сложных форм жизни. Многие из ключевых современных открытий в понимании генезиса BIF связаны с палеобиологией,



**Рис. 1.** Примеры полосчатых железистых кварцитов:

а, б – Костомукшский зеленокаменный пояс Карельского кратона (а – костомукшская свита гимольской серии, б – шурловаарская свита контокской серии), в – Центрально-Бунделкхандский зеленокаменный пояс Бунделкхандского кратона (Индия); г – бассейн Хамерсли кратона Пилбара (Австралия). Фото А. И. Слабунова

**Fig. 1.** Examples of banded iron formations:

а, б – Kostomuksha Greenstone Belt of the Karelian Craton (а – Kostomuksha suite of the Gimol series, б – Shurlovaara suite of the Kontok series), в – Central Bundelkhand Greenstone Belt of the Bundelkhand Craton (India); г – Hamersley Basin of the Pilbara Craton (Australia). Photo by A. I. Slabunov

поскольку биологически поддерживаемое окисление двухвалентного железа ( $Fe^{+2}$ ) либо напрямую посредством фотоферротрофии, либо косвенно при помощи кислородного фотосинтеза обеспечивает процесс осаждения. Обилие и изотопный состав минералов, содержащих  $Fe^{+2}$ , в BIF предполагают восстановление трехвалентного железа ( $Fe^{+3}$ ) микроорганизмами (археями и бактериями). Связи между палеобиологией, гидротермальными системами и образованием BIF традиционно игнорировались, но теперь формируют согласованную модель (рис. 2) для этого уникального типа горных пород [Mänd et al., 2022].

### Классификация

BIF – это богатые железом (15–40 мас. % Fe) кремнистые (40–60 мас. %  $SiO_2$ ) хемогенные

осадочные породы, которые выпадали в осадок из морской воды на протяжении докембрийского времени в интервале между 4,1 и 0,75 млрд лет назад (хадей, архей и палеопротерозой) [Слабунов, 2022]. Большинство BIF демонстрируют характерную полосчатость переменной мощности, от макрополос (мощностью в метр) до мезополос (мощностью в сантиметр) и микрополос (миллиметровой и субмиллиметровой мощности). Микрополосы связаны с эпизодическим гидротермальным воздействием, которое, как предполагалось ранее, представляет собой годовой процесс осаждения. Отмечается усложнение осадконакопления BIF, когда появляются слои с терригенной составляющей [Слабунов, Исаченко, 2024]. Полосчатость в BIF может быть развита по латерали, указывая на отложение ниже уровня волн. Некоторые железистые осадки, известные как гранулированные

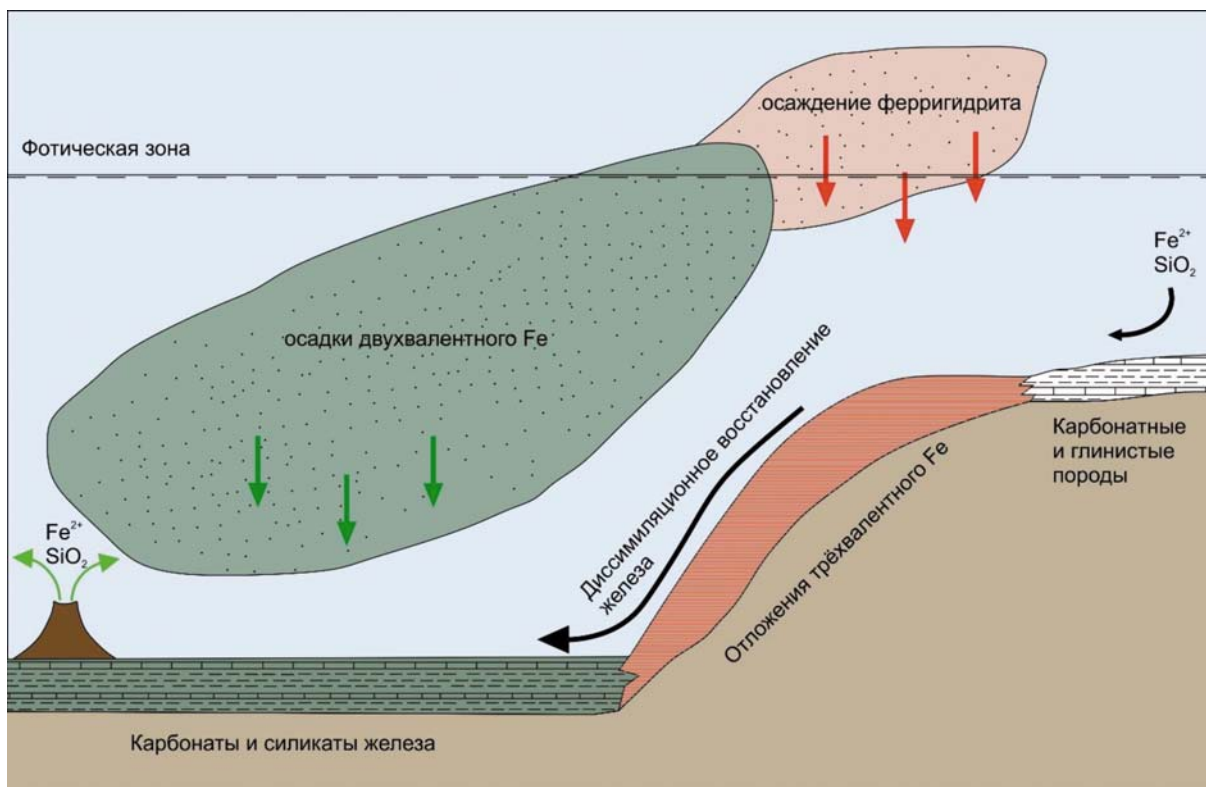


Рис. 2. Механизмы окисления  $\text{Fe}^{2+}$  в докембрийских океанах [Konhauser et al., 2017 с упрощениями]. Предполагаются два биологически контролируемых механизма: (1) реакция  $\text{O}_2$ , вырабатываемого цианобактериями, с растворенным  $\text{Fe}^{2+}$  и/или (2) прямое окисление посредством анокислительного фотосинтеза на основе  $\text{Fe}^{2+}$  (фотоферротрофия).  $\text{Fe}^{2+}$  поступало как из глубоководных гидротермальных систем, так и за счет континентального выветривания, тогда как  $\text{Fe}^{3+}$ , образовавшееся в фотической зоне, осаждалось в виде ферригидрита  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  и накопилось на морском дне в качестве протолита для BIF. Часть ферригидрита была позже восстановлена либо бактериями с использованием органического углерода, либо посредством потенциальной метаболической связи восстановления  $\text{Fe}^{3+}$  и окисления метана

Fig. 2. Mechanisms of  $\text{Fe}^{2+}$  oxidation in Precambrian oceans [Konhauser et al., 2017, simplified]. Two biologically controlled mechanisms are supposed: (1) reaction of cyanobacterially-generated  $\text{O}_2$  with dissolved  $\text{Fe}^{2+}$ , and/or (2) direct oxidation via  $\text{Fe}^{2+}$  based anoxygenic photosynthesis (photoferrotrophy). The  $\text{Fe}^{2+}$  was sourced from both deep-sea hydrothermal systems and continental weathering, whereas the  $\text{Fe}^{3+}$  formed in the photic zone was precipitated as ferrihydrite,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , and deposited onto the seafloor as a precursor sediment for BIF. Some ferrihydrite was later reduced either through direct bacterial  $\text{Fe}^{3+}$  reduction utilizing organic carbon or through a potential metabolic coupling of  $\text{Fe}^{3+}$  reduction and methane oxidation

железные формации (GIF), в отличие от BIF лишены этой характерной полосчатости и состоят из гранул кремнезема и оксидов или силикатов железа с раннедиагенетическим кремнистым, карбонатным или гематитовым цементом, заполняющим поровое пространство [Bekker, Kovalick, 2021]. Обычно считается, что GIF осаждались вблизи берега на мелководье. Как BIF, так и GIF могут предоставить важную информацию о составе вод древних океанов, но только в том случае, если можно определить физическую и химическую среду отложения, тектоническую обстановку бассейна, первичные и вторичные геохимические сигналы.

BIF по особенностям породной ассоциации, в которую они входят, делятся на три типа –

Алгома, Сьюпириор и Рапитан [Bekker et al., 2014]. BIF типа Алгома переслаиваются или стратиграфически и генетически связаны с подводными мафит-ультрамафитовыми и фельзитовыми вулканическими породами, вулканокластическими граувакками в зеленокаменных поясах [Bekker et al., 2014]. BIF типа Алгома, по-видимому, образовались вблизи вулканических дуг и центров спрединга в результате эксгаляционных гидротермальных процессов, связанных с подводным вулканизмом. Они содержат оксидную, силикатную и карбонатную фации и обычно классифицируются как сульфидные отложения, которые могут быть обогащены медью, цинком, свинцом, серебром и золотом. Отсутствие каких-либо

седиментологических особенностей, кроме тонкой полосчатости (т. е. отсутствие осадочных текстур, генерируемых течением, приливом или волной), в BIF типа Алгома указывает на глубоководную среду осадконакопления, вероятно, удаленную от континентальных массивов суши. В этом отношении BIF типа Алгома имеют составы, которые отражают влияние местных гидротермальных флюидов в частично изолированных бассейнах или в открытых морских системах [Konhauser et al., 2017]. BIF, образовавшиеся ранее 3,0 млрд лет назад, обычно описываются как алгомского типа, хотя есть и более поздние примеры возрастом 2,7–2,6 млрд лет, а также неалгомские мелководноморские железистые толщи в палеоархее и хадее. Крупнейшее железорудное месторождение Карелии – Костомукшское, приуроченное к одноименному зеленокаменному поясу, относится к типу Алгома. Недавние геохронологические и геохимические исследования показали, что осадконакопление железосодержащих толщ происходило в связи в тремя разновозрастными (2,87–2,84; 2,81–2,79; 2,76–2,74 млрд лет назад) вулканогенными комплексами в различных геодинамических обстановках (океаническое плато, островная дуга) [Савко и др., 2024; Слабунов и др., 2021, 2023; Slabunov et al., 2024b, c].

BIF типа Сьюпириор развивались в обстановке пассивной окраины с преобладанием

осадконакопления (т. е. после образования стабильных континентальных шельфов) и, как правило, не имеют прямых стратиграфических связей с вулканическими породами. Считается, что эти BIF формировались в прибрежных шельфовых обстановках, поскольку обычно переслаиваются с карбонатными породами и черными сланцами. В отличие от большинства BIF типа Алгома, которые редко прослеживаются более чем на 10 км по простиранию и обычно имеют мощность не более 50 м, BIF типа Сьюпириор могут иметь первоначальную площадь осадконакопления, превышающую 100 000 км<sup>2</sup> [Bekker et al., 2014]. С точки зрения запасов самые крупные BIF типа Сьюпириор содержат более 10<sup>14</sup> тонн [Konhauser et al., 2017], обеспечивая большую часть железа, необходимого для мировой экономики (рис. 3). Например, бассейны Хамерсли в Австралии, Минас-Жерайс в Бразилии, Трансваальский в Южной Африке, Кривой Рог (Украина) и Лабрадорский трог (Канада). Железорудный бассейн Сарматии Курская магнитная аномалия – крупнейший железорудный бассейн типа Сьюпириор с пятью обрабатываемыми месторождениями, которые обеспечивают более 50 % добычи железной руды в России и имеют запасы еще на 700 лет [Савко и др., 2015]. Стратиграфические разрезы этого бассейна коррелируются с BIF Хамерсли, Трансвааля и Минас Жерайс [Савко и др., 2017; Savko et al., 2021].

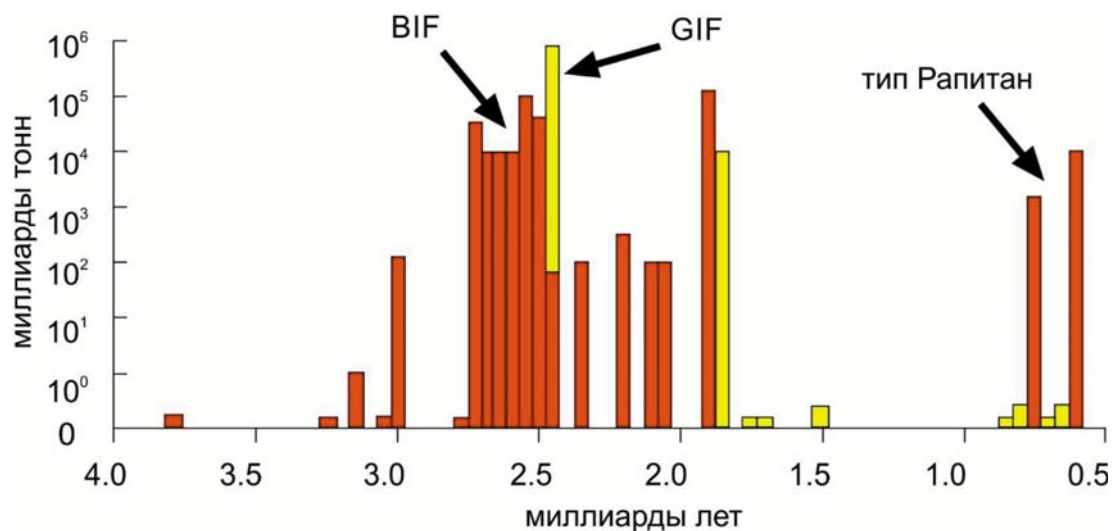


Рис. 3. Отложения железистых формаций в миллиардах метрических тонн с шириной баров 50 млн лет [Konhauser et al., 2017]. Большинство отложений до 2,4 млрд лет содержат BIF; около 2,3–0,8 млрд лет – в основном GIF; неопротерозойские железистые формации типа Рапитан (~0,715 млрд лет) связаны с ледниковыми отложениями

Fig. 3. Iron formation deposition in billions of metric tonnes with 50 m. y. bar widths [Konhauser et al., 2017, modified]. Most deposits before 2.4 Ga comprise BIF; that ca. 2.3–0.8 Ga are predominantly GIF; Neoproterozoic Rapitan-type iron formations (~0.715 Ga) are associated with glacial deposits

Рапитанский тип приурочен к неопротерозойскому этапу формирования BIF 850–700 млн лет назад. Он гораздо менее значителен, чем предшествующий хадейско-палеопротерозойский. Протяженность пластов неопротерозойских железистых кварцитов не превышает первых десятков км при мощностях до 10 м. Они тесно связаны с ледниковыми отложениями [Ильин, 2009]. Неопротерозойские BIF залегают между гляциогенными толщами лапландского (635 млн лет) и стуртского (рапитанского) оледенения (730–750 млн лет). Рудный минерал представлен, как правило, гематитом. Главным источником поступления железа в бассейн осадконакопления был континентальный снос. По характеру распределения РЗЭ и индексу Zn/Co определено, что железо поступало также и из гидротермальных источников [Stern et al., 2013]. Накопление железа в морской воде происходило во время оледенений, а осаждение и минерализация – в начале послеледниковых трансгрессий.

BIF доминируют в эоархейских и раннепалеопротерозойских разрезах и состоят из перемежающихся полос, богатых железом и кремнеземом. BIF осаждались в относительно глубоководных условиях, поскольку в них обычно отсутствуют свидетельства воздействия волн или штормов. Большинство BIF обычно перекрываются или подстилаются богатыми органическим веществом и сульфидами сланцами, а в некоторых случаях переслаиваются с ними.

GIF впервые появляются в геологической летописи около 2,90 млрд лет назад [Konhauer et al., 2017], достигают своего пика около 1,88 млрд лет назад, сменяясь железняками в фанерозойской летописи (после 543 млн лет назад) [Bekker et al., 2014]. GIF характеризуются наличием гранул, которые могут различаться по морфологии, размеру (от микрометров до сантиметров в диаметре) и составу (кремнезем, оксиды железа, карбонаты железа и/или силикаты железа); цемент обычно представляет собой кремнезем, карбонат или гематит. Многие из гранул рассматриваются как обломочные, причем некоторые из них получены в результате разрушения богатых железом глин, аргиллитов, аренигов и строматолитов. Другой генезис имеют, например, оолитовые породы свиты Тимболл Хилл в Южной Африке (2,32 млрд лет), состоящие из концентрических корковых отложений гематита, которые, вероятно, осаждались на малой глубине, где богатые  $Fe^{+2}$  воды смешивались с более насыщенной кислородом морской водой. В породе могут преобладать как гранулы, так и цемент.

Наличие осадочных текстур, образованных волнами и течением, например, косой слоистости, указывает на то, что гранулы образовались у берега на глубине, близкой к основанию волн.

## Минералогия

Наиболее хорошо сохранившиеся разрезы BIF практически однородны и состоят в основном из мелкозернистого кварца, магнетита и гематита, с переменным количеством богатых железом силикатных минералов (стильпномелан, миннесотаит, гриналит и рибекит), карбонатных минералов (сидерит, анкерит, кальцит и доломит), а также локально рассеянных сульфидов (пирит и пирротин). Наличие как трех-, так и двухвалентных железистых минералов дает BIF среднюю степень окисления  $Fe^{+2,4}$ . Четыре фации BIF – оксидная, силикатная, карбонатная и сульфидная – чередуются с минералами кремнезема различной степени перекристаллизации [Simonson, 2003]. Оксидная фация состоит преимущественно из магнетита и/или гематита, тогда как разновидности карбонатной фации содержат сидерит или анкерит в качестве основных составляющих. Минералогия силикатных фаций более сложна и зависит от степени метаморфизма. При слабой степени метаморфизма (зеленосланцевая фация или ниже) могут присутствовать гриналит, миннесотаит, стильпномелан, шамозит и рипидолит ( $Fe$ -хлорит), рибекит и тетраферрибиотит. При более высоких степенях метаморфизма могут присутствовать куммингтонит, грюнерит, актинолит, роговая обманка, пироксен, гранат и фаялит [Klein, 2005; Slabunov et al., 2024c].

Общепризнано, что ни один из минералов в BIF не является первичным по происхождению в том смысле, что первоначальный осадок на морском дне, вероятно, представлял собой богатый водой гель, который не сохранился. Вместо этого наблюдаемые минералы отражают значительные изменения после осаждения в течение диагенеза и метаморфизма, включая в некоторых случаях влияние флюидов после осаждения, особенно в окисленных и минерализованных зонах. Эффект повышения температуры и давления проявляется в прогрессивном изменении минералогии за счет замещения и перекристаллизации, увеличения размера зерен и «стирания» первичных структур [Klein, 2005]. Предполагается, что в присутствии растворенного кремнезема начальный осадок в толще воды мог представлять собой  $Fe^{+3}$ -Si гель [Percak-Dennett et al., 2011]. Во время седиментации BIF погружение частиц  $Fe^{+3}$ -кремнезема на морское дно

в конечном итоге привело к образованию, во-первых, магнетита или карбонатов железа, когда органическая реминерализация была связана с восстановлением  $Fe^{+3}$  во время диагенеза или метаморфизма; во-вторых, гематита, путем обезвоживания осадка и выделения кремнезема, при условии недостаточного количества органического углерода для восстановления  $Fe^{+3}$ ; в-третьих, силиката железа, возможно, в форме минерала-предшественника, такого как гриналит ( $(Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$ ), когда кремнезем, сорбированный на оксигидроксидах  $Fe^{+3}$  или включенный в них, реагировал с другими катионными соединениями в поровых водах осадка; и в-четвертых, к осаждению кварца путем дегидратации из опалового кремнезема и/или  $Fe^{+3}$ -Si гелей. Сорбция двухвалентного железа этими частицами, возможно, также привела к образованию отложений типа «зеленой ржавчины», которые в конечном итоге превратились в магнетит или силикаты железа [Halevy et al., 2017]. В качестве первичного осадка, который образовался в толще воды, был предложен гриналит [Rasmussen et al., 2017].

Органический материал в виде пелагических осадков или непосредственно связанный с погружением частиц  $Fe^{+3}$ -оксигидроксида, мог бы способствовать реакциям реминерализации, упомянутым выше, и, вероятно, был в значительной степени израсходован избыточными окислителями  $Fe^{+3}$  во время диагенеза и метаморфизма. Хотя сидерит в некоторых BIF интерпретировался как первичная минеральная фаза, существуют веские изотопные и петрографические аргументы, которые указывают на образование, связанное с реминерализацией органического вещества [Johnson et al., 2013].

Обычно считается, что кремний осаждается из толщи воды или в поровых водах осадка в виде коллоидного кремнезема совместно с частицами оксигидроксида  $Fe^{+3}$ , но также возможно, что кремний образовался в результате обезвоживания  $Fe^{+3}$ -Si гелей. Кроме  $Fe^{+2}$  архейский океан имел значительно повышенные концентрации растворенного кремнезема [Zheng et al., 2016]. В современной морской воде растворенный кремнезем поглощается организмами, использующими его для строительства скелета. Альтернативные интерпретации для кремния включают образование его: 1) на границе раздела осадок-вода как фаза замещения осадка-предшественника, 2) в осадке после десорбции кремнезема, который был адсорбирован на поверхности оксигидроксилов  $Fe^{+3}$  во время диагенетического восстановления  $Fe^{+3}$  органическим углеродом, 3) в качестве цемента, который заполнял поровые пространства в первичных

богатых железом силикатных илах [Rasmussen et al., 2015]. Учитывая разнообразие случаев появления кремния среди различных BIF, эти интерпретации не являются взаимоисключающими.

Изотопные исследования Nd в BIF Карело-Кольского региона, Бунделкхандского кратона и Восточно-Европейской платформы для полос, богатых кремнеземом, указывают на ювенильный источник кремнезема, а для богатых железом полос из тех же образцов фиксируют поступление железа за счет континентального сноса [Alfimova et al., 2019; Slabunov et al., 2024a].

Важное значение для понимания генезиса BIF имеют находки в них циркона – главного минерала-геохронометра. В «чистых» BIF циркон, как правило, отсутствует, но по мере привноса терригенной компоненты появляется и циркон [Слабунов и др., 2022; Slabunov et al., 2024b]. Он может быть как детритовым, так и метаморфогенным, как, например, в Костомукшском, Центральном-Бунделкхандском и Южно-Бунделкхандском зеленокаменных комплексах [Slabunov et al., 2024a, b].

### **Роль микроорганизмов**

В качестве альтернативы биологической модели присутствие минералов трехвалентного железа в BIF было приписано метаболической активности планктонных бактерий в океанических фотических зонах. Хотя биологическая роль в осаждении оксигидроксида трехвалентного железа была предложена сто лет назад, важность бактерий в этом процессе начала получать большее признание с открытием микрофоссилий в BIF возрастом 1,88 млрд лет в бассейне Анимики из района озера Верхнее [Cloud, 1965]. Основываясь на предположении, что микрофоссилии были цианобактериями или их предшественниками, П. Клауд сделал вывод, что этим примитивным фотосинтезирующим бактериям, продуцирующим  $O_2$ , не хватало подходящих ферментов, удаляющих кислород, и, следовательно, им требовался  $Fe^{+2}$  в качестве акцептора кислорода [Cloud, 1973]. Следовательно, эти микроорганизмы процветали, когда поступал  $Fe^{+2}$ , что способствовало окислению и осаждению  $Fe^{+3}$ -оксигидроксилов. Напротив, численность фотосинтезирующей популяции сокращалась, если концентрация  $Fe^{+2}$  в воде была ограничена. Недавние исследования микрофоссилий из железорудной свиты Ганфлинт (1,88 млрд лет) подтверждают, что цианобактерии были важным компонентом мелководных морских сообществ в то время [Lepot et al., 2017]. Авторы предположили,

что биоминерализация внутриклеточного трехвалентного железа обеспечивала защиту от токсичности слишком высоких концентраций  $Fe^{+2}$  в окружающей среде за счет снижения содержания железа в проксимальных областях. Другие бактерии, возможно хемолитоавтотрофные, непосредственно использовали низкие концентрации  $O_2$ , имеющиеся в поверхностных водах архейских океанов, для окисления  $Fe^{+2}$ . Некоторые из микрофоссилий ганфлинтского типа из бассейна Анимики были определены как хемолитоавтотрофные  $Fe^{+2}$ -окислители, играющие важную роль и в современном круговороте железа [Planavsky et al., 2009].

На основании химических анализов, проведенных в BIF из пачки Ущелья Дейлс, входящей в серию Хамерсли (2,48 млрд лет) в Западной Австралии, считалось, что большая часть железа в BIF могла быть окислена аноксигенными фототрофными бактериями (фотоферротрофами) с биомассой, значительно меньшей, чем имеется в современных богатых железом водных средах. Однако фитопланктон, вырабатывающий кислород, возможно, также был способен обеспечивать необходимую окислительную среду. Используя геохимию BIF для пачки Ущелья Дейлс, было обнаружено, что при продолжительности жизненных циклов, сопоставимых с временем, наблюдаемым в современных экосистемах, те же популяции фитопланктона, необходимые для образования BIF, могли обеспечить весь набор микроэлементов в этом железорудном месторождении [Kohnhauser et al., 2018]. Кроме того, учитывая сходство между образованием BIF и стехиометрией микроэлементов в бескислородном фитопланктоне, предполагается, что большая часть микроэлементов, сохранившихся в BIF, в какой-то момент была биологически ассимилирована в толще воды из разлагающейся фотоферротрофной биомассы, сконцентрирована на морском дне и в конечном итоге сохранилась в железистом осадке примерно в стехиометрических пропорциях путем адсорбции до ферригидрита. Как и сегодня, фитопланктон и переработка его биомассы контролировали микроэлементный состав древней морской воды и донных отложений.

### **Изотопы серы, углерода, железа и геохимия редких элементов**

Изучение изотопов серы ( $^{32}S$ ,  $^{33}S$ ,  $^{34}S$ ,  $^{36}S$ ) имеет большой потенциал для оценки условий формирования, в том числе BIF. Так, данные по мультиизотопному составу серы сульфидов неархейских BIF Костомукшского зеленокаменного пояса дают основание полагать, что сера

для сульфидов в BIF поступала из трех резервуаров – из атмосферы (фотолитическая элементарная сера), из сульфатов, растворенных в морской воде, и при вулканизме (магматогенная сера). При образовании железорудных месторождений Костомукшского зеленокаменного пояса Карелии соотношения изотопов серы зафиксировали и сохранили в сульфидах взаимодействие между абиотическими (атмосферными, гидротермальными) и биотическими процессами (микробное диссимиляционное восстановление) [Высоцкий и др., 2023]. Полученные результаты дают новые аргументы в пользу развития представлений о существовании бактериальной активности в архейском океане и вовлечении серы в биогенный круговорот, а также свидетельствуют об отсутствии свободного кислорода в архейской атмосфере Земли. По изотопным данным  $S^{34}$  и  $S^{33}$  идентифицирована активная деятельность сульфатредуцирующих и диспропорционирующих элементарную серу бактерий в поверхностных средах архейских осадочных пород [Веливецкая и др., 2024].

Почти все свидетельства существования древнейших следов жизни на Земле основаны на частицах графитового углерода, сохранившихся в породах осадочного происхождения. Источник углерода в таком древнем графите все еще дискуссионный, поскольку может быть как абиогенным, так и эпигенетическим. В десяти различно метаморфизованных железорудных формациях (BIF) возрастом от 1800 до >3800 млн лет описано совместное нахождение слабокристаллических и кристаллических разновидностей графитового углерода с апатитом [Dodd et al., 2019]. В неоархейских и палеопротерозойских слабометаморфизованных BIF графитовый углерод, обедненный  $^{13}C$ , встречается в виде включений в апатите и карбонате и, возможно, представляет собой реминерализацию сингенетичной биомассы. В высокометаморфизованных BIF графит, обедненный  $^{13}C$ , встречается совместно со слабокристаллическим графитом (PCG), а также апатитом, карбонатом, пиритом, амфиболом. Кристаллический графит может встречаться с апатитом и ортопироксеном, а иногда имеет оболочки из PCG. Кристаллический графит интерпретируется как метаморфизованный продукт сингенетичного органического углерода, осажденного в BIF, в то время как слабокристаллический графит был осажден из C–O–H-флюидов, частично полученных из сингенетичного углерода, наряду с осажденными из флюида апатитом и карбонатом. Изотопные характеристики графитового углерода и распределение графита,



осажденного из флюида в высокометаморфизованных BIF, согласуются с таковыми для углерода во флюиде, образованного в результате термического крекинга сингенетичной биомассы, накопленной в BIF, но нельзя исключать для PCG и другие источники углерода. Полученные результаты показывают, что апатит+графит является распространенной минеральной ассоциацией в метаморфизованных BIF [Dodd et al., 2019].

Исследование углеродистого вещества из метапелитов BIF Костомукшского зеленокаменного пояса Карелии показало присутствие нескольких его типов, различающихся по структуре и содержанию углерода. Анализ спектров комбинационного рассеяния углеродистого вещества выявил как хорошо структурированный графит, так и кероген. Изотопный состав общего восстановленного углерода характерен для биогенных процессов. Диапазон значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  от  $-27,9$  до  $-30,6$  ‰ согласуется с фиксацией углерода фото- или хемоавтотрофными микроорганизмами [Высоцкий и др., 2024].

Химический и изотопный состав докембрийских осадочных пород, богатых железом, занимает видное место в дискуссиях о биогеохимическом цикле железа и окислительно-восстановительных условиях на ранней Земле. Общая тенденция снижения значений  $\delta^{56}\text{Fe}$  для эоархейских и палеопротерозойских железистых формаций с уменьшением возраста отражает увеличение степени окисления  $\text{Fe}^{+2}$ , что согласуется с увеличением насыщения кислородом поверхностных сред начиная с мезоархея. Такие тенденции могут свидетельствовать о переходе от анаэробного окисления к аэробному, частично отражая увеличение содержания питательных веществ, которое следует за ростом континентальной коры. Обычно предполагается, что размер биосферы в раннем архее был в значительной степени ограничен питательными веществами, в частности фосфором. Положительные значения  $\delta^{56}\text{Fe}$  для оксидов Fe в хемогенных осадочных породах, отложившихся в открытой морской среде в настоящее время, согласуются с избытком  $\text{Fe}^{+2}$ . Новые данные по изотопам Fe и геохимии редких элементов для джеспилитов (гематит-кремнистых пород) возрастом 3,4–3,5 Ga получены из района Норт Поул на кратоне Пилбара (Австралия) [Johnson et al., 2022]. Здесь выявлен фациальный переход суша-море, сохранившийся в низах свиты Дрессер в виде отложений джеспилита в изолированных континентальных бассейнах и открытоморских условиях. Содержание иттрия и редкоземельных элементов (Y + PЗЭ) в джеспилитах низов

свиты Дрессер указывает на наличие пресноводного компонента в условиях изолированного бассейна, в отличие от компонентов исключительно морской воды в открытом море. Значения  $\delta^{56}\text{Fe}$  для джеспилитов открытого моря положительны ( $\delta^{56}\text{Fe} \sim$  от +1 до +2,4 ‰), аналогично другим BIF от эоархейского до палеоархейского возраста. Для джеспилитов изолированного бассейна нижней части свиты Дрессер значения  $\delta^{56}\text{Fe}$  изменяются до слабоотрицательных ( $\delta^{56}\text{Fe} \sim -0,4$  ‰). Они коррелируются с содержаниями Y+PЗЭ, которые указывают на перемешивание флюидов. В целом существует диапазон значений  $\delta^{56}\text{Fe}$  в пределах  $\sim 3$  ‰ на переходе суша-море в нижней части свиты Дрессер, значительно превышающий диапазон, ранее измеренный в палеоархейских джеспилитах. По новым результатам для кратона Пилбара и базе данных изотопов Fe для эоархейских и палеоархейских джеспилитов, а также с простой моделью баланса масс, связывающей значения  $\delta^{56}\text{Fe}$  и содержание P, сделан вывод, что относительно высокое содержание питательных веществ наблюдается только в условиях изолированных бассейнов  $\sim 3,5$  млрд лет назад и становится более характерным для открытых океанов примерно 3,2 млрд лет назад [Johnson et al., 2022]. Это увеличение доступности питательных веществ коррелируется с заметным увеличением соотношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для морской воды, что является косвенным показателем их поступления в океаны с континентов в результате выветривания. В совокупности эти находки демонстрируют важность геологического контекста при интерпретации изотопного состава железа в BIF. Фиксация ранее упущенного перехода суша-море в нижней части свиты Дрессер дает представление о биосфере, которое ранее характеризовало только условия открытого моря.

## Вывод

В последнее время выяснение генезиса BIF продвинулось вперед быстрыми темпами, поскольку эти характерные хемогенные отложения активно используются в качестве палеоэкологических сенсоров. Произошел пересмотр роли, которую метаболические реакции микроорганизмов играли в отложении и диагенезе BIF, а также в понимании участия микроорганизмов в круговороте железа. Одним из достижений является понимание связи эволюции процессов на поверхности Земли с микробным метаболизмом во время архейско-протерозойского перехода. Геологическая летопись BIF помогла понять эволюцию аэробного метаболизма,

связанного с более ранней экспансией цианобактерий по всей поверхности океанов в архейское время. В настоящее время общепризнано, что микробное (т. е. ферментативное) окисление  $Fe^{+2}$ , вероятно, было ключевым процессом в осаждении многих BIF. Благодаря изучению систем стабильных изотопов (Fe, Cr, U, Mo, Cu) и применению изотопного анализа *in situ* стало возможным проводить корреляции с минеральным парагенезисом.

Отложение BIF вряд ли могло представлять собой фоновое морское осаждение. Мощный гидротермальный приток железа в сочетании с низким вкладом материала континентального сноса часто был ключевым фактором, приводившим к образованию BIF, а не более типичных морских отложений. За геологической историей BIF стоит сложный набор факторов, включая эволюцию подводных гидротермальных систем, а не просто глубоководная окислительно-восстановительная эволюция (т. е. насыщение океана кислородом), как это считалось ранее.

*Автор благодарит А. И. Слабунова за ценные советы и фотографии полосчатых железистых кварцитов, а также рецензентов за замечания, которые позволили улучшить статью.*

## Литература

- Веливецкая Т. А., Игнатъев А. В., Высоцкий С. В., Асеева А. В. Изотопные отношения серы ( $^{32}S$ ,  $^{33}S$ ,  $^{34}S$ ,  $^{36}S$ ) в архейских породах Карелии – доказательство микробильной жизни и бескислородной атмосферы // Геология и геофизика. 2024. № 6. С. 792–804. doi: 10.15372/GiG2023182
- Высоцкий С. В., Ханчук А. И., Веливецкая Т. А., Игнатъев А. В., Асеева А. В., Нестерова Н. С. Источники изотопов серы в сульфидах неархейских железорудных месторождений Костомукшского зеленокаменного пояса Карелии (Россия) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 2. С. 142–148. doi: 10.31857/S2686739722602988
- Высоцкий С. В., Ханчук А. И., Веливецкая Т. А., Игнатъев А. В., Асеева А. В., Нестерова Н. С., Карпенко А. А., Руслан А. В. Новые доказательства органического происхождения углеродистого вещества в архейских железистых кварцитах Костомукшского зеленокаменного пояса Карелии, Россия // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 514, № 2. С. 263–269. doi: 10.31857/S2686739724020091
- Ильин А. В. Неопротерозойские железистые кварциты // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 1. С. 87–95.
- Савко К. А., Гончаров Д. А., Нестерова Н. С., Слабунов А. И. Полосчатые железистые кварциты главной рудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона: геохимия, петрография и условия формирования // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2024. № 2. С. 50–70. doi: 10.17308/geology/1609-0691/2024/2/50-70
- Савко К. А., Базилов Н. С., Артеменко Г. В. Геохимическая эволюция железисто-кремнистых формаций Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии: источники вещества и геохронологические ограничения // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2015. Т. 23, № 5. С. 3–21. doi: 10.7868/S0869592X15050063
- Савко К. А., Самсонов А. В., Холин В. М., Базилов Н. С. Мегаблок Сарматия как осколок суперкратона Ваалбара: корреляция геологических событий на границе архея и палеопротерозоя // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2017. Т. 25, № 2. С. 3–26. doi: 10.7868/S0869592X17020065
- Слабунов А. И. Геология и геодинамика ранней Земли: основные проблемы и пути решения // Современные проблемы наук о Земле: Тезисы докл. Всероссийской научной конференции. М.: РАН, 2022. С. 62–63.
- 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
- Слабунов А. И., Кервинен А. В., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Максимов О. А., Медведев П. В. Полихронная история формирования неархейских полосчатых железистых кварцитов главной рудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса: возраст цирконов и акцессорные минералы // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 139–143. doi: 10.17076/geo1666
- 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
- Alfimova N., Raza M. B., Felitsyn S., Matrenichev V., Bogomolov E., Nasipuri P., Saha L., Pati J. K., Kumar V. Isotopic Sm-Nd signatures of Precambrian banded iron formation from the Fennoscandian Shield, East-European Platform, and Bundelkhand Craton, India // Precamb. Res. 2019. Vol. 328. P. 1–8. doi: 10.1016/j.precambres.2019.04.008
- Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations // Encyclopedia of Geology (2<sup>nd</sup> ed.) / Eds. D. Alderton, S. A. Elias. Oxford: Academic Press, 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5
- Bekker A., Planavsky N. J., Krapež B., Rasmussen B., Hofmann A., Slack J., Rouxel O., Konhauser K. Iron formations: Their origins and implications for ancient

seawater chemistry // *Treatise on Geochemistry* (2<sup>nd</sup> ed.) / Eds. H. D. Holland, K. K. Turekian. Oxford: Elsevier, 2014. P. 561–628. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00719-1

Cloud P. E. Significance of Gunflint (Precambrian) microflora // *Science*. 1965. Vol. 148. P. 27–35.

Cloud P. Paleoeological significance of banded iron formation // *Econ. Geol.* 1973. Vol. 68. P. 1135–1143.

Dodd M. S., Papineau D., She Zh.-B., Manikyamba Ch., Wanf Y.-Sh., O'Neilg J., Karhu J. A., Rizo H., Pirajno F. Widespread occurrences of variably crystalline <sup>13</sup>C-depleted graphitic carbon in banded iron formations // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2019. Vol. 512. P. 163–174. doi:10.1016/j.epsl.2019.01.054

Halevy I., Alesker M., Schuster E.M., Popovitz-Biro R., Feldman Y. A key role for green rust in the Precambrian oceans and the genesis of iron formations // *Nature Geoscience*. 2017. Vol. 10. P. 135–139. doi: 10.1038/ngeo2878

Johnson C. M., Ludois J. M., Beard B. L., Beukes N. J., Heimann A. Iron formation carbonates: Paleooceanographic proxy or recorder of microbial diagenesis? // *Geology*. 2013. Vol. 41. P. 1147–1150. doi: 10.1130/G34698.1

Johnson C. M., Zheng X.-Y., Djokic T., Van Kranendonk M. J., Czaja A. D., Roden E. E., Beard B. L. Early Archean biogeochemical iron cycling and nutrient availability: New insights from a 3.5 Ga land-sea transition // *Earth-Sci. Rev.* 2022. Vol. 228. Art. 103992. doi: 10.1016/j.earscirev.2022.103992

Klein C. Some Precambrian banded iron formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin // *Am. Mineral.* 2005. Vol. 90. P. 1473–1499. doi: 10.2138/am.2005.1871

Konhauser K. O., Planavsky N. J., Hardisty D. S., Robbins L., Warchola T., Haugaard R., Lalonde S., Parth C., Oonk P., Tsikos H., Lyons T., Bekker A., Johnson C. Iron formations: A global record of Neoproterozoic to Palaeoproterozoic environmental history // *Earth-Sci. Rev.* 2017. Vol. 172. P. 140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Konhauser K. O., Robbins L. J., Alessi D. S., Flynn Sh. L., Gingras M. K., Martinez R. E., Kappler A., Swanner E. D., Li Y.-L., Crowe S. A., Planavsky N. J., Reinhard Ch. T., Lalonde S. V. Phytoplankton contributions to the trace-element composition of Precambrian banded iron formations // *GSA Bulletin*. 2018. Vol. 130, no. 5–6. P. 941–951. doi: 10.1130/B31648.1

Lept K., Addad A., Knoll A. H., Wang J., Troadec D., Beche A., Javaux E. J. Iron minerals within specific microfossil morphospecies of the 1.88Ga Gunflint Formation // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8(1). P. 14890. doi: 10.1038/ncomms14890

Mänd K., Robbins L., Planavsky N., Bekker A., Konhauser K. Iron formations as palaeoenvironmental archives (elements in geochemical tracers in Earth system science). Cambridge: Cambridge Univer. Press, 2022. 44 p. doi: 10.1017/9781108993791

Percak-Dennett L., Roden E.E., Beard B. L., Johnson C. M. Iron isotope fractionation during dissimilatory iron reduction under simulated Archean conditions // *Geobiology*. 2011. Vol. 9. P. 205–220. doi: 10.1111/j.1472-4669.2011.00277.x

Planavsky N., Rouxel O., Bekker A., Shapiro R., Fralick P., Knudsen A. Iron-oxidizing microbial ecosystems thrived in late Paleoproterozoic redox-stratified oceans // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. Vol. 286(1–2). P. 230–242. doi: 10.1016/j.epsl.2009.06.033

Rasmussen B., Krapež B., Muhling J. R., Suvorova A. Precipitation of iron silicate nanoparticles in early Precambrian oceans marks Earth's first iron age // *Geology*. 2015. Vol. 43(4). P. 303–306. doi: 10.1130/G36309.1

Rasmussen B., Muhling J. R., Suvorova A., Krapež B. Greenalite precipitation linked to the deposition of banded iron formations downslope from a late Archean carbonate platform // *Precamb. Res.* 2017. Vol. 290. P. 49–62. doi: 10.1016/j.precamres.2016.12.005

Savko K. A., Samsonov A. V., Santosh M., Ovchinnikova M. Y. Neoproterozoic-Palaeoproterozoic sedimentary basins in the Sarmatian Craton: Global correlations and connections // *Geol. J.* 2021. Vol. 56, no. 9. P. 4479–4498. doi: 10.1002/gj.4185

Simonson B. M. Origin and evolution of large Precambrian iron formations // *Extreme Depositional Environments: Mega End Members in Geologic Time*. Geological Society of America Special Paper. 2003. Vol. 370. P. 231–244. doi: 10.1130/0-8137-2370-1.231

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 // *Precamb. Res.* 2024a. Vol. 401. Art. 107254. doi: 10.1016/j.precamres.2023.107254

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.* 2024b. Vol. 66, no. 6. P. 1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Maksimov O. A. Geochemistry and formation conditions of Mesoproterozoic banded iron formations (BIF-1) from the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton // *Geochemistry International*. 2024c. Vol. 62, no. 3. P. 245–266. doi: 10.1134/S0016702924030054

Stern R. J., Mukherjee S. K., Miller N. R., Ali K., Johnson P. R. ~750 Ma banded iron formation from the Arabian-Nubian Shield – Implications for understanding Neoproterozoic tectonics, volcanism, and climate change // *Precamb. Res.* 2013. Vol. 239. P. 79–94. doi: 10.1016/j.precamres.2013.07.015

Zheng X.-Y., Beard B. L., Reddy T. R., Roden E. E., Johnson C. M. Abiologic silicon isotope fractionation between aqueous Si and Fe(III)-Si gel in simulated Archean sea water: Implications for Si isotope records in Precambrian sedimentary rocks // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2016. Vol. 187. P. 102–122. doi: 10.1016/j.gca.2016.05.012

## References

Alfimova N., Raza M. B., Felitsyn S., Matrenichev V., Bogomolov E., Nasipuri P., Saha L., Pati J. K., Kumar V. Isotopic Sm-Nd signatures of Precambrian banded iron formation from the Fennoscandian Shield, East-

European Platform, and Bundelkhand Craton, India. *Precambr. Res.* 2019;328:1–8. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.008

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations. Alderton D., Elias S. A. (eds.). *Encyclopedia of Geology* (2<sup>nd</sup> ed.). Oxford: Academic Press; 2021. P.914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5

Bekker A., Planavsky N. J., Krapež B., Rasmussen B., Hofmann A., Slack J., Rouxel O., Konhauser K. Iron formations: Their origins and implications for ancient seawater chemistry. Holland H. D., Turekian K. K. (eds.). *Treatise on Geochemistry* (2<sup>nd</sup> ed.). Oxford: Elsevier; 2014. P. 561–628. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00719-1

Cloud P. E. Significance of Gunflint (Precambrian) microflora. *Science.* 1965;148:27–35.

Cloud P. Paleogeological significance of banded iron formation. *Econ. Geol.* 1973;68:1135–1143.

Dodd M. S., Papineau D., She Zh.-B., Manikyamba Ch., Wanf Y.-Sh., O'Neilg J., Karhu J. A., Rizo H., Pirajno F. Widespread occurrences of variably crystalline <sup>13</sup>C-depleted graphitic carbon in banded iron formations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2019;512:163–174. doi: 10.1016/j.epsl.2019.01.054

Halevy I., Alesker M., Schuster E. M., Popovitz-Biro R., Feldman Y. A key role for green rust in the Precambrian oceans and the genesis of iron formations. *Nature Geosci.* 2017;10:135–139. doi: 10.1038/ngeo2878

Johnson C. M., Ludois J. M., Beard B. L., Beukes N. J., Heimann A. Iron formation carbonates: Paleooceanographic proxy or recorder of microbial diagenesis? *Geology.* 2013;41:1147–1150. doi: 10.1130/G34698.1

Johnson C. M., Zheng X.-Y., Djokic T., Van Kranendonk M. J., Czaja A. D., Roden E. E., Beard B. L. Early Archean biogeochemical iron cycling and nutrient availability: New insights from a 3.5 Ga land-sea transition. *Earth-Sci. Rev.* 2022;228:103992. doi: 10.1016/j.earscirev.2022.103992

Ilyin A. V. Neoproterozoic banded iron formations. *Lithology and Mineral Resources.* 2009;44(1):78–86. doi: 10.1134/S0024490209010064

Klein C. Some Precambrian banded iron formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *Am. Mineral.* 2005;90:1473–1499. doi: 10.2138/am.2005.1871

Konhauser K. O., Planavsky N. J., Hardisty D. S., Robbins L., Warchola T., Haugaard R., Lalonde S., Partin C., Oonk P., Tsikos H., Lyons T., Bekker A., Johnson C. Iron formations: A global record of Neoarchean to Palaeoproterozoic environmental history. *Earth-Sci. Rev.* 2017;172:140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Konhauser K. O., Robbins L. J., Alessi D. S., Flynn Sh. L., Gingras M. K., Martinez R. E., Kappler A., Swanner E. D., Li Y.-L., Crowe S. A., Planavsky N. J., Reinhard Ch. T., Lalonde S. V. Phytoplankton contributions to the trace-element composition of Precambrian banded iron formations. *GSA Bulletin.* 2018;130(5–6): 941–951. doi: 10.1130/B31648.1

Leptot K., Addad A., Knoll A. H., Wang J., Troadec D., Beche A., Javaux E. J. Iron minerals within specific microfossil morphospecies of the 1.88 Ga Gunflint Formation. *Nature Communications.* 2017;8(1):14890. doi: 10.1038/ncomms14890

Mänd K., Robbins L., Planavsky N., Bekker A., Konhauser K. Iron formations as palaeoenvironmental archives (elements in geochemical tracers in Earth system science). Cambridge: Cambridge Univer. Press; 2022. 44 p. doi: 10.1017/9781108993791

Percak-Dennett L., Roden E. E., Beard B. L., Johnson C. M. Iron isotope fractionation during dissimilatory iron reduction under simulated Archean conditions. *Geobiology.* 2011;9:205–220. doi: 10.1111/j.1472-4669.2011.00277.x

Planavsky N., Rouxel O., Bekker A., Shapiro R., Fralick P., Knudsen A. Iron-oxidizing microbial ecosystems thrived in late Paleoproterozoic redox-stratified oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009;286(1–2):230–242. doi: 10.1016/j.epsl.2009.06.033

Rasmussen B., Krapež B., Muhling J. R., Suvorova A. Precipitation of iron silicate nanoparticles in early Precambrian oceans marks Earth's first iron age. *Geology.* 2015;43(4):303–306. doi: 10.1130/G36309.1

Rasmussen B., Muhling J. R., Suvorova A., Krapež B. Greenalite precipitation linked to the deposition of banded iron formations downslope from a late Archean carbonate platform. *Precambr. Res.* 2017;290:49–62. doi: 10.1016/j.precamres.2016.12.005

Savko K. A., Goncharov D. A., Nesterova N. S., Slabunov A. I. Banded iron formations of the main ore sequence of the Kostomuksha Greenstone Belt of the Karelian Craton: Geochemistry, petrography and formation conditions. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya = Proceed. Voronezh State University. Series: Geology.* 2024;2:50–70. (In Russ.). doi: 10.17308/geology/1609-0691/2024/2/50-70

Savko K. A., Bazikov N. S., Artemenko G. V. Geochemical evolution of the banded iron formations of the Voronezh Crystalline Massif in the early Precambrian: sources of matter and geochronological constraints. *Stratigraphy and Geological Correlation.* 2015;23(5): 451–467. doi: 10.1134/S0869593815050068

Savko K. A., Samsonov A. V., Kholin V. M., Bazikov N. S. The Sarmatia megablock as a fragment of the Vaalbara supercontinent: correlation of geological events at the Archean-Palaeoproterozoic transition. *Stratigraphy and Geological Correlation.* 2017;25(2):123–145. doi: 10.1134/S0869593817020058

Savko K. A., Samsonov A. V., Santosh M., Ovchinnikova M. Y. Neoarchean-Palaeoproterozoic sedimentary basins in the Sarmatian Craton: Global correlations and connections. *Geol. J.* 2021;56(9):4479–4498. doi: 10.1002/gj.4185

Simonson B. M. Origin and evolution of large Precambrian iron formations. *Extreme Depositional Environments: Mega End Members in Geologic Time. Geological Society of America Special Paper.* 2003;370: 231–244. doi: 10.1130/0-8137-2370-1.231

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the Early Earth: Main problems and solutions. *Sovr. problemy nauk o Zemle: Tezisy dokl. Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii = Modern problems of Earth sciences: Proceed. All-Russ. scientific conf.* Moscow: RAN; 2022. P. 62–63. (In Russ.)

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. *Precamb. Res.* 2024;401:107254. doi: 10.1016/j.precamres.2023.107254

Slabunov A. I., Isachenko A. A. Litho geochemistry of the Shurlovaara banded iron formation, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Russia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of 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. Polychronous evolution of Neoproterozoic banded iron formation in the main ore sequence of the Kostomuksha Greenstone Belt: The age of zircons and accessory minerals. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2022;5:139–143. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1666

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

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. *Geochemistry Int.* 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Maksimov O. A. Geochemistry and formation conditions of Mesoproterozoic banded iron formations (BIF-1) from the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton. *Geochemistry Int.* 2024;62(3):245–266. doi: 10.1134/S0016702924030054

Stern R. J., Mukherjee S. K., Miller N. R., Ali K., Johnson P. R. ~750 Ma banded iron formation from the Arabian-Nubian Shield – Implications for understanding Neoproterozoic tectonics, volcanism, and climate change. *Precamb. Res.* 2013;239:79–94. doi: 10.1016/j.precamres.2013.07.015

Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Vysotskiy S. V., Aseeva A. V. Isotopic ratios of sulfur (<sup>32</sup>S, <sup>33</sup>S, <sup>34</sup>S, <sup>36</sup>S) in the Archean rocks of Karelia: evidence for microbial life in the anoxic atmosphere. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics.* 2024;6:792–804. (In Russ.). doi: 10.15372/GIG2023182

Vysotskiy S. V., Khanchuk A. I., Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Aseeva A. V., Nesterova N. S., Karpenko A. A., Ruslan A. V. New evidence of the organic origin of carbonaceous matter in Archean banded iron formation of the Kostomuksha Greenstone Belt of Karelia, Russia. *Doklady Earth Sciences.* 2024;514:281–286. doi: 10.1134/S1028334X23602730

Vysotskiy S. V., Khanchuk A. I., Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Aseeva A. V., Nesterova N. S. Sulfur isotope sources of sulfides of Neoproterozoic iron deposits of the Kostomuksha Greenstone Belt of Karelia, Russia. *Doklady Earth Sciences.* 2023;510(2):394–399. doi: 10.1134/S1028334X23600299

Zheng X.-Y., Beard B. L., Reddy T. R., Roden E. E., Johnson C. M. Abiogenic silicon isotope fractionation between aqueous Si and Fe(III)-Si gel in simulated Archean sea water: Implications for Si isotope records in Precambrian sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2016;187:102–122. doi: 10.1016/j.gca.2016.05.012

Поступила в редакцию / received: 22.08.2024; принята к публикации / accepted: 23.09.2024.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Медведев Павел Владимирович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия ИГ КарНЦ РАН; доцент кафедры наук о Земле и геотехнологий ПетрГУ

e-mail: pmedved@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTOR:

### Medvedev, Pavel

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, IG KarRC RAS; Associate Professor, PetrSU

УДК 552.2 + 550.42 : 551.71 (470.22)

## ЛИТОГЕОХИМИЯ ПОЛОСЧАТЫХ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ШУРЛОВААРСКОЙ СВИТЫ КОСТОМУКШСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА (КАРЕЛЬСКИЙ КРАТОН)

**А. И. Слабунов\***, **А. А. Исаченко**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), \*slabunov@krc.karelia.ru  
Петрозаводский государственный университет (пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

Изучен образец мезоархейских полосчатых железистых кварцитов (BIF) шурловаарской свиты Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона. Порода состоит из слоев трех типов: обогащенных железом (магнетитовые кварциты), обогащенных кремнеземом (кварциты) и состоящих из хлорит-амфиболового сланца. В BIF установлена осадочная цикличность: цикл начинается со сланцев, которые сменяются магнетитовыми кварцитами, и завершается кварцитами. Минеральный и химический состав прослоев каждого типа имеет характерные особенности. Кварц является главным породообразующим минералом кварцитов. В этой породе в качестве аксессуарных присутствуют магнетит, хлорит, карбонат, пирит, апатит, амфибол. Порода обеднена всеми малыми и редкими элементами, кроме Ba, Rb и As. Для нее характерно обеднение легкими РЗЭ и наличие слабой положительной Eu-аномалии. Магнетитовые кварциты состоят преимущественно из кварца, магнетита и хлорита. В качестве второстепенного минерала присутствует амфибол, рудного – пирит, аксессуарного – апатит. Породы являются главным концентратором V и Ga, они существенно обеднены легкими РЗЭ, в них четко выражена положительная Eu-аномалия. Хлорит-амфиболовые сланцы сложены кварцем, хлоритом и амфиболом, в качестве второстепенных минералов отмечены пирит, магнетит, титаномагнетит, а среди аксессуарных – апатит, циркон. Хлорит-амфиболовые сланцы обогащены по сравнению с другими породами BIF практически всеми малыми и редкими элементами. РЗЭ в сланцах обогащены тяжелыми РЗЭ, в них наиболее контрастно выражена положительная Eu-аномалия. Хлорит-амфиболовые сланцы моделируются как смесь из продуктов разрушения коматиит-базальтовых и кислых вулканитов контоксской серии с добавкой железо-кремнистого субстрата.

Ключевые слова: полосчатые железистые кварциты; мезоархей; геохимия; петрография; зеленокаменный пояс; Карельский кратон; Костомукшская структура

Для цитирования: 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

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-17-00026).

**A. I. Slabunov\*, A. A. Isachenko. LITHOGEOCHEMISTRY OF THE SHURLOVAARA BANDED IRON FORMATION, KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT, KARELIAN CRATON, RUSSIA**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*slabunov@krc.karelia.ru  
Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

A sample of a Mesoarchean banded iron formation (BIF) from the Shurlovaara formation was studied. It consists of three types of layers: an iron-enriched (magnetite quartzite) type, a silica-enriched type (quartzites), and a type consisting of chlorite-amphibole schist. The BIF displays a sedimentary cyclicity: a cycle begins with schists, which are followed by magnetite quartzites, and then by quartzites. The mineral and chemical composition of minibeds of each type has its own distinctive features. The quartzites consist of quartz with accessory magnetite, chlorite, carbonate, pyrite, apatite and amphibole impurities. They are depleted in all minor and trace elements, except for Ba, Rb and As. REE are characterized by depletion in LREE and the presence of a poorly-defined positive Eu-anomaly. The magnetite quartzites consist mainly of magnetite, quartz and chlorite with amphibole, apatite and pyrite impurities. The rocks of these minibeds are a major concentrator of V and Ga. They are considerably depleted in LREE and clearly show a positive Eu-anomaly. The chlorite-amphibole schists are made up of quartz, chlorite and amphibole; pyrite, magnetite, titanomagnetite, apatite and zircon are present as secondary and accessory elements. The schists are richer in practically all minor and trace elements than other rocks of the minibeds. REE in the schists are enriched in HREE, and their positive Eu-anomaly is the most defined. The chlorite-amphibole schists are modelled as a mixture of the destruction products of Kontokki komatiite-basaltic and felsic volcanics with addition of iron-silica substrate.

**Keywords:** banded iron formation; Mesoarchean; geochemistry; petrography; greenstone belt; Karelian Craton; Kostomuksha belt

For citation: Slabunov A. I., Isachenko A. A. Lithogeochemistry of the Shurlovaara banded iron formation, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Russia. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 6. P. 30–50. doi: 10.17076/geo1950

**Funding.** The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (grant 22-17-00026).

## **Введение**

Полосчатые железистые кварциты (banded iron formation – BIF), известны также как джеспилиты, железистые роговики, породы железо-кремнистой формации, итабириты, такониты, – это метаморфизованные хемогенно-осадочные породы, образовавшиеся в хадей-неопротерозойское (4,1–0,75 млрд лет) время. BIF богаты железом ( $Fe_2O_3^T = 21–58$  мас.%) и кремнеземом ( $SiO_2 = 40–60$  мас.%) [Bekker et al., 2010].

BIF, ассоциирующие с вулканитами, широко развиты в архейских зеленокаменных поясах и выделяются как тип Алгома [Gross, 1980]. К нему относятся, в частности, BIF-содержащие комплексы Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона [Горьковец и др., 1981; Слабунов и др., 2021; Slabunov et al., 2024c], Йеллоунайф кратона

Слейв [Haugard et al., 2016, 2017; Исаченко, 2023], Центрально-Бунделкхандского Бунделкхандского кратона [Singh, Slabunov, 2015; Slabunov et al., 2024a].

Характерной чертой BIF является чередование железистых (магнетит, гематит, сидерит) и кремнистых/карбонатных (кварц, яшма, доломит и анкерит) прослоев, образующих слои мощностью от нескольких микронов до нескольких метров [Posth et al., 2011; Konhauser et al., 2017; Bekker, Kovalick, 2021]. В BIF шурловаарской свиты в северо-западной части Костомукшского зеленокаменного пояса (рис. 1) установлены [Слабунов и др., 2023б] разности, в которых наряду со слоями, обогащенными железом и кремнеземом, выделяются слои сланцев. Данная статья посвящена рассмотрению результатов изучения петрографии и геохимии (литогеохимии) трех типов прослоев в этих BIF.

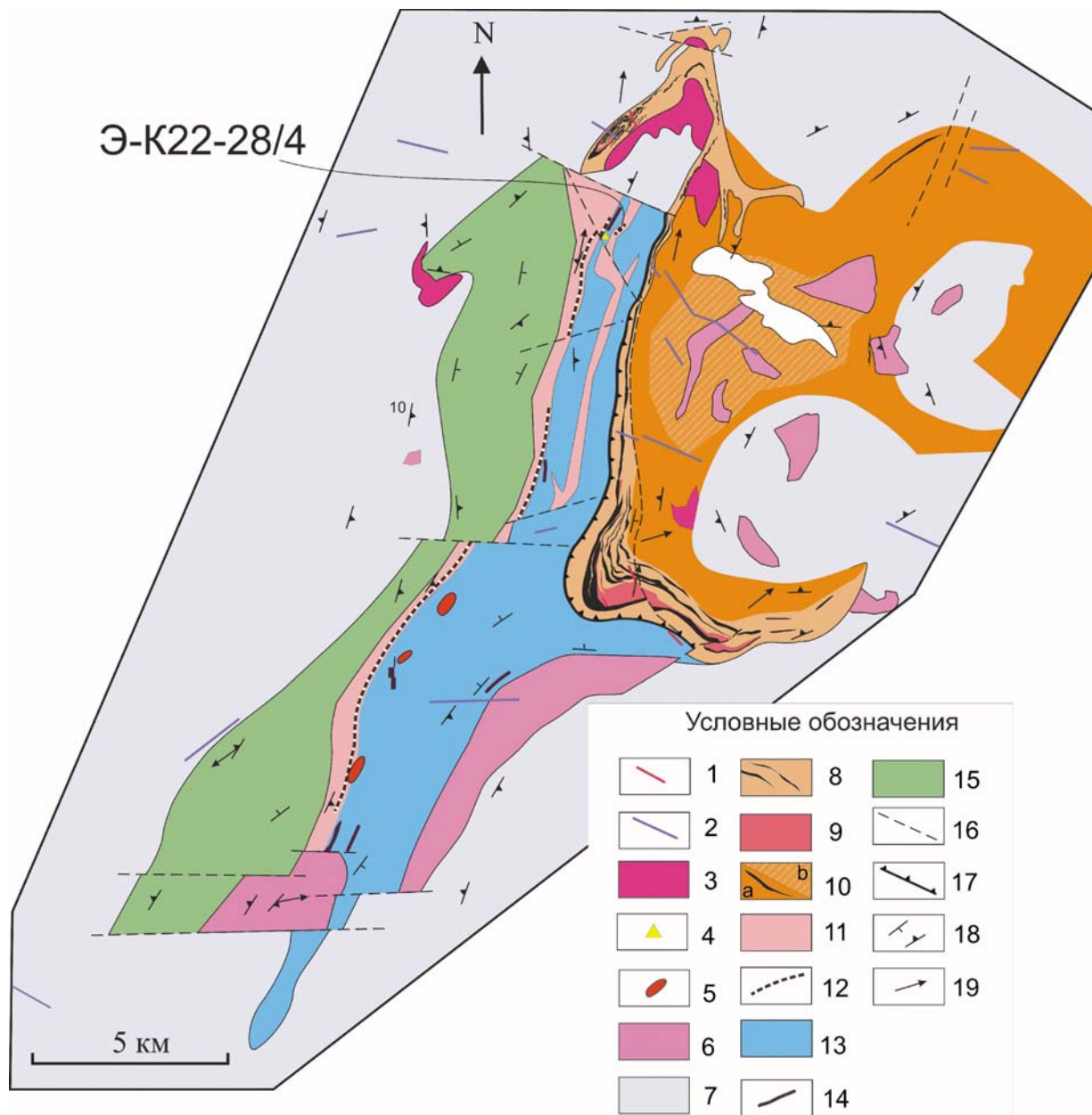


Рис. 1. Схема геологического строения Костомукшского зеленокаменного пояса [Лазарев, 1971; Горьковец и др., 1991; Кулешевич, Фурман, 2009; Мудрук и др., 2024; Слабунов и др., в печати; Slabunov et al., 2024b, c с дополнениями] и место отбора пробы Э-K22-28/4:

1 – неопротерозойские (1,2 млрд лет) лампроиты и кимберлиты; 2 – палеопротерозойские (2,40 и 2,14 млрд лет) долериты; 3–9 – неоархейские: 3 – 2,68 млрд лет граниты, 4 – 2,71 млрд лет полимиктовые конгломераты, 5 – 2,71 млрд лет санукитоиды, 6 – 2,72 млрд лет граниты, 7 – 2,8–2,75 млрд лет гранитоиды ТТГ ассоциации, 8–10 – породы гимольской серии: 8 – 2,76–2,74 млрд лет метаграувакки с прослоями BIF-3, 9 – 2,76–2,74 млрд лет силлы и дайки метариолитов (геллефлинты), 10 – метасадки сурлампинской свиты с прослоями BIF: а – слабо и б – сильно мигматизированные; 11–14 – мезоархейские (2,87–2,78 млрд лет): 11 – туфы, туффиты риолитов (шурловаарская свита), 12 – прослой BIF-2, 13 – коматиит-базальтовый с дацитам комплекс (рувинваарская свита), 14 – прослой BIF-1; 15 – базальты и коматииты (ниемиярвинская свита); 16 – разломы; 17 – надвиг; 18–19 – элементы залегания: 18 – полосчатости и гнейсовидности, 19 – минеральной линейности

Fig. 1. Geological scheme of the Kostomuksha Greenstone Belt [modified after Lazarev, 1971; Gor'kovets et al., 1991; Kuleshevich, Furman, 2009; Mudruk et al., 2024; Slabunov et al., in press, 2024b, c] and sample E-K22-28/4 location:

1 – Neoproterozoic (1.2 Ga) lamproites and kimberlites; 2 – Paleoproterozoic (2.40 and 2.14 Ga) dolerites; 3–9 – Neoproterozoic complexes: 3 – 2.86 Ga granites, 4 – 2.71 Ga polymictic conglomerate, 5 – 2.71 Ga sanukitoids, 6 – 2.72 Ga granites, 7 – 2.78 Ga TTG granitoids, 8–10 – Gimoly Group: 8 – 2.76–2.74 Ga metagraywackes with BIF-3 intercalations, 9 – 2.76–2.74 Ga sills and dikes of metarhyolites (hallelinta), 10 – metasediments of the Surlampi Formation with BIF intercalations: (a) weakly and (b) highly migmatized; 11–14 – Mesoarchean (2.84–2.78 Ga) complexes: 11 – rhyolite tuffs and tuffites (Shurlovaara Formation), 12 – BIF-2 interlayer, 13 – komatiite-basalt complex intercalated with dacites (Ruvinvaa Formation), 14 – BIF-1 interlayer; 15 – basalts and komatiites (Niemiyaarvi Formation); 16 – faults; 17 – overthrusts; 18 – dip and strike of banding and gneissosity, 19 – dip and strike of mineral lineation



## Геологический очерк

Костомукшский зеленокаменный пояс (КЗП) (рис. 1) расположен в центральной части Карельского кратона Фенноскандинавского щита [Слабунов и др., 2006, 2022б; Hölfta et al., 2014; Куликов и др., 2017] и вмещает крупнейшее на Северо-Западе России месторождение железа [Костомукшский..., 2015].

Стратотектонический разрез КЗП включает три стратотектонические ассоциации (СТА): контоксскую, гимольскую [Кожевников и др., 2006; Костомукшский..., 2015] и неоархейских конгломератов [Слабунов и др., 2023а, в печати; Мудрук и др., 2024]. Мощность разреза зеленокаменного комплекса оценивается до 5,5 км [Чернов, 1964; Горьковец и др., 1981]. В составе контоксской СТА традиционно выделяют три свиты (рис. 1): ниemiaрвинскую (мощностью 200–1300 м), сложенную метаморфизованными толеитовыми базальтами с редкими прослоями коматиитов и магнетитовых кварцитов (BIF-1); шурловаарскую (мощностью до 600 м), представленную туфами, туффитами риолитов – риодацитов (редко до андезитов) с прослоями углеродистых сланцев и BIF-2 [Горьковец и др., 1981; Костомукшский..., 2015; Slabunov et al., 2020], которые рассматриваются в настоящей работе; рувинваарскую (мощностью до 1300 м), сложенную метабазальтами и коматиитами с кислыми дифференциатами, а также с прослоями сланцев и BIF-1 [Горьковец и др., 1981; Вревский, 2022; Slabunov et al., 2024b, c]. Возраст (риолит)-базальт-коматиитовой толщи с BIF-1 контоксской СТА оценивается в 2,87–2,84 млрд лет [Puchtel et al., 1998; Вревский, 2022; Slabunov et al., 2024c], а возраст кислых вулканитов и BIF-2 шурловаарской свиты – в 2,81–2,78 млрд лет [Puchtel et al., 1998; Лобач-Жученко и др., 2000; Мыскова и др., 2020; Slabunov et al., 2024b].

Гимольская СТА, мощность которой широко варьирует (180–2300 м), сложена метаосадками и вулканитами в чередовании с BIF-3 [Чернов, 1964; Горьковец и др., 1981, 1991; Савко и др., 2024]. Возраст толщи оценивается как неоархейский (2,76–2,74 млрд лет) [Слабунов и др., 2021; Slabunov et al., 2024b].

СТА неоархейских (2,71 млрд лет) полимиктовых конгломератов (рис. 1) – самая молодая толща осадочных пород в составе рассматриваемого зеленокаменного комплекса [Слабунов и др., в печати]. Конгломераты содержат обломки пород контоксской и гимольской СТА, сильно деформированы [Мудрук и др., 2024] и формировались, по-видимому, в пулл-апарт структуре.

Зеленокаменный пояс окружают неоархейские (2,78–2,75 млрд лет [Бибикова и др., 2005])

гранитоиды тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации, а также он сечется несколькими генерациями гранитов, гранодиоритами, дайками габброидов и лампроитов, кимберлитами [Slabunov et al., 2024b и ссылки в ней] (рис. 1).

Зеленокаменный комплекс КЗП метаморфизован в условиях эпидот-амфиболитовой – амфиболитовой фации в неоархее (события 2,72 и 2,69 млрд лет), а также при более низких параметрах в палеопротерозое (события 2,42 и 1,89 млрд лет) [Горьковец и др., 1991; Слабунов и др., 2022а, 2023а; Slabunov et al., 2024b, c].

## Методы исследований

Для изучения послойного строения BIF использован выпиленный из обнажения объемный образец размером 25×6,5×4,5 см. По результатам обработки фотографий данного образца была создана его 3D цифровая модель (рис. 2, а, б), которая использовалась при анализе слоистого строения. На ее основе были различным цветом промаркированы слои различного состава (рис. 2, в). Цифровая модель позволила наметить точки для последующего изучения минерального и химического состава отдельных слоев породы. Отбор проб из отдельных слоев проводился с помощью алмазной кольцевой коронки диаметром 8 мм, установленной на сверлильном станке. В результате отобранные образцы представляют собой керн длиной 15–30 мм и диаметром 5–6 мм. Более объемные пробы (рис. 2, пробы 5А, 6, 8В) выпиливались с помощью алмазного мини-диска и в дальнейшем использовались для химического анализа петрогенных окислов по классической методике.

Всего было отобрано 37 образцов керна. Каждый образец после извлечения и коронка, использовавшаяся для его отбора, тщательно промывались в проточной воде и высушивались. Из каждого керна был отобран материал для химического анализа и изготовления аншлифов. Измельчение и истирание проб для анализов проводилось в яшмовой ступке до состояния мелкодисперсного порошка. По такой методике из керна сделано 26 образцов.

Из мини-керна, погруженного в эпоксидную смолу, были изготовлены 4 шайбы с 24 аншлифами (рис. 3), которые изучались на рудном микроскопе и на микрозонде.

Определение петрогенных окислов в породах (табл. 1) выполнено классическим методом химического силикатного анализа в Центре коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный

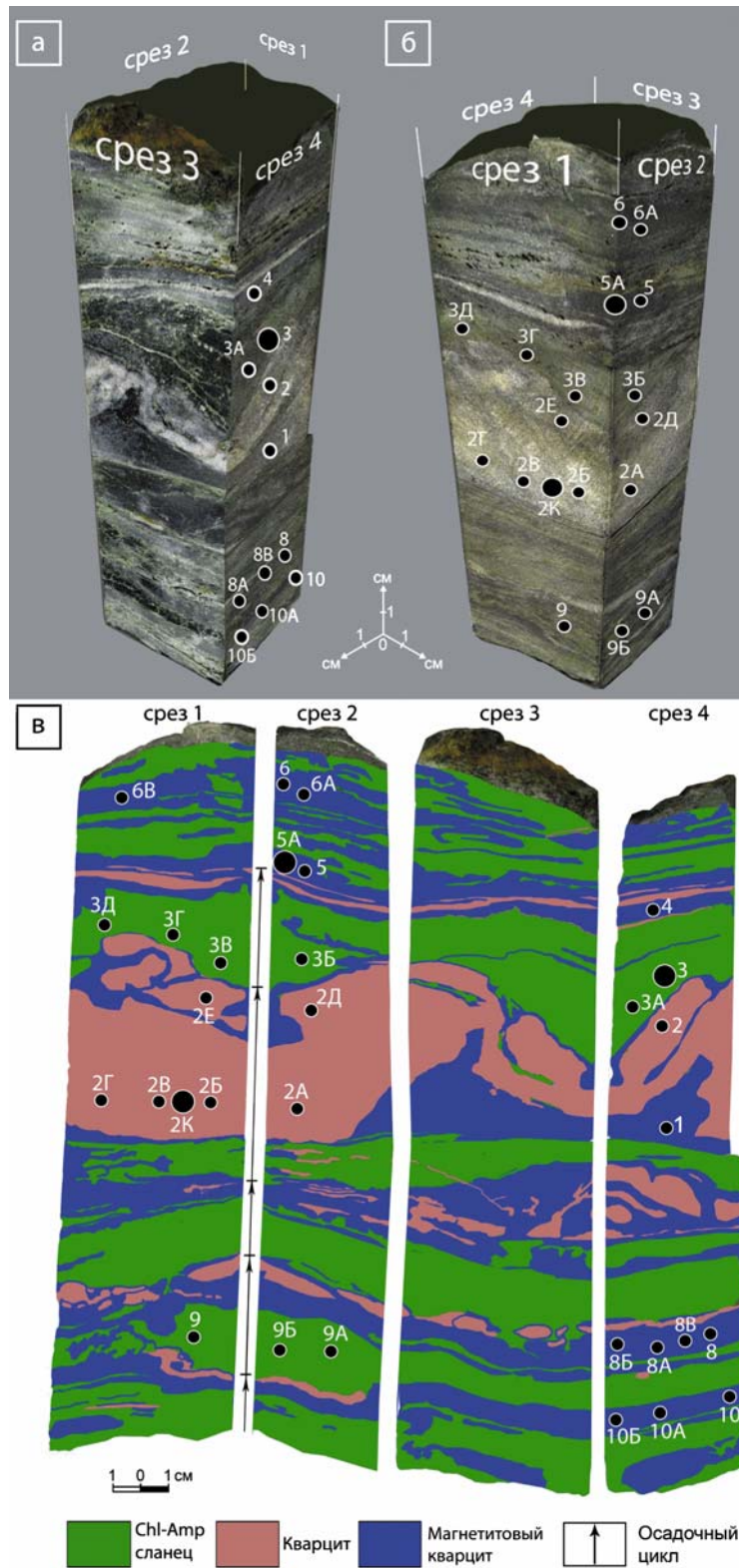


Рис. 2. 3D (а, б) и 2D по плоскостям среза 1–4 (в) модели образца BIF-2 Э-K22-28/4; окружности с черной заливкой и маркировкой (номера соответствуют таковым в табл. 1 и 2): мелкие – места отбора керн, крупные – спилы

Fig. 2. 3D (а, б) and 2D (в) model of BIF-2 sample E-K22-28/4 (along section planes 1–4); black filled circles with marking (numbers correspond to those in Tables 1 and 2): small circles – core sampling sites, large circles – sawing surfaces

центр Российской академии наук», в лаборатории ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск. Концентрации рассеянных и редкоземельных элементов в породах (табл. 2) измерены методом ICP -MS (X Series II, ThermoScientific) с растворением в автоклавах также в ИГ КарНЦ РАН

по методике, детально описанной в работе [Светов и др., 2023].

Изучение аншлифов проводилось на сканирующем микроскопе Vega II LSH с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350 в ИГ КарНЦ РАН.

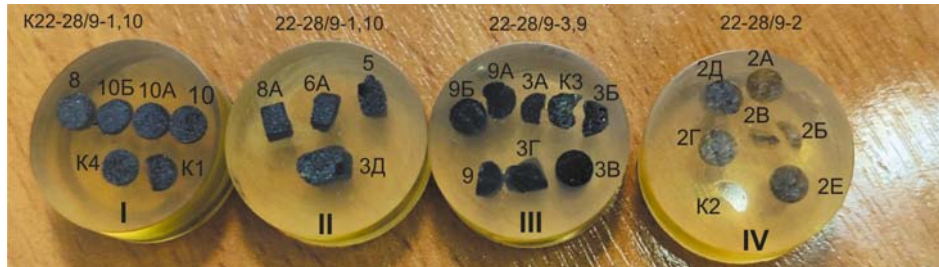


Рис. 3. Шайбы (диаметр 25 мм) аншлифов микрокернов из различных слоев BIF-2  
Fig. 3. Mounds (25 mm in diameter) of the polished sections of cores from the various layers of BIF-2

Таблица 1. Химический состав (окислы в мас. %) BIF (Э-К22-28/4), прослоев магнетитового кварцита (5А), кварцита (2К) и хлорит-амфиболового сланца (3) из BIF-2

Table 1. Chemical composition (oxides in wt %) BIF (E-K22-28/4) of magnetitic quartzite (5A), quartzite (2K) and chlorite-amphibole schist (3) interlayers from BIF-2

Автор. номер No.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	П.п.п. Р.	сумма total
Э-К22-28/4	54,44	0,27	4,54	13,33	19,4	0,071	3,66	0,28	0,14	0,02	0,09	0,06	3,47	99,77
5А	39,74	0,2	1,05	35,53	19,73	0,038	2,32	0,28	0,05	0,02	0,19	0,14	0,68	99,97
2К	97,34	0,01	0,26	0,65	1,15	0,04	0,13	0,07	0,01	0,02	0,03	0,03	0,15	99,89
3	47,68	0,37	10,01	9,31	13,85	0,14	11,17	1,56	0,26	0,04	0,39	0,54	4,5	99,82

Таблица 2. Химический состав (в г/т) слоев кварцитов (1–7), магнетитовых кварцитов (8–17) и хлорит-амфиболовых сланцев (15–26) из BIF-2

Table 2. Chemical composition (in ppm) of quartzite (1–7), magnetitic quartzite (8–17) and chlorite-amphibole schist (15–26) layers from BIF-2

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Автор. номер No.	2	2А	2Б	2В	2Г	2Д	2Е	5
Rb	0,058	1,365	2,886	2,534	2,272	2,266	2,949	0,928
Li	0,421	0,554	1,412	1,275	1,363	1,976	1,961	8,655
P	41,8	58,6	-	2,7	-	-	-	429,7
Sc	0,205	0,318	0,577	0,680	0,563	0,605	0,838	2,894
Ti	43,6	52,3	75,3	75,5	70,2	77,2	80,2	539,3
V	2,320	-	3,667	4,275	3,675	4,230	4,533	27,87
Cr	-	1,116	1,863	1,113	0,258	1,329	0,561	11,859
Mn	-	22,7	30,7	31,4	29,9	29,9	31,4	354,0
Co	-	0,327	0,452	0,370	0,303	0,473	0,554	3,961
Ni	-	0,726	1,226	0,978	2,080	1,394	1,103	15,736
Cu	-	0,193	2,043	1,972	1,630	1,856	2,948	1,062
Zn	2,510	4,189	4,187	3,409	3,006	3,745	4,042	22,196
Ga	0,853	0,535	0,811	0,730	0,744	0,777	0,969	8,452

Продолжение табл. 2  
Table 2 (continued)

As	4,785	-	10,190	9,699	11,717	4,746	5,658	-
Ag	-	-	0,004	0,006	0,007	0,022	0,005	0,021
Cd	-	0,016	0,021	0,017	0,021	0,009	0,034	0,022
Pb	1,221	1,205	5,068	3,668	1,410	2,843	2,414	0,634
Y	0,763	1,306	1,892	1,834	1,703	2,046	1,811	5,975
Zr	1,417	3,807	5,863	6,552	5,577	6,608	6,717	44,765
Nb	-	-	-	0,037	-	0,005	0,015	0,329
Hf	0,007	0,097	0,116	0,211	0,162	0,158	0,191	1,211
Ta	-	-	-	0,073	-	0,006	-	0,052
Be	-	0,324	-	-	-	-	-	0,085
Sr	2,132	3,804	4,714	5,438	3,642	5,122	4,920	5,230
Ba	1,025	22,816	34,799	34,318	29,759	32,788	41,690	16,231
La	0,604	0,589	0,868	0,864	0,844	1,134	2,945	3,203
Ce	1,420	1,408	1,996	2,196	2,081	2,609	7,091	5,524
Pr	0,162	0,185	0,271	0,284	0,259	0,352	0,947	0,570
Nd	0,833	0,982	1,085	1,302	1,181	1,695	4,192	2,291
Sm	0,162	0,258	0,342	0,351	0,395	0,375	0,845	0,457
Eu	0,056	0,071	0,065	0,095	0,089	0,115	0,247	0,167
Gd	0,167	0,255	0,322	0,369	0,332	0,435	0,736	0,677
Tb	0,025	0,037	0,044	0,055	0,052	0,054	0,086	0,137
Dy	0,116	0,291	0,367	0,304	0,333	0,362	0,419	0,974
Ho	0,031	0,049	0,070	0,075	0,055	0,075	0,069	0,227
Er	0,082	0,153	0,247	0,239	0,222	0,259	0,222	0,738
Tm	0,014	0,023	0,029	0,032	0,030	0,033	0,024	0,096
Yb	0,080	0,197	0,251	0,236	0,263	0,263	0,219	0,668
Lu	0,008	0,028	0,043	0,040	0,039	0,048	0,032	0,114
Th	0,130	0,065	0,225	0,171	0,158	0,202	0,326	1,013
U	0,057	0,071	0,061	0,072	0,062	0,088	0,165	0,291

№	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Автор. номер No.	5A	6	6A	8	8A	8B	10	10A	10Б
Rb	0,004	0,114	1,420	1,530	1,351	1,225	0,835	1,207	0,928
Li	1,622	1,812	1,956	2,122	2,066	1,100	2,810	6,615	2,623
P	215,2	463,8	323,2	260,2	259,2	276,3	301,8	772,6	312,0
Sc	0,764	1,498	2,019	0,846	0,899	0,809	0,549	3,452	0,707
Ti	674,8	637,6	627,0	670,3	617,2	570,9	1032,6	875,1	1012,4
V	33,05	37,05	37,06	43,72	38,67	35,86	44,09	25,31	33,32
Cr	-	-	9,739	6,383	5,736	6,516	5,739	11,892	7,945
Mn	328,8	363,9	241,3	215,2	213,1	203,5	266,8	348,3	275,4
Co	5,378	6,437	3,799	3,834	4,475	5,106	4,949	18,428	5,263
Ni	12,218	15,135	12,178	3,191	3,917	5,730	4,770	58,430	6,599
Cu	-	-	0,966	1,169	1,058	1,123	0,905	0,811	-
Zn	15,459	18,670	16,423	15,828	15,446	15,202	16,302	22,039	16,926
Ga	9,511	10,832	10,536	10,350	10,348	10,233	10,909	9,761	11,220
As	0,058	0,340	-	-	-	5,355	-	3,480	-
Ag	-	-	0,005	0,016	0,085	-	-	0,038	-
Cd	-	-	0,011	-	-	-	-	0,040	0,031
Pb	0,325	0,353	0,475	0,408	0,338	0,442	0,337	0,809	0,378
Y	2,437	3,297	4,629	3,259	2,549	2,298	2,907	9,216	2,994
Zr	11,385	14,907	16,900	9,142	10,745	10,374	14,328	39,483	13,737
Nb	0,310	0,191	0,354	0,316	0,243	0,179	0,280	0,695	0,434

Продолжение табл. 2  
Table 2 (continued)

Hf	0,237	0,416	0,467	0,252	0,262	0,230	0,304	1,041	0,376
Ta	0,040	0,043	0,134	0,163	0,052	0,021	0,053	0,078	0,016
Be	0,222	0,045	0,267	0,000	0,000	0,089	0,000	1,778	0,251
Sr	2,677	5,679	5,485	3,456	3,814	4,553	2,748	5,993	2,888
Ba	1,885	1,797	25,465	17,718	19,247	23,771	13,916	15,849	14,087
La	1,208	1,483	1,527	1,002	0,623	0,626	0,598	3,014	0,596
Ce	2,295	2,688	2,557	2,216	1,441	1,583	1,477	6,840	1,305
Pr	0,271	0,373	0,513	0,344	0,195	0,230	0,172	0,951	0,180
Nd	0,946	1,472	2,232	1,371	1,019	1,237	0,929	4,300	0,859
Sm	0,248	0,372	0,643	0,410	0,318	0,259	0,320	1,056	0,315
Eu	0,102	0,140	0,178	0,152	0,098	0,118	0,109	0,461	0,100
Gd	0,370	0,416	0,731	0,475	0,377	0,389	0,426	1,359	0,390
Tb	0,069	0,079	0,140	0,080	0,077	0,055	0,077	0,222	0,070
Dy	0,397	0,519	0,848	0,516	0,452	0,406	0,473	1,478	0,497
Ho	0,089	0,119	0,185	0,115	0,084	0,090	0,108	0,324	0,119
Er	0,273	0,370	0,530	0,373	0,287	0,272	0,291	0,958	0,378
Tm	0,035	0,047	0,092	0,058	0,042	0,034	0,054	0,135	0,053
Yb	0,262	0,320	0,548	0,453	0,305	0,311	0,311	0,978	0,381
Lu	0,035	0,044	0,081	0,075	0,031	0,033	0,048	0,138	0,057
Th	0,506	0,957	1,181	0,384	0,316	0,376	0,256	1,784	0,203
U	0,152	0,206	0,215	0,132	0,139	0,146	0,226	0,505	0,215

№	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Автор. номер No.	3	3Б	3В	3Г	3Д	3А	9	9А	9Б
Rb	0,393	1,249	1,220	1,248	0,821	2,410	1,415	1,167	1,570
Li	25,017	23,235	31,401	36,532	25,312	17,677	21,517	22,077	31,287
P	949,7	574,2	683,5	622,8	1008,7	658,7	518,0	520,1	600,3
Sc	9,313	8,548	10,204	17,927	3,624	7,188	4,409	5,132	5,305
Ti	1958,7	1637,2	2012,5	2091,7	2143,7	1230,5	1366,0	1235,7	2125,8
V	21,40	29,79	30,38	31,13	22,98	9,87	9,06	9,70	7,49
Cr	-	39,552	21,739	23,262	46,005	49,849	39,180	42,032	38,533
Mn	951,3	757,3	1016,1	1337,5	736,4	541,9	789,9	884,7	1064,0
Co	11,315	10,570	16,618	11,972	14,100	8,170	10,544	11,120	7,557
Ni	-	21,357	26,440	852,871	21,143	12,566	13,506	14,159	12,514
Cu	-	1,465	1,576	1,190	0,930	3,069	1,972	1,431	0,912
Zn	38,383	40,259	53,232	42,888	46,460	30,083	35,410	35,795	47,529
Ga	8,898	8,824	10,332	10,091	9,426	7,856	6,571	6,535	7,525
As	-	-	-	-	-	4,273	-	-	-
Ag	0,074	0,078	0,213	0,134	0,081	0,035	0,060	0,059	0,083
Cd	0,039	0,041	0,105	0,125	0,071	0,013	0,045	0,011	0,045
Pb	1,418	9,675	2,555	2,769	0,953	1,395	1,425	1,349	1,399
Y	39,883	32,420	55,396	85,819	16,669	18,905	17,865	21,242	21,564
Zr	119,150	117,924	221,371	192,537	106,179	66,972	80,944	82,391	114,995
Nb	7,694	6,434	8,088	8,323	8,281	4,539	6,657	6,279	11,505
Hf	3,165	3,073	5,756	5,050	3,027	1,921	2,181	2,107	3,160
Ta	0,559	0,615	0,822	0,664	0,709	0,360	0,847	0,721	1,166
Be	10,310	8,282	16,739	23,638	1,838	3,301	8,329	10,361	10,565
Sr	9,465	9,561	12,311	14,408	8,305	8,246	9,012	9,740	9,923
Ba	2,534	17,269	11,749	8,427	13,125	37,964	21,660	15,415	20,238
La	5,563	4,443	4,232	6,612	2,549	3,639	3,311	3,527	4,075
Ce	13,338	10,447	10,294	15,742	6,446	8,138	8,209	8,066	9,329

Окончание табл. 2  
Table 2 (continued)

Pr	1,818	1,451	1,423	2,141	0,890	1,048	1,159	1,080	1,209
Nd	8,165	6,659	6,339	9,712	3,955	4,633	5,575	5,091	5,723
Sm	2,572	2,004	2,227	3,391	1,309	1,368	1,605	1,651	1,790
Eu	1,010	0,916	1,196	1,621	0,580	0,518	0,778	0,848	0,925
Gd	3,607	3,096	4,314	6,182	1,990	1,771	2,101	2,171	2,430
Tb	0,793	0,654	0,966	1,417	0,390	0,349	0,364	0,389	0,485
Dy	5,735	4,833	7,919	11,891	2,750	2,859	2,323	3,040	3,386
Ho	1,520	1,244	1,953	3,074	0,599	0,671	0,613	0,727	0,742
Er	4,996	4,043	6,778	10,939	1,887	2,231	2,002	2,436	2,244
Tm	0,728	0,611	1,029	1,658	0,261	0,329	0,335	0,371	0,365
Yb	5,081	4,036	7,011	11,491	1,783	2,263	2,428	2,925	2,688
Lu	0,808	0,618	1,169	1,808	0,297	0,378	0,402	0,488	0,405
Th	5,734	4,983	7,726	8,557	4,608	2,408	3,836	3,223	8,628
U	1,026	0,991	1,506	1,485	1,023	0,724	0,786	0,871	1,367

## Результаты

Изученный образец BIF-2 (рис. 2, а, б) представляет собой типичный фрагмент BIF данной части разреза, в котором чередуются деформированные прослои кварцитов, магнетитовых кварцитов и хлорит-амфиболовых сланцев. Светлые прослои кварцитов составляют около 20 % рассматриваемого разреза, темно-серые магнетитового кварцита и зеленовато-серые хлорит-амфиболовых сланцев – примерно по 40 %. При этом мощность прослоев кварцитов варьирует от 1 до 44 мм. Эти слои в ходе деформаций будинированы, и поэтому их мощность особенно сильно меняется по простиранию (рис. 2, в). Обращает на себя внимание наличие небольших жил, состоящих преимущественно из кварца, секущих полосчатость. Прослои темно-серых магнетитовых кварцитов, по сравнению со светло-серыми кварцитами, имеют меньшую мощность, которая варьирует от 2–3 до 14–20 мм. Мощность прослоев хлорит-амфиболовых сланцев меняется от 2–3 до 20 мм, вариации мощности в отдельных слоях меньше, чем в других типах.

Несмотря на значительные деформации, можно выделить цикличность в строении изученного фрагмента BIF: цикл начинается со слоя хлорит-амфиболовых сланцев, который сменяется прослоем магнетитовых кварцитов и завершается слоем кварцита. В представленном образце выделяется 6 таких трехчленных циклов (рис. 2, в).

## Петрографический и минеральный состав

*Кварциты* характеризуются мелкозернистой однородной текстурой (рис. 4). Структура

гранобластовая (рис. 4, б1, в1). Порода состоит на 90–98 % из полигональных, плотно прилегающих друг к другу зерен кварца размером 200–400 мкм (рис. 4, б1, в1). В межзерновом пространстве располагаются редкие лейсты хлорита, амфибола (паргасита), карбоната (доломит-кальцитового состава в центральной части, сидеритового – во внешней кайме) размером до 50 мкм (рис. 4, б2). Состав хлоритов характеризуется широкими вариациями: выделяются зерна рипидолита, пикрохлорита, диабантита, Fe-хлорита. Кроме того, в такой же структурной позиции встречены зерна пирита размером до 100 мкм (рис. 4, в). В сростании с кварцем встречаются мелкие (около 10 и редко до 30–40 мкм) округлые зерна магнетита и единичные – апатита. Таким образом, данные прослои представляют собой кварцит, в котором в качестве акцессорных минералов присутствуют магнетит, пирит, хлорит, амфибол, доломит-сидерит-кальцитовый карбонат и апатит. Акцессории распределены неравномерно, образуют линзовидные скопления размером до 2 мм (рис. 4, в1).

*Магнетитовый кварцит* состоит главным образом из кварца и магнетита, которые составляют 70–80 % объема породы. Порода имеет мелкозернистую полосчатую текстуру (рис. 5, а) и гранолепидобластовую структуру (рис. 5, а1, б2).

Магнетит составляет от 20 до 50 % объема породы и представлен изометричными зернами размером от нескольких до 200–300 мкм (рис. 5). Зерна кварца чаще имеют округлую (рис. 5, а1), реже угловатую (рис. 5, а2) форму размером 50–200 мкм. В межзерновом пространстве располагаются лейсты хлорита (рипидолита) и амфибола (представлен роговой обманкой и ферри-роговой обманкой) размером 50–200

мкм, а также редкие округлые зерна апатита. Отмечаются зоны, обогащенные пиритом, отдельные зерна которого имеют размер до 100 мкм.

Хлорит-амфиболовые сланцы имеют характерную мелко-среднезернистую сланцеватую текстуру (рис. 6). Структура порфино-лепидо-нематобластовая. Порфиновые лейсты размером от 1 до 20 мм (в обнажении отмечены до

2–3 см) представлены амфиболом (куммингтонитом) (рис. 6, а1, б2). Основная масса породы сложена амфиболом (представлен паргаситом, роговой обманкой и ферри-роговой обманкой), хлоритом (рипидолитом) и кварцем. Содержание кварца сильно варьирует – от 20 до 50 %. Минерал часто представлен в виде полигональных зерен размером 50–300 мкм (рис. 6, г1),

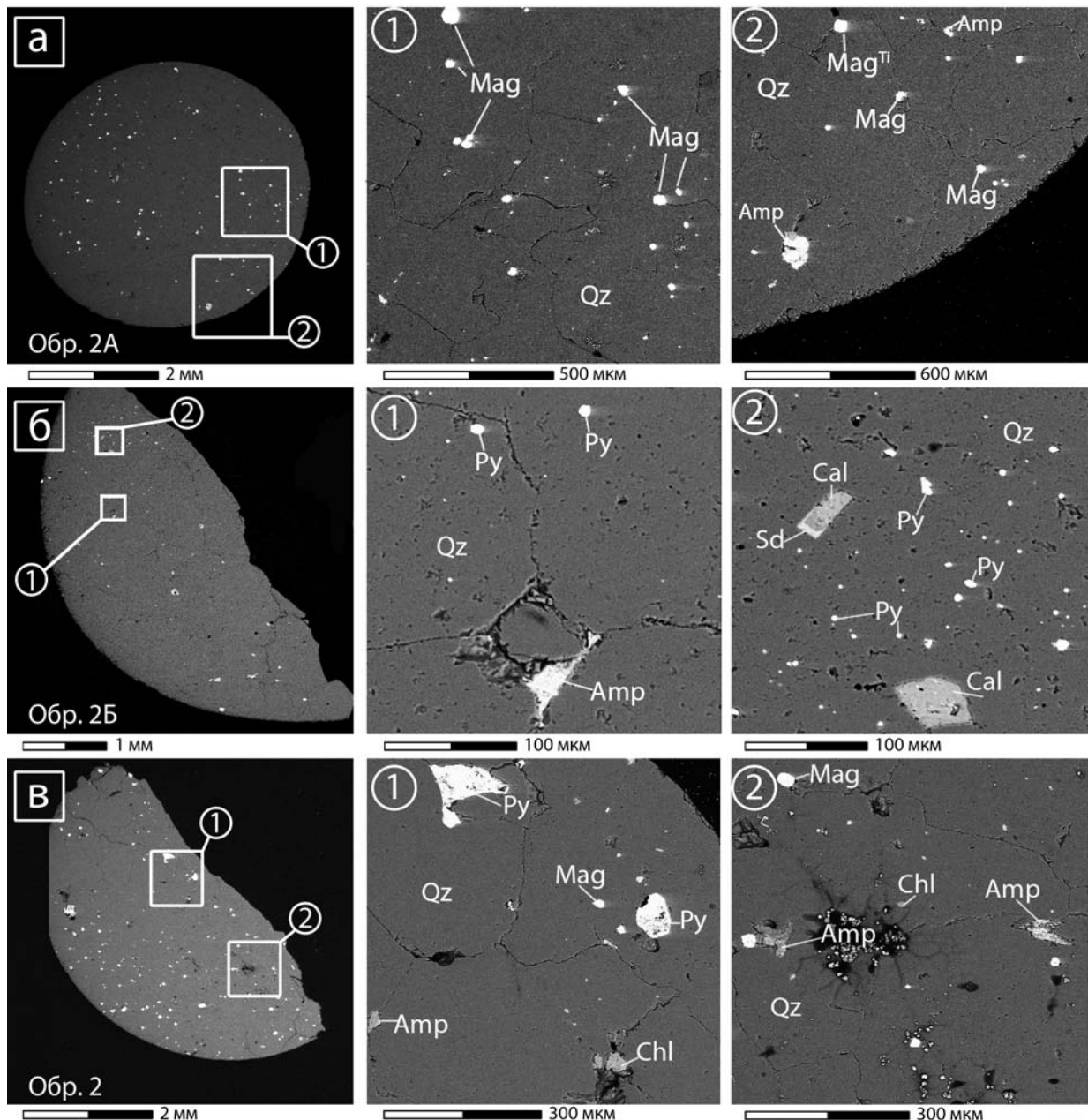


Рис. 4. BSE-изображения шлифов прослоев кварцитов из BIF-2: а – обр. 2А, б – обр. 2Б, в – обр. 2. Названия минералов [Warr, 2021]: Amp – амфибол, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Qz – кварц, Mag – магнетит, Py – пирит, Sd – сидерит

Fig. 4. BSE-images of the polished sections of quartzite interlayers from BIF-2: а – sample 2A, б – sample 2B, в – sample 2. Mineral names [Warr, 2021]: Amp – amphibole, Cal – calcite, Chl – chlorite, Qz – quartz, Mag – magnetite, Py – pyrite, Sd – siderite

иногда объединенных в удлиненные по сланцеватости агрегаты, а также в виде округлых включений в амфиболе (рис. 6, а2, г1). Магнетит распределен неравномерно и обычно присутствует в виде отдельных зерен, иногда крупных (до 300 мкм), но местами (например, образцы 3В, 3Г) может составлять до 5–10 % от объема породы. Магнетит встречается в виде как

изометричных (рис. 6, в1), так и удлиненных (рис. 6, г2) зерен размером 50–300 мкм. Среди рудных минералов в породе в виде удлиненных обособлений размером до 250 мкм отмечены агрегаты титаномагнетита (рис. 6, а2, в2). Встречается также пирит, который обычно образует редкие небольшие зерна, но имеются и крупные (до 0,5 мм) колломорфные

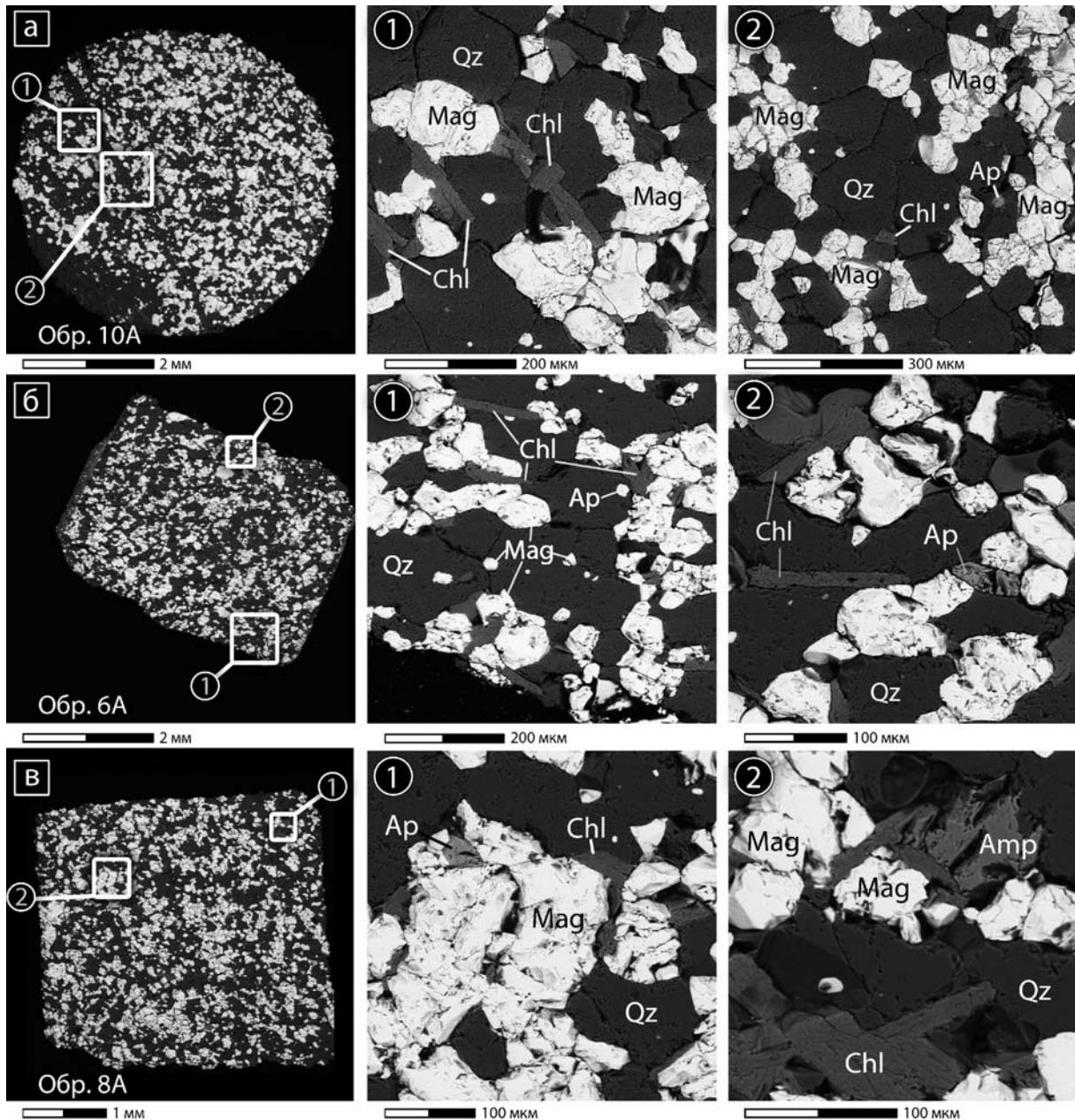


Рис. 5. BSE-изображения шлифов прослоев магнетитовых кварцитов из BIF-2: а – обр. 10А, б – обр. 6А, в – обр. 8А. Названия минералов [Warr, 2021]: Amp – амфибол, Ap – апатит, Chl – хлорит, Qz – кварц, Mag – магнетит

Fig. 5. BSE-images of the polished sections of magnetitic quartzite interlayers from BIF-2: а – sample 10A, б – sample 6A, в – sample 8A. Mineral names [Warr, 2021]: Amp – amphibole, Ap – apatite, Chl – chlorite, Qz – quartz, Mag – magnetite



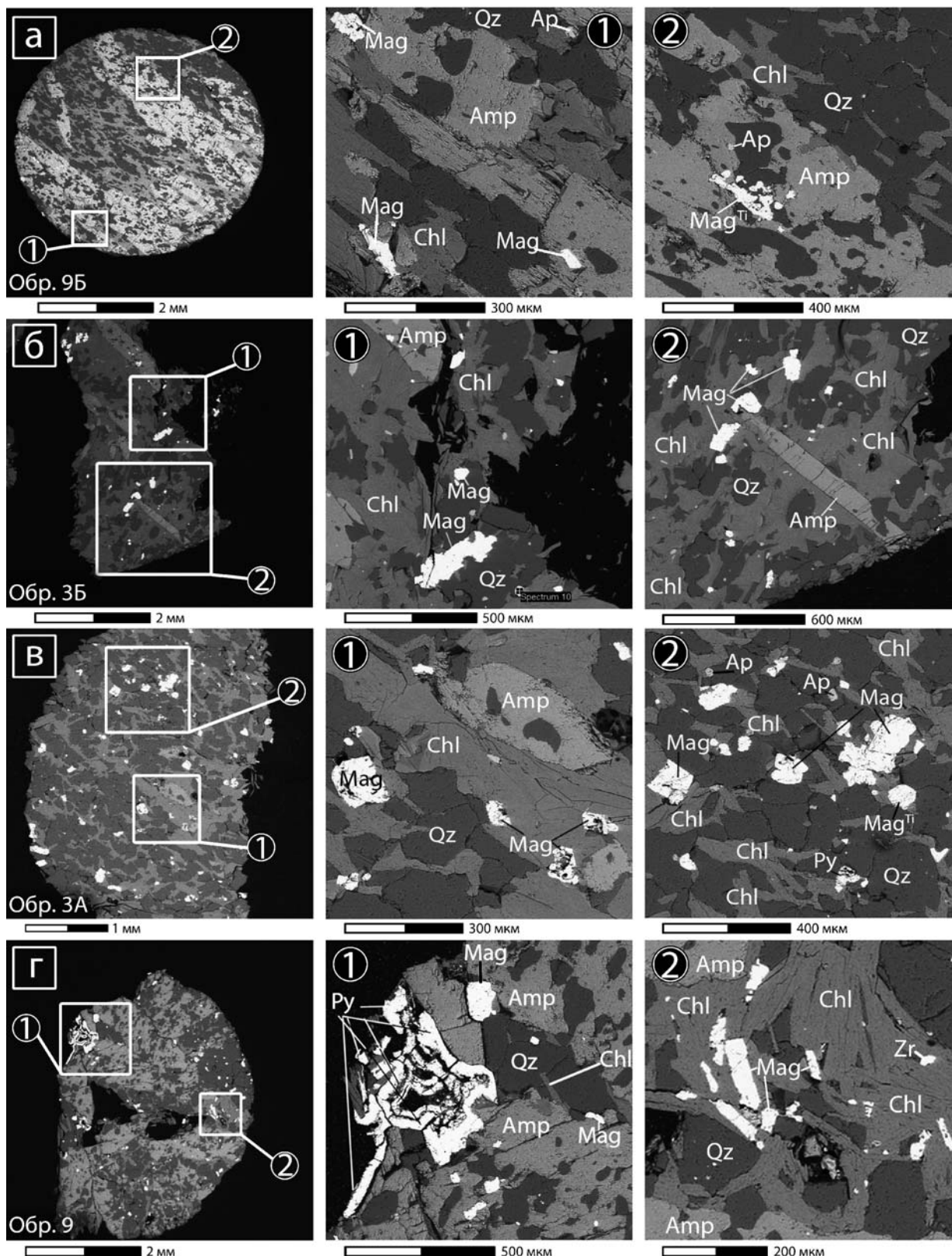


Рис. 6. BSE-изображения прослоев хлорит-амфиболовых сланцев из BIF-2: а – обр. 9Б, б – обр. 3Б, в – обр. 3А, г – обр. 9. Названия минералов [Warr, 2021]: Amp – амфибол, Ap – апатит, Chl – хлорит, Qz – кварц, Mag – магнетит, \*Mag<sup>Ti</sup> – титаномагнетит, Py – пирит, Zr – циркон, \* – название модифицировано  
 Fig. 6. BSE-images of chlorite-amphibole schist interlayers from BIF-2: a – sample 9B, б – sample 3B, в – sample 3A, г – sample 9. Mineral names [Warr, 2021]: Amp – amphibole, Ap – apatite, Chl – chlorite, Qz – quartz, Mag – magnetite, \*Mag<sup>Ti</sup> – titanomagnetite, Py – pyrite, Zr – zircon, \* – name is modified

агрегаты (рис. 6, г1). Широко распространенным акцессорным минералом является апатит, который, как правило, образует мелкие округлые зерна, но встречаются и размером до 100 мкм. Отмечены единичные зерна циркона (рис. 6, г2).

#### Геохимические особенности прослоев.

Прослои кварцитов обеднены относительно других прослоев и породы в целом Ni, Cr, Ti, V, Co, P, Zr, Y, Nb, U, Th, РЗЭ (сумма 7,5 г/т) и обогащены Ba (среднее – 28,1 г/т), Rb (среднее – 2,0 г/т), As (среднее – 7,8 г/т) (табл. 2). При этом содержание Cu, Pb в кварцитах соизмеримо с таковым в других прослоях. Содержание РЗЭ в них (рис. 7), как отмечено, наиболее низкое из изученных образцов всех прослоев, но так же, как все составляющие BIF, они обеднены лег-

кими РЗЭ ( $La_{PAAS}/Yb_{PAAS} = 0,4$ )\*, в них отмечается положительная Eu-аномалия ( $Eu/Eu^* = 1,28$ \*\* и отсутствует Ce-аномалия ( $Ce/Ce^* = 0,99$ \*\*). Следует обратить внимание на то, что Eu-аномалия в кварцитах наименее выражена по сравнению с другими прослоями.

Геохимические особенности изученных кварцитов шурловаарской свиты КЗП Карельского кратона при сравнении с аналогичными составляющими BIF Центрально-Бунделкхандского зеленокаменного комплекса [Singh, Slabunov, 2015] Бунделкхандского кратона [Alfimova et al., 2019] и серии Слемон (Slemon Group) зеленокаменного комплекса Йеллоунайф кратона Слейв [Haugard et al., 2017] демонстрируют как определенное сходство, так и некоторые различия (рис. 8).

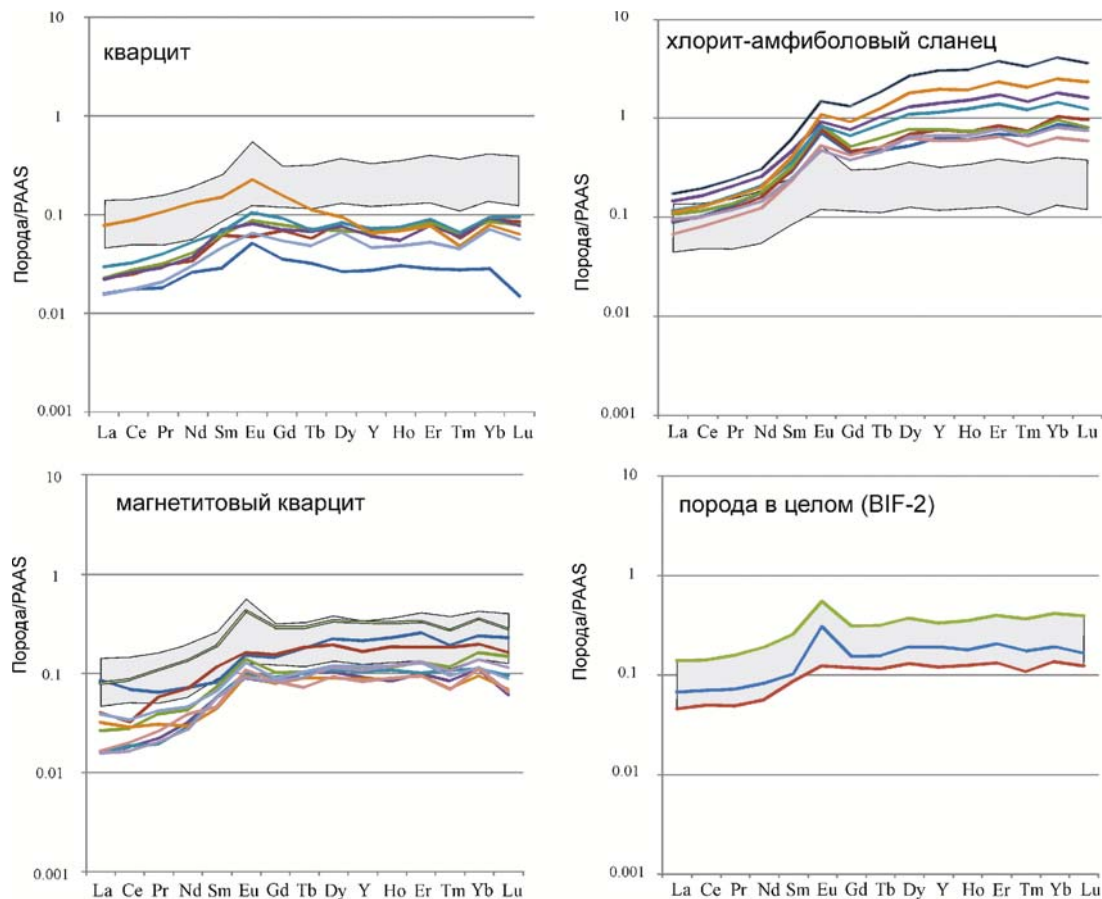


Рис. 7. PAAS-нормированные [Nance, Taylor, 1976] содержания РЗЭ+Y в слоях кварцитов, магнетитовых кварцитов, хлорит-амфиболовых сланцев из образца Э-K22-28/4 и породы (BIF-2) в целом (серое поле):

зеленая линия – K22-28-4, синяя – K22-28-2, красная – K-28-3

Fig. 7. PAAS-normalized [Nance, Taylor, 1976] REE+Y concentrations in quartzite, magnetitic quartzite and chlorite-amphibole schist layers from sample E-K22-28/4 and the rock (BIF-2) in general (grey field):

green line – K22-28-4, blue – K22-28-2, red – K-28-3

\*PAAS – Post Archean Average Shale.

\*\* $Eu/Eu^*_{PAAS} = 2Eu_{PAAS} / (Sm_{PAAS} + Gd_{PAAS})$ ;  $Ce/Ce^*_{PAAS} = 2Ce_{PAAS} / (La_{PAAS} + Pr_{PAAS})$ .

В целом эти породы во всех кратонах обеднены РЗЭ и легкими РЗЭ, характеризуются положительной Eu-аномалией. Однако эта аномалия существенно более контрастна в богатых кремнеземом прослоях как Бунделкхандского кратона, так и кратона Слейв (рис. 8). Кроме того, выделяются региональные геохимические особенности рассматриваемых пород: в Бунделкхандском кратоне они обогащены Y и имеют небольшую отрицательную Ce-аномалию, а в кратоне Слейв обеднены Yb. Обращает на себя внимание и то, что спектры распределения нормированных содержаний РЗЭ в кварцитах коррелируются с таковыми в породах в целом (рис. 8).

Прослои *магнетитовых кварцитов* выделяются высоким содержанием FeO<sup>T</sup> (51,7 %) и низким SiO<sub>2</sub> (39,7 %) (табл. 1). В рассматриваемых BIF магнетитовые кварциты являются главными концентраторами V (среднее – 35,6 г/т) и Ga (среднее – 10,2 г/т), относительно кварцитов в них фиксируются высокие содержания P, Ti, Co, Cu, Zn, РЗЭ (сумма 9,3 г/т) (табл. 2). Содержание РЗЭ в магнетитовых кварцитах лишь немного превышает таковое в кварцитах. Магнетитовые кварциты и кварциты обеднены легкими РЗЭ, но степень обеднения существенно выше ( $La_{paas}/Yb_{paas} = 0,2$ ) в первых. Положительная Eu-аномалия в магнетитовых кварцитах более контрастная ( $Eu/Eu^* = 1,5$ ), тогда как Ce-аномалия ( $Ce/Ce^* = 0,9$ ) отсутствует в обоих типах пород.

Геохимические черты обогащенных железом прослоев в рассматриваемых BIF зеленокаменных поясов Карельского, Бунделкхандского и Слейв кратонов весьма сходны: содержания РЗЭ низкие (Карельский – 9,3 г/т, Бунделкхандский – 18,6, Слейв – 31), во всех хорошо проявлена положительная Eu-аномалия (рис. 8). Но заметны и региональные особенности состава: РЗЭ в обогащенных железом прослоях кратона Слейв менее дифференцированы, в Бунделкхандском кратоне они, так же как и кварциты, характеризуются наличием положительной аномалии Y и слабой отрицательной Ce (рис. 8).

Хлорит-амфиболовые сланцы выделяются среди других составляющих BIF высоким содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MgO (табл. 1). Эта порода является главным концентратором в BIF большей части малых и редких элементов: Ti, Cr, Ni, Co, Mn, P, Li, Be, Sc, Zn, Sr, Zr, Y, Nb, РЗЭ, Th, U (табл. 1). Содержание РЗЭ (среднее – 44,6 г/т) в них трехкратно превышает таковое в магнетитовых кварцитах. Кроме того, хлорит-амфиболовые сланцы сильнее остальных обогащены тяжелыми РЗЭ ( $La_{paas}/Yb_{paas} = 0,09$ ) (рис. 7). При этом в них наиболее контрастно выражена положительная Eu-аномалия ( $Eu/Eu^* = 1,79$ ), но отсутствует Ce-аномалия ( $Ce/Ce^* = 0,96$ ) (рис. 7).

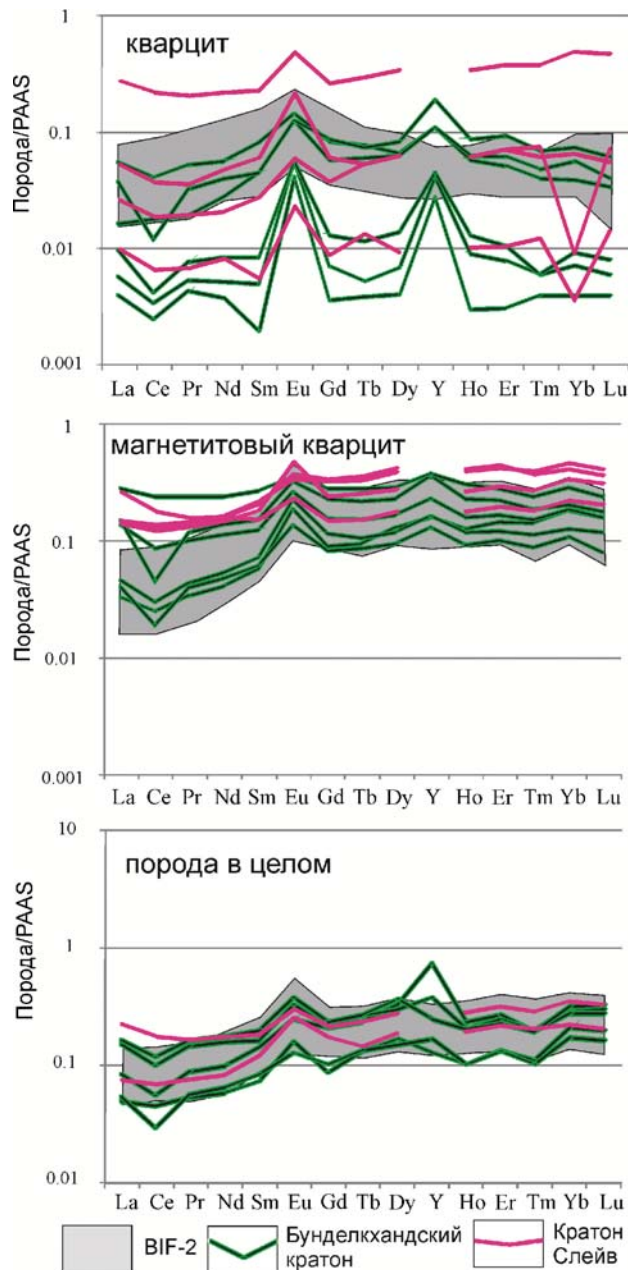


Рис. 8. PAAS-нормированные [Nance, Taylor, 1976] содержания РЗЭ+Y в слоях кварцитов, магнетитовых кварцитов и породы в целом из BIF шурловарской свиты Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона (BIF-2), Центрально-Бунделкхандского зеленокаменного комплекса Бунделкхандского кратона [Alfimova et al., 2019] и серии Слемон (Slemon Group) зеленокаменного комплекса Йеллоунайф кратона Слейв [Haugaard et al., 2017]

Fig. 8. PAAS-normalized [Nance, Taylor, 1976] REE+Y concentrations in quartzite, magnetite quartzite and rock layers from BIF of the Shurlovaara suite, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton (BIF-2), Central Bundelkhand greenstone complex, Bundelkhand Craton [Alfimova et al., 2019] and the Slemon Group of the Yellowknife greenstone complex, Slave Craton [Haugaard et al., 2017]

## Обсуждение

Классические BIF представляют собой чередующуюся последовательность слоев, обогащенных соответственно железом и кремнеземом, но в большинстве случаев они содержат то или иное количество  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MgO$ . Это указывает на то, что при формировании этих пород наряду с хемогенной составляющей участвует и детритовая.

Хемогенная составляющая BIF берет начало из гидротермальных источников (черных и белых курильщиков), которые в раннем докембрии дренируются в бескислородные воды морских бассейнов [Cloud, 1973; Kump, Seyfried, 2005; Pirajno, 2009; Медведев, 2022, 2024]. Так как для перехода железа в нерастворимую форму требуется кислород, то осадкообразование в виде железо-кремнистых гелей происходит только там и тогда, где и когда под воздействием цианобактерий в водах бассейнов накапливается достаточное количество кислорода [Konhauser et al., 2002, 2007].

Детритовый материал поступает в осадочный бассейн за счет разрушения пород из области источника сноса. Например, при становлении мезоархейских BIF, входящих в состав рувинваарской свиты контоксской серии КЗП (или BIF-1), разрушался риолит-коматиит-базальтовый комплекс океанического плато [Slabunov et al., 2024c] и сильно «засорял» хемогенный осадок. BIF-2, которые рассматриваются в данной публикации, содержат значительно меньше детритового компонента, но при этом в северо-западной части пояса в месте отбора пробы Э-К22-28/4 (рис. 1) большая часть детрита концентрируется в отдельные слои сланцев.

Петрогеохимические особенности хлорит-амфиболовых сланцев из BIF-2 и положение фигуративных точек их состава относительно составов других пород на бинарных диаграммах (рис. 9) позволяют предполагать, что их формирование связано со смешением продуктов разрушения коматиит-базальтового и риолитового состава с железо-кремнистым субстратом (вероятно, гелем).

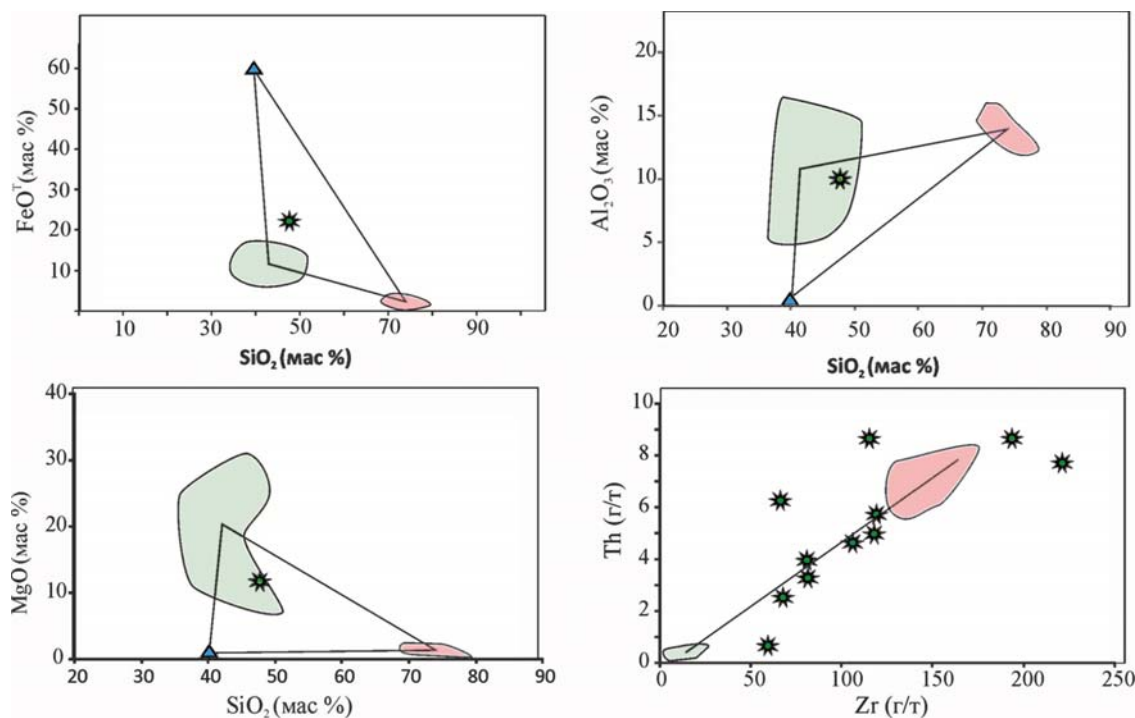


Рис. 9. Бинарные диаграммы для хлорит-амфиболовых сланцев из BIF-2 (зеленые звезды) и ассоциирующихся с ними пород Костомукшского зеленокаменного пояса (коматиит-базальтового комплекса [Puchtel et al., 1998; Slabunov et al., 2024c] – зеленое поле, кислых вулканитов шурловаарской свиты [Бибикова и др., 2005; Мыскова и др., 2020] – розовое поле, железо-кремнистого вещества – синий треугольник)

Fig. 9. Binary diagrams for chlorite-amphibole schists from BIF-2 (green asterisks) and the associated rocks of the Kostomuksha Greenstone Belt (komatiitic-basaltic complex [Puchtel et al., 1998; Slabunov et al., 2024c] – green field, Shurlovaara felsic volcanic [Bibikova et al., 2005; Myskova et al., 2020] – pink field, iron-siliceous matter – blue triangle)

Среди акцессорных минералов в сланцах встречен циркон, и это хорошо согласуется с предположением о том, что в области сноса, откуда поступал терригенный материал, были кислые вулканиты наряду с породами основного состава. Аномально высокое содержание Zr, Y, Th в некоторых пробах, вероятно, связано с локальным обогащением их цирконом.

Таким образом, формирование трех типов слоев в рассмотренных BIF-2 вместо стандартных двух может быть связано с особенностями поступления в преддуговой бассейн [Слабунов и др., 2024; Slabunov et al., 2024c] терригенного материала. Процесс осадконакопления носил циклический характер. Осадочные циклы начинались с накопления терригенной составляющей (хлорит-амфиболовые сланцы), после них формировался слой, обогащенный железом, и завершался цикл осаднением слоя, обогащенного кремнеземом (рис. 2, в).

### Краткие выводы

Среди мезоархейских полосчатых железистых кварцитов шурловаарской свиты (BIF-2) выделяются разности, состоящие из слоев трех контрастно отличающихся типов: обогащенных железом (магнетитовые кварциты), обогащенных кремнеземом (кварциты) и состоящих из хлорит-амфиболового сланца.

Минеральный и химический состав прослоев каждого типа имеет характерные особенности, прослоев с переходными характеристиками не отмечено. Кварц является главным породообразующим минералом кварцитов. В этой породе в качестве акцессорных присутствуют магнетит, хлорит, карбонат, пирит, апатит, амфибол. Порода обеднена всеми, кроме Ba, Rb и As, малыми и редкими элементами. Для нее характерно обеднение легкими РЗЭ и наличие слабой положительной Eu-аномалии. Магнетитовые кварциты состоят преимущественно из кварца, магнетита и хлорита. В качестве второстепенного минерала присутствует амфибол, в качестве рудного – пирит, акцессорного – апатит. Породы являются главным концентратором V и Ga, они существенно обеднены легкими РЗЭ, в них четко выражена положительная Eu-аномалия. Хлорит-амфиболовые сланцы сложены кварцем, хлоритом и амфиболом, в качестве второстепенных минералов отмечены пирит, магнетит, титаномагнетит, а среди акцессорных – апатит, циркон. Хлорит-амфиболовые сланцы обогащены по сравнению с другими породами BIF практически всеми малыми и редкими элементами.

РЗЭ в сланцах обогащены тяжелыми РЗЭ, в них наиболее контрастно выражена положительная Eu-аномалия.

В BIF-2 установлена осадочная цикличность: цикл начинается со сланцев, которые сменяются магнетитовыми кварцитами, и завершается кварцитами.

Хлорит-амфиболовые сланцы моделируются как смесь из продуктов разрушения коматиит-базальтовых и кислых вулканитов контоксской серии с добавкой железо-кремнистого субстрата.

*Авторы благодарят А. Н. Тернового за помощь в организации работ по отбору микрокернов, А. В. Кервинен за изготовление шайб с аншлифами, Т. И. Кузенко и О. А. Максимова за консультации по минералогии. Работа стала возможной благодаря слаженной, ответственной работе сотрудников аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН (рук. С. В. Бурдюх), входящего в Центр коллективного пользования КарНЦ РАН, где выполнены все используемые в работе анализы. Авторы выражают признательность рецензенту А. В. Первуниной, ценные замечания которой позволили лучше раскрыть тему.*

### Литература

- Бибикова Е. В., Самсонов А. В., Петрова А. Ю., Кирнозова Т. И. Геохронология архея западной Карелии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2005. Т. 13, № 5. С. 3–20.
- Вревский А. Б. Ликвационная дифференциация коматиитов: особенности изотопно-геохимического состава пород, возраст и петролого-геодинамические следствия (на примере Костомукшской зеленокаменной структуры, Фенноскандинавский щит) // Записки РМО. 2022. Т. 151, № 6. С. 1–18. doi: 10.31857/S0869605522060090
- Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Белоусов Е. Ф., Инина К. А. Геология и металлогения района 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.
- Исаченко А. А. Сравнительный анализ архейских BIF-содержащих зеленокаменных комплексов кратонов Карельского и Слейв (на примере зеленокаменных поясов Костомукшского и Йеллоунайф) // Науки о Земле: задачи молодых: Материалы 75-й Всероссийской (с международным участием) научной конференции обучающихся и молодых ученых. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023. С. 10–13.
- Кожевников В. Н., Бережная Н. Г., Пресняков С. Л., Лепехина Е. Н., Антонов А. В., Сергеев С. А. Геохронология циркона (SHRIMP-II) из архейских стратотектонических ассоциаций в зеленокаменных поясах Карельского кратона: роль в стратиграфических

и геодинамических реконструкциях // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14, № 3. С. 19–41.

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

Кулешевич Л. В., Фурман В. Н. Золоторудное месторождение Таловейс в Костомукшской докембрийской зеленокаменной структуре (Карелия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 1. С. 58–76.

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

Лазарев Ю. И. Структурная и метаморфическая петрология железистых кварцитов Костомукшского месторождения Карельской АССР. Л.: Наука, 1971. С. 192.

Лобач-Жученко С. Б., Арестова Н. А., Милькевич Р. И., Левченков О. А., Сергеев С. А. Стратиграфический разрез Костомукшской структуры Карелии (верхний архей), реконструированный на основе геохронологических, геохимических и изотопных данных // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2000. Т. 8, № 4. С. 319–326.

Медведев П. В. Железорудные формации докембрия: палеоэкологический и палеонтологический аспекты // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 95–98. doi: 10.17076/geo1676

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

Мудрук С. В., Нестерова Н. С., Максимов О. А., Кервинен А. В., Слабунов А. И. Структурный анализ архейских конгломератов Костомукшского зеленокаменного пояса (Фенноскандинавский щит): первые результаты // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2024. № 21. С. 181–189. doi: 10.31241/FNS.2024.21.022

Мыскова Т. А., Милькевич Р. И., Львов П. А., Житникова И. А. Неархейские вулканы 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

Савко К. А., Гончаров Д. А., Нестерова Н. С., Слабунов А. И. Полосчатые железистые кварциты главной рудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона: геохимия, петрография и условия формирования // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2024. № 2. С. 50–70. doi: 10.17308/geology/1609-0691/2024/2/50–70

Светов С. А., Степанова А. В., Бурдюх С. В., Парамонов А. С., Утицына В. Л., Эхова М. В., Теслюк И. А., Чаженгина С. Ю., Светова Е. Н., Коньшев А. А. Прецизионный ICP-MS анализ докембрийских горных пород: методика и оценка точности

результатов // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 2. С. 73–86. doi: 10.17076/geo1755

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. 2023а. № 2. С. 5–22. doi: 10.17076/geo1749

Слабунов А. И., Кервинен А. В., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Максимов О. А., Медведев П. В. Полихронная история формирования неархейских полосчатых железистых кварцитов главной рудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса: возраст цирконов и акцессорные минералы // Труды Карельского научного центра РАН. 2022а. Т. 2, № 5. С. 139–143. doi: 10.17076/geo1666

Слабунов А. И., Лобач-Жученко С. Б., Бибикина Е. В., Балаганский В. В., Сорьонен-Вард П., Володичев О. И., Щипанский А. А., Светов С. А., Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Степанов В. С. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки // Геотектоника. 2006. № 6. С. 1–33.

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., Кервинен А. В., Максимов О. А., Медведев П. В. Архейские полосчатые железистые кварциты как индикаторы гидротермальной активности в древних океанах и их роль для интерпретации геодинамических процессов // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2024: Материалы LV Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2024. С. 161–165.

Слабунов А. И., Светов С. А., Степанова А. В., Медведев П. В., Полин А. К. Новая тектоническая карта Карелии: принципы построения и их реализация // Труды Карельского научного центра РАН. 2022б. № 5. С. 132–138. doi: 10.17076/geo1690

Слабунов А. И., Кервинен А. В., Максимов О. А., Медведев П. В., Мудрук С. В., Нестерова Н. С., Ильченко А. А. Геодинамические обстановки ранней Земли и архейские полосчатые железистые кварциты. Промежуточный отчет по гранту РНФ 22-17-00026. 2023б.

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Мудрук С. В., Максимов О. А., Кервинен А. В. Находка неархейских (2.71 млрд лет) конгломератов в Костомукшском железорудном районе: к вопросу о самой молодой стратотектонической ассоциации архея Карельского кратона // ДАН. Науки о Земле (в печати).

Чернов В. М. Стратиграфия и условия осадконакопления вулканогенных (лептитовых) железисто-кремнистых формаций Карелии. М.-Л.: Наука, 1964. 123 с.

Alfimova N., Raza M. B., Felitsyn S., Matrenichev V., Bogomolov E., Nasipuri P., Saha L., Pati J. K.,

Kumar V. Isotopic Sm-Nd signatures of Precambrian Banded Iron Formation from the Fennoscandian shield, East-European Platform, and Bundelkhand craton, India // *Precamb. Res.* 2019. Vol. 328. P. 1–8. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.008

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations // *Encyclopedia of Geology* (2<sup>nd</sup> ed.) / Eds. D. Alderton, S. A. Elias. Oxford: Academic Press, 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5

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

Cloud P. Paleocological significance of banded iron-formation // *Econ. Geol.* 1973. Vol. 68. P. 1135–1143.

Gross G. A. A classification of iron-formation based on depositional environments // *Can. Mineral.* 1980. Vol. 18. P. 215–222.

Haugaard R., Ootes L., Creaser R. A., Konhauser K. The nature of Mesoarchean seawater and continental weathering in 2.85 Ga banded iron formation, Slave craton, NW Canada // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2016. Vol. 194. P. 34–56. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00202-1

Haugaard R., Ootes L., Konhauser K. Neoarchean banded iron formation within a 2620 Ma turbidite-dominated deep-water basin, Slave craton, NW Canada // *Precamb. Res.* 2017. Vol. 292. P. 130–151. doi: 10.1016/j.precamres.2017.01.025

Höltta P., Heilimo E., Huhma H., Kontinen A., Mertanen S., Mikkola P., Paavola J., Peltonen P., Semprich J., Slabunov A., Sorjonen-Ward P. The Archaean Karelia and Belomorian Provinces, Fennoscandian Shield // *Evolution of Archean Crust and Early Life* / Eds. Y. Dilek, H. Furnes. Modern Approaches in Solid Earth Sciences (7). Springer, 2014. P. 55–102. doi: 10.1007/978-94-007-7615-9\_3

Konhauser K. O., Amskold L., Lalonde S. V., Posth N. R., Kappler A., Anbar A. Decoupling photochemical Fe (II) oxidation from shallow-water BIF deposition // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 258. P. 87–100. doi: 10.1016/j.epsl.2007.03.026

Konhauser K. O., Hamade T., Raiswell R., Morris R. C., Ferris F. G., Southam G., Canfield D. E. Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? // *Geology.* 2002. Vol. 30. P. 1079–1082. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1079:CBHFTP>2.0.CO;2

Konhauser K. O., Planavsky N. J., Hardisty D. S., Robbins L. J., Warchola T. J., Haugaard R., Lalonde S. V., Partin C. A., Onk P. B. H., Tsikos H., Lyons T. W., Bekker A., Johnson C. M. Iron formations: A global record of Neoarchean to Palaeoproterozoic environmental history // *Earth Sci. Rev.* 2017. Vol. 172. P. 140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Kump L. R., Seyfried W. E. Jr. Hydrothermal Fe fluxes during the Precambrian: Effect of low oceanic sulfate concentrations and low hydrostatic pressure on the composition of black smokers // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 235. P. 654–662. doi: 10.1016/j.epsl.2005.04.040

Nance W. B., Taylor S. R. Rare earth element patterns and crustal evolution – I. Australian post-Archean sedimentary rocks // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1976. Vol. 40. P. 1539–1551.

Posth N. R., Konhauser K. O., Kappler A. Banded Iron Formations // *Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Sciences Series* / Eds. J. Reitner, V. Thiel. Dordrecht: Springer, 2011. P. 92–103. doi: 10.1007/978-1-4020-9212-1\_19

Pirajno F. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems.* Springer: Science Business Media B. V., 2008. 1250 p.

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

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. Vol. 57. P. 1349–1364. doi: 10.1080/00206814.2014.919613

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: Geochemistry, neodymium isotopes and U-Pb zircon geochronology // *Precamb. Res.* 2024a. Vol. 401. Art. 107254. doi: 10.1016/j.precamres.2023.107254

Slabunov A. I., Egorov A. V., Nesterova N. S. Geochemical types of Archean banded iron formations and the geodynamic settings of the basins, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Russia // *Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources: Proceedings of 4<sup>th</sup> Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting.* Kazan, 2020. P. 256–262. doi: 10.26352/E922

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.* 2024b. Vol. 66(6). P. 1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Maksimov O. A. Geochemistry and formation conditions of Mesoarchean banded iron formations (BIF-1) from the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton // *Geochemistry Int.* 2024c. Vol. 62(3). P. 245–266. doi: 10.1134/S0016702924030054

Warr L. N. IMA-CNMNC approved mineral symbols // *Mineral. Mag.* 2020. Vol. 85. P. 291–320. doi: 10.1180/mgm.2021.43

## References

Alfimova N., Raza M. B., Felitsyn S., Matrenichev V., Bogomolov E., Nasipuri P., Saha L., Pati J. K., Kumar V. Isotopic Sm-Nd signatures of Precambrian banded iron formation from the Fennoscandian Shield, East-European Platform, and Bundelkhand Craton, India. *Precamb. Res.* 2019;328:1–8. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.008

- Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations. Alderton D., Elias S. A. (eds.). *Encyclopedia of Geology*, 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Academic Press; 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5
- 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
- Bibikova E. V., Samsonov A. V., Petrova A. Yu., Kirnozova T. I. The Archean geochronology of western Karelia. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2005; 13(5):459–475.
- Chernov V. M. Stratigraphy and sedimentation conditions of volcanogenic (leptite) ferruginous-siliceous formations of Karelia. Moscow-Leningrad: Nauka; 1964. 123 p. (In Russ.)
- Cloud P. Paleoeological significance of banded iron formation. *Econ. Geol.* 1973;68:1135–1143.
- Gor'kovets V. Ya., Raevskaya M. B., Belousov E. F., Inina K. A. Geology and metallogeny of the Kostomuksha iron 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 the banded iron formation of Karelia. Leningrad: Nauka; 1991. 176 p. (In Russ.)
- Gor'kovets V. Ya., Sharov N. V. (eds.). Kostomuksha ore district: Geology, deep structure, and metallogeny. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 322 p. (In Russ.)
- Gross G. A. A classification of iron-formation based on depositional environments. *Can. Mineral.* 1980;18:215–222.
- Haugard R., Ootes L., Creaser R. A., Konhauser K. The nature of Mesoarchean seawater and continental weathering in 2.85 Ga banded iron formation, Slave craton, NW Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2016;(194):34–56. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00202-1
- Haugard R., Ootes L., Konhauser K. Neoarchean banded iron formation within a 2620 Ma turbidite-dominated deep-water basin, Slave craton, NW Canada. *Precamb. Res.* 2017;292:130–151. doi: 10.1016/j.precamres.2017.01.025
- Hölttä P., Heilimo E., Huhma H., Kontinen A., Mertanen S., Mikkola P., Paavola J., Peltonen P., Semprich J., Slabunov A., Sorjonen-Ward P. The Archean Karelia and Belomorian Provinces, Fennoscandian Shield. *Evolution of Archean Crust and Early Life Modern Approaches in Solid Earth Sciences* (7). Springer; 2014. P. 55–102. doi: 10.1007/978-94-007-7615-9\_3
- Isachenko A. A. A comparative analysis of Archean BIF-containing greenstone complexes of Karelian and Slave Cratons (cases of Kostomuksha and Yellowknife Greenstone Belts). *Nauki o Zemle: zadachi molodykh: Materialy 75-i Vserossiiskoi (s mezhdunarod. uchastiem) nauchnoi konferentsii obuchayushchikhsya i molodykh uchenykh = Earth sciences: Tasks of the young. Proceed. 75<sup>th</sup> All-Russian (with int. part.) scientific conference of students and young scientists*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2023. P. 10–13. (In Russ.)
- Konhauser K. O., Amskold L., Lalonde S. V., Posth N. R., Kappler A., Anbar A. Decoupling photochemical Fe (II) oxidation from shallow-water BIF deposition. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007;258:87–100. doi: 10.1016/j.epsl.2007.03.026
- Konhauser K. O., Hamade T., Raiswell R., Morris R. C., Ferris F. G., Southam G., Canfield D. E. Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? *Geology*. 2002;30:1079–1082. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1079:CBHFTP>2.0.CO;2
- Konhauser K. O., Planavsky N. J., Hardisty D. S., Robbins L. J., Warchola T. J., Haugaard R., Lalonde S. V., Partin C. A., Oonk P. B. H., Tsikos H., Lyons T. W., Bekker A., Johnson C. M. Iron formations: A global record of Neoarchean to Palaeoproterozoic environmental history. *Earth Sci. Rev.* 2017;172:140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012
- Kozhevnikov V. N., Berezhnaya N. G., Presnyakov S. L., Lepekhina E. N., Antonov A. V., Sergeev S. A. Geochronology (SHRIMP II) of zircons from Archean stratotectonic associations of Karelian Greenstone Belts: Significance for stratigraphic and geodynamic reconstructions. *Stratigraphy and geological correlation*. 2006;14(3):240–259. doi: 10.1134/S0869593806030026
- Kuleshevich L. V., Furman V. N. The Taloveis gold deposit in the Precambrian Kostomuksha Greenstone Belt, Karelia. *Geology of Ore Deposits*. 2009;51(1):51–67. doi: 10.1134/S1075701509010048
- 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 South-eastern Fennoscandia (scale 1:750 000): A new approach to map compilation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2017;2:3–41. (In Russ.). doi: 10.17076/geo444
- Kump L. R., Seyfried W. E. Jr. Hydrothermal Fe fluxes during the Precambrian: Effect of low oceanic sulfate concentrations and low hydrostatic pressure on the composition of black smokers. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005;235:654–662. doi: 10.1016/j.epsl.2005.04.040
- Lazarev Yu. I. Structural and metamorphic petrology of banded iron formation of the Kostomuksha deposit of the Karelian ASSR. Leningrad: Nauka; 1971. (In Russ.)
- Lobach-Zhuchenko S. B., Arestova N. A., Levchenkova R. I., Milkevich O. A., Sergeev S. A. Stratigraphy of the Kostomuksha Belt in Karelia (Upper Archean) as inferred from geochronological, geochemical, and isotopic data. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya = Stratigraphy and geological correlation*. 2000;8(4): 319–326. (In Russ.)
- Medvedev P. V. Paleocology and paleobiology of Precambrian banded iron formation (a review). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2024;6:17–29. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1953
- Medvedev P. V. Precambrian iron formations: paleoecological and paleontological aspects. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:95–98. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1676
- Mudruk S. V., Nesterova N. S., Maksimov O. A., Kervinen A. V., Slabunov A. I. Structural analysis



of Archean conglomerates from the Kostomuksha Greenstone Belt (Fennoscandian Shield): the first results. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN = Transactions of A. Fersman Scientific Session of Geological Institute, Kola Research Centre, RAS.* 2024;21:181–189. (In Russ.). doi: 10.31241/FNS.2024.21.022

Myskova T. A., Milkevich R. I., Lvov P. A., Zhitnikova I. A. Neoproterozoic volcanites of the Khedozero-Bolshozero Greenstone Structure (Central Karelia): Composition, age, and tectonic setting. *Stratigraphy and Geological Correlation.* 2020;28(2):107–134. doi: 10.1134/S0869593820020045

Nance W. B., Taylor S. R. Rare earth element patterns and crustal evolution – I. Australian post-Archean sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1976;40:1539–1551.

Pirajno F. Hydrothermal processes and mineral systems. Springer: Science Business Media B.V.; 2008. 1250 p.

Posth N. R., Konhauser K. O., Kappler A. Banded iron formations. *Reitner J., Thiel V. (eds). Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Sciences Series.* Dordrecht: Springer; 2011. P. 92–103. doi: 10.1007/978-1-4020-9212-1\_19

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

Savko K. A., Goncharov D. A., Nesterova N. S., Slabunov A. I. Banded iron formations of the main ore sequence of the Kostomuksha Greenstone Belt of the Karelian Craton: Geochemistry, petrography and formation conditions. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Ser. Geology.* 2024;2:50–70. (In Russ.). doi: 10.17308/geology/1609-0691/2024/2/50–70

Singh V. K., Slabunov A. The Central Bundelkhand Archean 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 A. I., Egorov A. V., Nesterova N. S. Geochemical types of Archean banded iron formations and the geodynamic settings of the basins, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Russia. *Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources: Proceedings of 4<sup>th</sup> Kazan Golovkin-sky Stratigraphic Meeting.* Kazan; 2020. P. 256–262. doi: 10.26352/E922

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: Geochemistry, neodymium isotopes and U-Pb zircon geochronology. *Precamb. Res.* 2024;401:107254. doi: 10.1016/j.precamres.2023.107254

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 constitution, Karelian Craton:

U-Th-Pb dating of zircon. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2023;2:5–22. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1749

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Egorov A. V., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Polychronous evolution of Neoproterozoic banded iron formation in the main ore sequence of the Kostomuksha Greenstone Belt: the age of zircons and accessory minerals. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2022;5:139–143. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1666

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.* 2024b;66(6):1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Mudruk S. V., Maksimov O. A., Medvedev P. V., Isachenko A. A. Early Earth's geodynamics settings and Archean banded iron formation. Annual report on grant RSF 22-17-00026. 2023. (In Russ.)

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Balagansky V. V., Sorjonen-Ward P., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archean of the Baltic Shield: Geology, geochronology, and geodynamic settings. *Geotectonics.* 2006;40(6):409–433. doi: 10.1134/S001685210606001X

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 Int.* 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Kervinen A. V., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Archean banded iron formation as indicators of hydrothermal activity in ancient oceans and their role for interpretation of geodynamic processes. *Tectonics and geodynamics of the Earth's crust and mantle: Fundamental problems – 2024. Proceed. LV Tectonic meeting.* Vol. 2. Moscow: GEOS; 2024. P. 161–165. (In Russ.)

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Maksimov O. A. Geochemistry and formation conditions of Mesoproterozoic banded iron formations (BIF-1) from the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton. *Geochemistry Int.* 2024c;62(3):245–266. doi: 10.1134/S0016702924030054

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Mudruk S. V., Maksimov O. A., Kervinen A. V. Finding of Neoproterozoic (2.71 Ga) conglomerates in the Kostomuksha Iron Province, Karelian Craton: on the youngest Archean stratotectonic association in the Karelian Craton. *Doklady Earth Sciences* (in press). doi: 10.1134/S1028334X24603493

Svetov S. A., Stepanova A. V., Burdyukh S. V., Paramonov A. S., Utitsyna V. L., Ekhovala M. V., Teslyuk I. A., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Konyshchev A. A. Precision geochemical (ICP-MS) analy-

sis of Precambrian rocks: the method and accuracy estimation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2023;2: 73–86. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1755

Slabunov A. I., Svetov S. A., Stepanova A. V., Medvedev P. V., Polin A. K. A new tectonic map of Karelia: the main concept and its application. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:132–138. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1690

Vrevskii A. B. Liquid immiscibility in komatiites: Isotopic and geochemical features of rocks, age, petrological and geodynamic implications (a case of the Kostomuksha Greenstone Belt, Fennoscandian Shield). *Geology of Ore Deposits*. 2023;65(8):921–932. doi: 10.1134/S107570152308010X (Original published in *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, 2022.)

Warr L. N. IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Mag.* 2020;85:291–320. doi: 10.1180/mgm.2021.43

Поступила в редакцию / received: 20.08.2024; принята к публикации / accepted: 25.09.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Слабунув Александр Иванович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геологии и геодинамики докембрия ИГ КарНЦ РАН; профессор кафедры наук о Земле и геотехнологий ПетрГУ

e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

### Исаченко Артем Алексеевич

старший лаборант ИГ КарНЦ РАН; студент ПетрГУ

e-mail: artem.isachenko@yandex.ru

## CONTRIBUTORS:

### Slabunov, Alexander

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Head of Laboratory, IG KarRC RAS; Professor, PetrSU

### Isachenko, Artem

Laboratory Researcher, IG KarRC RAS; Student, PetrSU

УДК 552.122

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ СРАСТАНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И РУДАХ

Ю. Л. Войтеховский<sup>1\*</sup>, Д. Г. Степенщиков<sup>2</sup>, А. А. Захарова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена  
(наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186), \*vojtehovskij@herzen.spb.ru

<sup>2</sup> Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН (ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Россия, 184209)

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (21-я линия В. О., 2,  
Санкт-Петербург, Россия, 199106)

В статье продолжено развитие методов описания структур горных пород и руд на основе статистик межзерновых контактов. Дан краткий обзор предыдущих результатов и сформулирована новая задача – учет размерного эффекта минеральных зерен в структурах, далеких от равновесия Харди – Вайнберга. Расчетом показано, что в структурах, близких к указанному равновесию, раскрываемость минерального зерна не зависит от числа соседей. Результаты имеют отношение к проблемам общей количественной характеристики структур горных пород и прогноза технологических свойств руд по особенностям срастаний рудных минералов с нерудными.

Ключевые слова: кристаллические горные породы и руды; структура; текстура; бинарные и тернарные межзерновые контакты; вероятности; барицентрические диаграммы; равновесие Харди – Вайнберга

Для цитирования: Войтеховский Ю. Л., Степенщиков Д. Г., Захарова А. А. Статистическое описание минеральных срастаний в горных породах и рудах // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 6. С. 51–57. doi: 10.17076/geo1940

## Yu. L. Voytekhovskiy<sup>1\*</sup>, D. G. Stepenschikov<sup>2</sup>, A. A. Zakharova<sup>3</sup>. STATISTICAL DESCRIPTION OF MINERAL INTERGROWTHS IN ROCKS AND ORES

<sup>1</sup> A. I. Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Nab. Reki Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia), \*vojtehovskij@herzen.spb.ru

<sup>2</sup> Geological Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14 Fersman St., 184209 Apatity, Russia)

<sup>3</sup> St. Petersburg Mining University (2 21<sup>st</sup> Liniia V. O., 199106 St. Petersburg, Russia)

The article continues the development of methods for describing the structures of rocks and ores based on the statistics of intergrain contacts. A brief overview of the previous results is given and a new task is formulated – taking into account the dimensional effect of mineral grains in structures far from the Hardy – Weinberg equilibrium. The calculation shows that in structures close to the specified equilibrium, the disclosure of mineral grains does not depend on the number of neighbors. The results are relevant to

the problems of general quantitative characterization of rock structures and prediction of ore technological properties based on the features of coalescence of ore minerals with non-metallic ones.

Keywords: crystalline rocks and ores; structure; texture; binary and ternary intergrain contacts; probabilities; barycentric diagrams; Hardy – Weinberg equilibrium

For citation: Voytekhovskiy Yu. L., Stepenshikov D. G., Zakharova A. A. Statistical description of mineral intergrowths in rocks and ores. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 6. P. 51–57. doi: 10.17076/geo1940

## Введение

Характеристика петрографических структур – наименее формализованная сторона описания горных пород и руд. Это особенно удручает на фоне кристаллографического описания минералов, в основе которого лежит теория пространственных групп симметрии. Петрографы используют сотни терминов, учитывающих метрические (абсолютные и относительные размеры), неметрические (степень идиоморфизма-ксеноморфизма, причем для каждого минерала – в своей шкале) особенности минеральных зерен, пространственные отношения их самих (пойкилитовые структуры) и агрегатов (такситовые, полосчатые и др. текстуры) вместе с генетическими представлениями (лепидо-, пойкило-, немато-... гранобластовые структуры) [Петрографический..., 1981, 2008].

Общая теория систем указывает, что их особенности определяются не столько набором элементов (которые первичны), сколько разнообразием их отношений. В горных породах и рудах элементы – минеральные зерна разных видов, системное отношение – межзерновые контакты: бинарные (по поверхностям), тернарные (по ребрам) и куотернарные (в точках). Как граничные дефекты кристаллических структур, зоны обрыва химических связей и каналы свободной энергии они рассмотрены в металлах и сплавах (прогноз физических свойств), горных породах и рудах (реконструкция генезиса, прогноз обогащающих свойств) [Салтыков, 1958; Беленький, 1980; Вернон, 1980; Бродская, 1988].

В традиционном описании горных пород и руд (их химического и минерального состава, структур и текстур) есть важный момент – оно выполняется на объеме, в котором достигается устойчивость характеристик. Петрографическое описание в своей основе имеет статистический характер. Мы используем этот принцип, сосредоточив его на статистиках межзерновых контактов. При этом теряются некоторые указанные выше моменты. Но заметим, что отно-

сительные размеры зерен участвуют в статистиках контактов опосредованно, что оценки идиоморфизма-ксеноморфизма мы относим к минералогическому уровню описания и что генетическим догадкам вообще не место в теории петрографических структур (образец правильного описания – федоровские группы в кристаллографии).

## Краткий обзор результатов

Метод был предложен в статьях [Войтеховский, 1991, 1995, 2000] и основан на том, что соотношение  $\sum p_{ij}m_i m_j = 1$  ( $i, j = 1, \dots, n$ ) определяет центральную поверхность 2-го порядка в  $n$ -мерном пространстве  $\{m_1, \dots, m_n\}$  и организацию  $n$ -минеральной горной породы, где  $p_{ij}$  – частоты (вероятности) межзерновых контактов минералов  $m_i$  и  $m_j$ . Тем самым систематика петрографических структур сведена к таковой квадратичных поверхностей. Теория содержится в любом университетском учебнике линейной алгебры, а матричные преобразования доступны в Интернете. Петрографу остается подсчитать частоты  $p_{ij}$  под микроскопом, что – признаем – пока представляет собой рутинную операцию.

Метод оказался весьма чувствительным к статистическим особенностям межзерновых срастаний, плохо различимым при традиционном описании структур и текстур горных пород. В монотонных разрезах Федорова-Панского интрузива удалось выявить скрытую магматическую расслоенность [Войтеховский, Припачкин, 2001]. Уверенно различены структуры амфиболитов островов Керетского архипелага (Белое море) [Войтеховский, Захарова, 2021]. Важным для петрографии оказалось «равновесие Харди – Вайнберга» (далее ХВ, НВ, введено в начале XX века в генетике), отвечающее идеальному перемешиванию минеральных зерен в горной породе. В этом случае частоты  $p_{ij}$  контактов можно рассчитать по частотам  $p_i$  самих зерен, т. е. модальному составу горной породы или руды:  $p_{ii} = p_i^2$ ,  $p_{ij} = 2 p_i p_j$ .

Для биминеральных горных пород ( $n = 2$ ) линии ХВ задаются соотношениями:  $p_{11}p_{22} = (p_{12}/2)^2$  в барицентрическом треугольнике (для бинарных контактов) и  $p_{111} = p_1^3$ ,  $p_{112} = 3p_1^2p_2$ ,  $p_{122} = 3p_1p_2^2$ ,  $p_{222} = p_2^3$  в тетраэдре (для тернарных контактов). Равновесие ХВ отвечает массивным текстурам горных пород, интуитивно схваченным петрографами. На самом же деле это пограничное состояние отделяет горные породы с всегда немассивными текстурами [Войтеховский, Захарова, 2018, 2021].

В статьях [Войтеховский, Захарова, 2020; Войтеховский и др., 2020] выполнено статистическое 2D-моделирование канонических петрографических структур (вкрапленных, цепочечных, пойкилитовых, с ветвящимися кластерами, порфириковых, порфириковидных) и текстур (полосчатых, шлировых). Для фиксированных кластеров, определяющих тип структуры и текстуры, и их разных концентраций в матрице рассчитаны тренды (рис. 1). В реальных горных породах и рудах типы кластеров не выдержаны. Их фигуративные точки попадут между идеальными трендами.

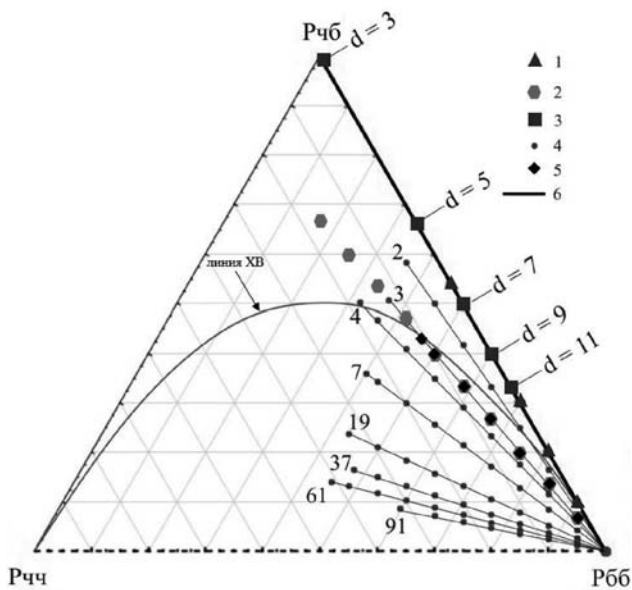


Рис. 1. Барицентрическая диаграмма ( $p_{чч}$ ,  $p_{бб}$ ,  $p_{чб}$ ):

ч (черный) и б (белый) – условные обозначения минеральных зерен. Структуры: 1 – вкрапленная, 2 – цепочечная, 3 – порфириковые ( $d$  – диаметр фенокриста), 4 – шлировые (количество зерен в шлирах указано числами), 5 – с ветвящимися кластерами, 6 – пойкилитовые

Fig. 1. Barycentric diagram ( $p_{чч}$ ,  $p_{бб}$ ,  $p_{чб}$ ):

ч (black) and б (white) – symbols of mineral grains. Structures: 1 – disseminated, 2 – chained, 3 – porphyritic ( $d$  – diameter of phenocryst), 4 – schlieren (quantities of grains in the schlierens are indicated by the numbers), 5 – with branching clusters, 6 – poikilitic

Наконец, метод успешно применен к апатитовым рудам Хибин [Захарова, Войтеховский, 2022] и золотоносным рудам одного из месторождений Сибири [Захарова, Войтеховский, 2024]. Установлены корреляции структурных типов руд с обогатимостью в первом случае и механическими свойствами (индексом Бонда) во втором.

### Эффект размерности

На барицентрической диаграмме (рис. 1) по обе стороны от линии ХВ расположены обширные поля статистически неравновесных, «неидеально перемешанных» горных пород и руд. Сложность их систематики и номенклатуры состоит именно в том (и лишь усугубляется для полиминеральных горных пород и руд), что петрографы стремятся дать имя каждой выразительной «структуре» и «текстуре». При этом структурность здесь имеет смысл статистической устойчивости мотива в достаточно большом образце и далека от категорий структуры и порядка, например, в кристаллографии. Тем не менее моделирование показало, что в одном поле располагаются порфириковые структуры, в другом – такситовые текстуры. Имеет смысл проанализировать влияние этих двух обстоятельств (крупные зерна условно рудного минерала и стягивание рудных зерен в шлиры в равнотекстурной руде) на статистики межзерновых срастаний и их раскрытие при дроблении.

Рассмотрим отдельное зерно рудного минерала в системе «рудный минерал – нерудные минералы». Его контакты с другими зернами в комбинаторном приближении можно рассматривать как грани полиэдра. Каждой можно сопоставить один из двух цветов. Известно, что в подавляющей массе полиэдры комбинаторно асимметричны. Число раскрасок граней такого  $n$ -эдра в два цвета равно  $2^n$ . Их можно разделить на группы, в каждой из которых раскрашено  $m$  из  $n$  граней. В каждой такой группе  $C_n^m$  различных раскрасок. (Для симметричного полиэдра это число следует разделить на порядок группы автоморфизмов.)

Пусть для рудного зерна вероятность контакта его грани с другим рудным равна  $p$ , с нерудным  $1 - p$ . Тогда вероятность того, что  $m$  из  $n$  граней раскрашены в «рудный» цвет, равна  $p^m(1 - p)^{n-m}$ . Так как число раскрасок равно  $C_n^m$ , то вероятность того, что  $m$  граней полиэдра из  $n$  раскрашены в рудный цвет, равна  $C_n^m p^m(1 - p)^{n-m}$ . Пусть грани полиэдра примерно равны. Тогда «удельную» долю мономинеральных контактов рудного зерна определим как  $m/n$ .

В итоге получим закон дискретного распределения вероятности раскрытия мономинеральных контактов рудного зерна с  $n$  гранями:  $P(X = m/n) = C_n^m \times p^m (1 - p)^{n-m}$ . Ее математическое ожидание:

$$\begin{aligned} M(X) &= \sum_{i=0}^n \frac{i}{n} C_n^i p^i (1 - p)^{n-i} = \\ &= \frac{0}{n} C_n^0 p^0 (1 - p)^{n-0} + \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{i}{n} \frac{n!}{i! (n-i)!} p^i (1 - p)^{n-i} = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{(n-1)!}{(i-1)! (n-i)!} p^i (1 - p)^{n-i} = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{(n-1)!}{(i-1)! ((n-1) - (i-1))!} p p^{i-1} \times \\ &\quad \times (1 - p)^{(n-1) - (i-1)} = \\ &= p \sum_{j=0}^{n-1} \frac{(n-1)!}{j! ((n-1) - j)!} p^j (1 - p)^{(n-1) - j} = \\ &= p \sum_{j=0}^{n-1} C_{n-1}^j p^j (1 - p)^{(n-1) - j} = p. \end{aligned}$$

В результате легко угадывается биномиальное распределение с дисперсией случайной величины  $V(X = m/n) = p(1 - p)$ . Итак, удельная степень раскрытия мономинеральных контактов рудных зерен не зависит от их крупности (выраженной числом граней) и равна вероятности мономинерального рудного контакта. Результат верифицируется крайними случаями: в массивной руде  $p = 1$ , при рассеянии рудных зерен среди нерудных  $p = 0$ .

При дроблении руды межзерновые границы разрушаются. Для рудного зерна будем считать, что степень его раскрытия не меняется от того, отделилось ли от него другое рудное зерно. Но степень раскрытия меняется при отделении нерудного зерна. Будем считать контакт «руда – воздух» как «руда – руда». Пусть вероятность разрушения границы «руда – не руда» равна  $\beta$ . Рассмотрим  $n$ -полиэдр – рудное зерно, контактирующее с  $m$  рудными и  $n - m$  нерудными. При дроблении вероятность того, что  $r$  из  $n - m$  границ будут разрушены, равна  $C_{n-m}^r \beta^r (1 - \beta)^{(n-m)-r}$ . Общая степень раскрытия зерна будет равна  $(m + r) / n$ . Найдем для каждой раскраски рудного зерна его среднюю степень раскрытия  $Y$ :

$$\begin{aligned} M(Y) &= \sum_{i=0}^{n-m} \frac{m+i}{n} C_{n-m}^i \beta^i (1 - \beta)^{(n-m)-i} = \\ &= \sum_{i=0}^{n-m} \frac{m}{n} C_{n-m}^i \beta^i (1 - \beta)^{(n-m)-i} + \\ &\quad + \sum_{i=0}^{n-m} \frac{i}{n} C_{n-m}^i \beta^i (1 - \beta)^{(n-m)-i} = \\ &= \frac{m}{n} + \frac{n-m}{n} \sum_{i=0}^{n-m} \frac{i}{n-m} C_{n-m}^i \beta^i (1 - \beta)^{(n-m)-i} = \\ &= \frac{m}{n} + \frac{n-m}{n} \beta = \frac{\beta n + (1 - \beta)m}{n}. \end{aligned}$$

Подставим это значение в первое соотношение и найдем среднюю степень раскрытия рудного зерна при дроблении:

$$\begin{aligned} M(X) &= \sum_{i=0}^n \frac{\beta n + (1 - \beta)i}{n} C_n^i p^i (1 - p)^{n-i} = \\ &= \beta \sum_{i=0}^n C_n^i p^i (1 - p)^{n-i} + \\ &\quad + \sum_{i=0}^n \frac{(1 - \beta)i}{n} C_n^i p^i (1 - p)^{n-i} = \\ &= \beta + (1 - \beta) \sum_{i=0}^n \frac{i}{n} C_n^i p^i (1 - p)^{n-i} = \\ &= \beta + (1 - \beta)p. \end{aligned}$$

Проанализируем результат на крайних значениях. При  $\beta = 0$  дробление не улучшает раскрываемость рудных зерен и  $M(X) = p$ , т. е. удельной степени раскрытия. При  $\beta = 1$  все нерудные зерна отделяются от рудных и степень раскрытия рудных зерен равна  $M(X) = 1$ , т. е. имеет место их полное раскрытие. Последний результат можно записать в виде:  $p + \beta - \beta p$ , т. е. как вероятность  $P(A \cup B)$  объединения случайных событий:  $A$  – рудное зерно контактирует по данной границе с рудным,  $B$  – контакт «руда – не руда» по данной границе разрушен. Результат плох тем, что удельная раскрытость не есть раскрытость как таковая, ведь рудное зерно по-прежнему находится в горной породе. Пусть вероятность разрушения границы «руда – руда» как  $\alpha$ . Определим для каждой раскраски рудного зерна с  $m$  границами «руда – руда» и  $n - m$  границами «руда – не руда» среднюю степень раскрытия. Из  $m$  границ «руда – руда» в среднем разрушится:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=0}^m i C_m^i \alpha^i (1-\alpha)^{m-i} = \\
& = \sum_{i=1}^m i \frac{m!}{i!(m-i)!} \alpha^i (1-\alpha)^{m-i} = \\
& = \alpha m \sum_{i=1}^m \frac{(m-1)!}{(i-1)!((m-1)-(i-1))!} \times \\
& \quad \times \alpha^{i-1} (1-\alpha)^{(m-1)-(i-1)} = \\
& = \alpha m \sum_{j=0}^{m-1} C_{m-1}^j \alpha^j (1-\alpha)^{(m-1)-j} = \alpha m
\end{aligned}$$

границ. Из  $n - m$  границ «руда – не руда» в среднем разрушится  $\beta(n - m)$  границ. И средняя степень раскрытия зерна с данной раскраской равна  $(\alpha m + \beta(n - m)) / n$ . Подставим это значение в первое соотношение и найдем среднюю степень раскрытия рудного зерна при дроблении:

$$\begin{aligned}
M(X) &= \sum_{i=0}^n \frac{\alpha i + \beta(n-i)}{n} C_n^i p^i (1-p)^{n-i} = \\
&= \sum_{i=0}^n \frac{(\alpha - \beta)i + \beta n}{n} C_n^i p^i (1-p)^{n-i} = \\
&= (\alpha - \beta) \sum_{i=0}^n \frac{i}{n} C_n^i p^i (1-p)^{n-i} + \\
&+ \beta \sum_{i=0}^n C_n^i p^i (1-p)^{n-i} = (\alpha - \beta)p + \beta = \\
&= \alpha p + \beta(1-p).
\end{aligned}$$

Результат отличается от предыдущего множителем  $\alpha$  при вероятности  $p$ , а формула задает выпуклую комбинацию  $\alpha$  и  $\beta$  с коэффициентами  $p$  и  $1 - p$ . По статистике межзерновых контактов, т. е. вероятностям контактов  $p_{11}$  (руда – руда) и  $p_{12}$  (руда – не руда), вероятность  $p$  определяется так:  $p = p_{11} / (p_{11} + p_{12})$ .

### О геометрии горной породы

На рис. 2 дана барицентрическая диаграмма вероятностей бинарных контактов в биминеральной горной породе. Особенности

срастаний минеральных зерен (2 по поверхности, 3 по ребру, 4 в точке) не допускают условия  $p_{ч6} = 1$ , т. е. отсутствие мономинеральных контактов (3D-аналог шахматной доски). Покажем, что у этой вершины диаграммы есть целая область, в которую не может попасть фигуративная точка горной породы с непойкилитовой структурой. Имеет место строгое соотношение.

В непойкилитовой структуре биминеральной горной породы сетка межзерновых границ связна, и возможны 4 типа тройных контактов (рис. 2). Так как каждое ребро смежно двум вершинам, будем считать, что каждая привносит половину инцидентного ребра. Для типа «а» одна вершина дает 3 полуребра «1-1», итого  $e'_{11} = 3n_{111}$ , где  $n_{111}$  – число вершин «а». Для типа «б» число полуребер «1-1» равно  $e'_{11} = n_{112}$ , число полуребер «1-2» равно  $e'_{12} = 2n_{112}$ . Для типа «с» число полуребер «1-2» равно  $e'_{12} = 2n_{122}$ , число полуребер «2-2» равно  $e'_{22} = n_{122}$ . Для типа «д» число полуребер «2-2» равно  $e'_{22} = 3n_{222}$ . Суммируя, получим:  $e'_{11} = 3n_{111} + n_{112}$ ;  $e'_{12} = 2n_{112} + 2n_{122}$ ;  $e'_{22} = n_{122} + 3n_{222}$ . Из этих соотношений найдем  $e'_{12}$ :

$$\begin{aligned}
e'_{12} &= 2(e'_{11} - 3n_{111}) + 2(e'_{22} - 3n_{222}) = \\
&= 2(e'_{11} + e'_{22}) - 6(n_{111} + n_{222}).
\end{aligned}$$

Учитывая, что  $2E = e'_{11} + e'_{12} + e'_{22}$ , где  $E$  – число межзерновых контактов, а  $e'_{12} = 2e_{12}$ , где  $e_{12}$  – число ребер «1-2», последовательно получим:

$$\begin{aligned}
e'_{12} &= 2(2E - e'_{12}) - 6(n_{111} + n_{222}) = \\
&= 4E - 2e'_{12} - 6(n_{111} + n_{222}), \\
3e'_{12} &= 4E - 6(n_{111} + n_{222}), \quad 6e_{12} = 4E - 6(n_{111} + n_{222}), \\
e_{12} &= 2E/3 - (n_{111} + n_{222}), \quad p_{12} = 2/3 - (n_{111} + n_{222})/E.
\end{aligned}$$

Так как  $n_{111} + n_{222} \geq 0$ , то в непойкилитовой структуре всегда имеет место неравенство  $p_{12} \leq 2/3$ . На рис. 1 крайняя точка для цепочечных структур указывает именно это положение.

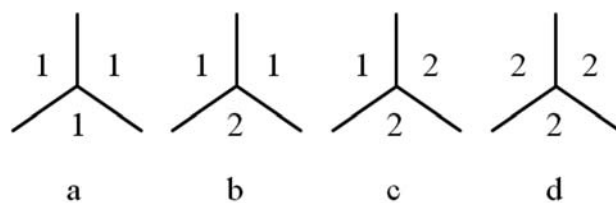


Рис. 2. Четыре типа тройных межзерновых контактов в биминеральной горной породе

Fig. 2. Four types of triple intergrain contacts in biminerall rock

## Заключение

Для описания структур и текстур горных пород и руд сегодня есть два подхода. Традиционный использует богатство языка для характеристики форм, размеров, морфологических особенностей сростаний и взаимного пространственного положения минеральных зерен и агрегатов. Второй, развиваемый авторами, ориентирован на математическую теорию. Петрографические структуры рассматриваются как системы межзерновых границ с акцентом на статистиках вероятностей межзерновых контактов. В алгебраических категориях построены классификация и увязанная с ней номенклатура петрографических структур. По-видимому, традиционный подход идейно исчерпан, математическая теория – в стадии активного становления. Выше показано, что разумные предположения о характере сростаний рудных и нерудных минералов (проверяемые под микроскопом, сопровождаемые подсчетом вероятностей контактов) позволяют строить нетривиальные математические модели, в свою очередь, требующие практической проверки.

## Литература

Беленький В. З. Геометрико-вероятностные модели кристаллизации. Феноменологический подход. М.: Наука, 1980. 88 с.

Бродская Р. Л. Термодинамические (кинетические) критерии формирования и эволюции структур минеральных агрегатов // Записки ВМО. 1988. № 5. С. 623–633.

Вернон Р. Х. Метаморфические процессы. М.: Недра, 1980. 228 с.

Войтеховский Ю. Л. К проблеме организации горных пород // Известия вузов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 34–39.

Войтеховский Ю. Л. Приложение теории квадратных форм к проблеме классификации структур полиминеральных горных пород // Известия вузов. Геология и разведка. 1995. № 1. С. 32–42.

Войтеховский Ю. Л. Количественный анализ петрографических структур: метод структурной индикатрисы и метод вычитания аксессуариев // Известия вузов. Геология и разведка. 2000. № 1. С. 50–54.

Войтеховский Ю. Л., Захарова А. А. Массивная текстура горной породы: гранит массива Акжайляу, Казахстан // Математические исследования в естественных науках: Труды XV Всерос. научн. школы. Апатиты: К&М, 2018. С. 56–57. doi: 10.31241/MIEN.2018.15.07

Войтеховский Ю. Л., Захарова А. А. Моделирование петрографических структур // Вестник геонаук. 2020. № 10. С. 38–42. doi: 10.19110/geov.2020.10.5

Войтеховский Ю. Л., Захарова А. А. Статистическое описание структур и текстур амфиболитов островов Керетского архипелага (Белое море)

// Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 2. С. 44–50. doi: 10.17076/geo1355

Войтеховский Ю. Л., Захарова А. А., Климоченков М. Д. Моделирование петрографических структур. Статья 2 // Вестник геонаук. 2020. № 12. С. 32–35. doi: 10.19110/geov.2020.12.3

Войтеховский Ю. Л., Припачкин П. В. Использование статистических методов для расчленения разреза Фёдорово-Панского интрузива // Отечественная геология. 2001. № 2. С. 48–52.

Захарова А. А., Войтеховский Ю. Л. Методика прогнозирования обогатимости апатитовых руд (Кировский рудник, Кольский полуостров) // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 27–30. doi: 10.17580/or.2022.01.05

Захарова А. А., Войтеховский Ю. Л. Статистический прогноз параметров обогащения руд по наблюдениям в шлифах // Обогащение руд. 2024. № 2. С. 27–31. doi: 10.17580/or.2024.02.05

Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / Гл. ред. О. А. Богатиков, О. В. Петров, отв. ред. Л. Н. Шарпенюк. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 200 с.

Петрографический словарь / Ред. В. П. Петров и др. М.: Недра, 1981. 496 с.

Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1958. 446 с.

## References

Belenkii V. Z. Geometric-probabilistic models of crystallization. Phenomenological approach. Moscow: Nauka; 1980. 88 p. (In Russ.)

Bogatikov O. A., Petrov O. V., Sharpenok L. N. (eds.). Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, impact formations. St. Petersburg: VSEGEI; 2008. 200 p. (In Russ.)

Brodskaya R. L. Thermodynamic (kinematic) criteria of formation and evolution of mineral aggregates structures. *Zapiski VMO = Proceed. Rus. Mineral. Soc.* 1988;5:623–633. (In Russ.)

Petrov V. P. et al. (eds.). Petrographic dictionary. Moscow: Nedra; 1981. 496 p. (In Russ.)

Saltykov S. A. Stereometric metallography. Moscow: Metallurgiya; 1958. 446 p. (In Russ.)

Vernon R. H. Metamorphic processes. Moscow: Nedra; 1980. 228 p. (In Russ.)

Voytekhovskiy Yu. L. Application of the quadratic forms theory to the problem of classification of polymineral rocks structures. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka = Proceed. of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration.* 1995;1:32–42. (In Russ.)

Voytekhovskiy Yu. L. Quantitative analysis of petrographic structures: structural indicatrix and accessory subtraction methods. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka = Proceed. of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration.* 2000;1:50–54. (In Russ.)

Voytekhovskiy Yu. L. To the problem of the organization of rocks. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka = Proceed. of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration.* 1991;10:34–39. (In Russ.)

Voytekhovskiy Yu. L., Pripachkin P. V. The use of statistical methods for the dismemberment of the



section of the Fedorova-Pansky intrusion. *Otechestvennaya geologiya = National Geology*. 2001;2: 48–52. (In Russ.)

Voytekhovskiy Yu. L., Zakharova A. A. Massive texture of a rock: granite of the Akzhailau massif, Kazakhstan. *Matematicheskie issledovaniya v estestvennykh naukakh: Trudy XV Vseros. nauchn. shkoly = Math. Invest. in Natural Sci.: Proceed. 15<sup>th</sup> Russ. Sci. School*. Apatity: K&M; 2018. P. 56–57. (In Russ.). doi: 10.31241/MIEN.2018.15.07

Voytekhovskiy Yu. L., Zakharova A. A. Modeling petrographic structures. *Vestnik geonauk = Vestnik of Geosciences*. 2020;10:38–42. (In Russ.). doi: 10.19110/geov.2020.10.5

Voytekhovskiy Yu. L., Zakharova A. A. Statistical description of structures and textures of amphibolites of the islands of the Keret Archipelago (White Sea).

*Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2021;2:44–50. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1355

Voytekhovskiy Yu. L., Zakharova A. A., Klimochkov M. D. Modeling petrographic structures. Paper 2. *Vestnik geonauk = Vestnik of Geosciences*. 2020;12: 32–35. (In Russ.). doi: 10.19110/geov.2020.12.3

Zakharova A. A., Voytekhovskiy Yu. L. Methodology for predicting the enrichment of apatite ores (Kirovsky mine, Kola Peninsula). *Obogashchenie rud = Mineral Processing Journal*. 2022;1:27–30. (In Russ.). doi: 10.17580/or.2022.01.05

Zakharova A. A., Voytekhovskiy Yu. L. Statistical forecast of ore dressing parameters based on observations in the sections. *Obogashchenie rud = Mineral Processing Journal*. 2024;2:27–31. (In Russ.). doi: 10.17580/or.2024.02.05

Поступила в редакцию / received: 24.04.2024; принята к публикации / accepted: 30.08.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Войтеховский Юрий Леонидович**

д-р геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой геологии и геоэкологии

e-mail: vojtehovskij@herzen.spb.ru

**Степенщиков Дмитрий Геннадьевич**

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник

e-mail: dm706390@mail.ru

**Захарова Алена Александровна**

канд. геол.-мин. наук, ассистент кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии

e-mail: zakharova.alena27614@gmail.com

#### CONTRIBUTORS:

**Voytekhovskiy, Yury**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of Department of Geology and Geoecology

**Stepenschikov, Dmitry**

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

**Zakharova, Alyona**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Assistant, Department of Mineralogy, Crystallography and Petrography

УДК 553.53 (470.22)

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ РАДОНА-222 В ПРЕДЕЛАХ ОНЕЖСКОЙ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОЙ СТРУКТУРЫ, РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ

**А. М. Ильин, А. В. Шмаков\*, Д. Р. Семочкин**

*Петрозаводский государственный университет (пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), \*shav@microklin.ru*

Исследованы проявления объемной активности изотопа радона  $^{222}\text{Rn}$  на карьерах по добыче каменных строительных материалов, расположенных в пределах интрузивов габбро-долеритов Онежской палеопротерозойской структуры на территории Кондопожского и Прионежского районов Республики Карелия. Изменение активности  $^{222}\text{Rn}$  изучено также вне действующих карьеров вдоль простирающихся известных геологических разломов и вблизи урановых рудопроявлений, приуроченных к кварцитопесчаникам шокшинской и петрозаводской свит. Измерения объемной активности проводились с использованием комплекса «Альфарад+ АРП» на открытом пространстве и в помещениях методом подсчета альфа-распадов в ионизационной камере с экспозицией 20 мин. Экспериментальные данные были получены в соответствии с аттестованными для этих комплексов методиками. Наблюдения выполнялись на открытом пространстве действующих карьеров с измерениями изотопа радона до взрыва и после взрыва. Полученные результаты позволяют предположить наличие связи между сейсмическим воздействием на горный массив и изменением концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе. Также выявлены ураганные концентрации  $^{222}\text{Rn}$ , которые можно связать с известной ураноносностью горных пород исследуемого района.

Ключевые слова: изотоп радона-222; объемная активность; карьеры; каменные строительные материалы; Республика Карелия

Для цитирования: Ильин А. М., Шмаков А. В., Семочкин Д. Р. Исследования проявлений радона-222 в пределах Онежской палеопротерозойской структуры, Республика Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 6. С. 58–67. doi: 10.17076/geo1955

## **A. M. Ilyin, A. V. Shmakov\*, D. R. Semochkin. STUDIES OF RADON-222 OCCURRENCES WITHIN THE ONEGA PALAEOPROTEROZOIC STRUCTURE, REPUBLIC OF KARELIA**

*Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*shav@microklin.ru*

The volumetric activity of the radon isotope  $^{222}\text{Rn}$  in quarries mined for stone building materials within gabbro-dolerite intrusions of the Onega Palaeoproterozoic structure in the Kondopozhsky and Prionezhsky Districts of the Republic of Karelia was studied. Also, changes in the activity were explored along the highway running along the southwestern shore of Lake Onego, considering the known geological faults and uranium ore occurrences

in quartzite sandstones of the Shoksha and Petrozavodsk suites. Volumetric activity measurements were conducted using the Alfarad+ ARP system outdoors and indoors by counting alpha decays in an ionization chamber during 20 min exposure. Experimental data were obtained using the techniques certified for such systems. Radon isotope measurements were taken in open spaces of active quarries before and after blasting. The results suggest there is a connection between the seismic impact on the rock massif and changes in  $^{222}\text{Rn}$  concentration in the air. We have also detected outlier concentrations of  $^{222}\text{Rn}$ , which can be associated with the known uranium content of rocks in the studied area.

**Keywords:** radon-222 isotope; volumetric activity; quarry; stone building materials; Republic of Karelia

For citation: Ilyin A. M., Shmakov A. V., Semochkin D. R. Studies of radon-222 occurrences within the Onega Palaeoproterozoic structure, Republic of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 6. P. 58–67. doi: 10.17076/geo1955

## Введение

Радон (Rn) – это радиоактивный газ природного происхождения. Он образуется в процессе природного радиоактивного распада изотопов уранового ряда, присутствующих во всех горных породах и почвах [Титов и др., 2000]. Радон высвобождается в воздух с образованием радиоактивных частиц. Наиболее долгоживущим и устойчивым из четырех природных изотопов радона ( $^{218}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ) является изотоп  $^{222}\text{Rn}$  (с периодом полураспада ( $T_{1/2}$ ) = 3,8 суток). От 40 до 90 % излучения среди всех природных источников приходится на долю радона и дочерних продуктов его распада [Киселев и др., 2019; Карпин, 2020].

Единицей измерения радиоактивности является беккерель (Бк). Принято считать, что концентрация радона в воздухе равна числу радиоактивных распадов в секунду в одном кубическом метре воздуха (Бк/м<sup>3</sup>). Уровни концентрации радона имеют широкий диапазон значений – от первых единиц до более 10 000 Бк/м<sup>3</sup> [Жуковский, 2009]. Геохимической особенностью кристаллических горных пород является содержание в том или ином количестве урана, входящего в состав породообразующих минералов. Транспортировка радона зависит от флюида и в значительной мере – от текстурно-структурных особенностей горных пород – проницаемости, порового пространства, трещиноватости [Ball et al., 1991]. Также на перенос  $^{222}\text{Rn}$  могут оказывать влияние метеорологические факторы, такие как скорость ветра и вертикальное перемешивание воздушных масс [Paatero et al., 2023].

Прямое влияние на эманацию радона из горных пород оказывает их структурная и текстурная неоднородность, степень разуплотнения, наличие зон тектонических нарушений в пределах отдельных массивов. Исследования влияния

геологических факторов на концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в Норвегии показали, что выходящие на дневную поверхность коренные породы, представленные гранитами и глиноземистыми сланцами, характеризуются повышенным содержанием радия, а высокопроницаемые рыхлые отложения (флювиогляциальные и речные) являются наиболее радоноопасными [Sundal et al., 2004]. В свою очередь, на территории Финляндии наиболее большие источники U и Rn приурочены к гранитам и мигматитам с обильными пегматитовыми жилами [Lahermo, Juntunen, 1991]. Известны случаи, когда в районе залегания богатых торием докембрийских карбонатитовых пород также были установлены высокие (до 1200 Бк/м<sup>3</sup>) значения уровня  $^{222}\text{Rn}$  [Sundal, Strand, 2004].

Согласно Нормам радиационной безопасности НРБ 99/2009 (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) установлены предельные допустимые среднегодовые значения эквивалентной равновесной объемной активности радона и его дочерних продуктов распада в воздухе жилых и общественных зданий: 100 Бк/м<sup>3</sup> в строящихся и реконструируемых зданиях, а также зданиях, строительство которых осуществлялось после 1991 г.; 200 Бк/м<sup>3</sup> в эксплуатируемых зданиях, построенных до 1991 г. Для сравнения, измерение содержания радона в помещениях на территории Финляндии показало, что для примерно 30 % домов зарегистрированы концентрации выше 400 Бк/м<sup>3</sup> [Castren et al., 1985]. Активная добыча нерудных полезных ископаемых, таких как щебень и блочный камень, вероятно, также приводит к увеличению концентрации изотопа  $^{222}\text{Rn}$  в близповерхностном воздушном пространстве. Это может происходить вследствие формирования зон разуплотнения массивов пород при проведении горно-взрывных работ, в результате чего активизируются процессы эксхалляции радона [Булашевич и др., 1996; Уткин, Юрков, 2009; Козлова и др., 2022].

Таким образом, территорию Республики Карелия с точки зрения активности радона следует рассматривать в качестве потенциально опасной вследствие как особенностей геологического строения, так и развитой горнодобывающей отрасли. В настоящей работе представлены результаты исследования проявлений  $^{222}\text{Rn}$  в пределах Онежской палеопротерозойской структуры на территории Прионежского и Кондопожского районов Республики Карелия. В задачи исследования входило получение массива экспериментальных данных на открытых пространствах действующих карьеров по добыче каменных строительных материалов и последующий мониторинг концентраций  $^{222}\text{Rn}$  в моменты до и после промышленного взрыва, а также наблюдения в области развития уранового оруденения в Западном Прионежье.

## Материалы и методы

Регистрация объемной активности (ОА) радона проводилась с использованием комплекса «Альфарад+ АРП» (ООО «НТМ-Защита», Россия) в режиме ОА-20. В этом режиме осуществляется отбор пробы воздуха с поверхности с помощью встроенной воздуходувки в течение 3 минут, измерение ОА радона с экспозицией 20 минут, обработка полученных результатов и вывод их на экран. Значение ОА радона вычисляется по окончании измерения. Прибор позволяет измерять ОА радона до  $2 \times 10^6$  Бк/м<sup>3</sup>. Измерение ОА  $^{222}\text{Rn}$  основано на электростатическом осаждении заряженных ионов  $^{218}\text{Po}$  (RaA) из отобранной пробы воздуха на поверхность полупроводникового детектора. Определение ОА для  $^{222}\text{Rn}$  выполняется по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде атомов RaA, осевших на полупроводниковом детекторе. Экспериментальные данные были получены в соответствии с аттестованными для этих комплексов методиками.

Полевые измерения  $^{222}\text{Rn}$  проводились на территории действующих карьеров «Суна», «Большая Уя», «Другоречское-2», где регулярно выполняются взрывные работы. Расположение карьеров указано на обзорной геологической карте (рис. 1). Измерения ОА радона проводились на локальных участках открытого пространства карьеров (подшвы горизонтов) и в производственных помещениях (бытовые комплексы) методом подсчета альфа-распадов в ионизационной камере.

Месторождение щебня «Суна» расположено в Кондопожском районе Республики Карелия недалеко от с. Янишполе к юго-западу от г. Кондопога (N62°09'31", E34°11'18").

Полезная толща месторождения сложена интрузивными породами палеопротерозойского габбродолеритового дайкового комплекса. В структурном отношении эти породы приурочены к восточному крылу антиклинальной структуры третьего порядка, ось которой проходит западнее участка месторождения. Крылья антиклинали сложены мелкозернистыми диабазами, диабазовыми порфиритами, миндалекаменными диабазами, крупно-среднекристаллическими габбро и габбродиабазами. Мощность силла варьирует от 50 до 200 м [Кайряк, 1964; Михайлов, 1981]. Тектонических нарушений, влияющих на структуру участка, в пределах месторождения «Суна» не установлено [Дегтярев, 2006].

Месторождение щебня «Большая Уя» находится в Прионежском районе Республики Карелия в 5 км юго-восточнее ж/д станции Деревянка (N61°31'01", E34°32'13"). Месторождение располагается в юго-западной части Онежской структуры, приурочено к дайковому комплексу палеопротерозойского возраста, залегающему в виде мощного силла в кварцитопесчаниках шокшинской свиты. Полезная толща месторождения представлена массивными мелко-среднезернистыми и среднезернистыми габбродолеритами, разбитыми вертикальными и горизонтальными трещинами отдельности. Структура массива габбродолеритов имеет блоковое строение, обусловленное смещениями по зонам мощных тектонических разломов, рассекающих породы с северо-востока на юго-запад. Интенсивность удельной трещиноватости по данным ранее проведенных работ составила 2,25 м/м<sup>2</sup> (сильнотрещиноватые породы) [Торицын, 2009].

Месторождение облицовочного камня «Другоречское-2» также располагается в пределах юго-западной части Онежской структуры (N61°15'14", E35°33'36"). Разлом, обрамляющий месторождение с северо-запада, образует крутой склон грядобразной возвышенности над долиной реки Другая. В геологическом аспекте месторождение «Другоречское-2» представляет собой участок силла, сложенный габбродолеритом субширотного простирания с видимой мощностью около 60 м [Тыркин, 2016].

Следует отметить, что выбор для изучения месторождений «Большая Уя» и «Другоречское-2» обусловлен их активным промышленным использованием и наличием различно проницаемых участков и тектонических зон в пределах горных массивов. Кроме того, для изучаемой территории характерна ураноносная минерализация в сероцветных песчаниках, которая потенциально может служить эндогенным источником радона [Онежская..., 2011].

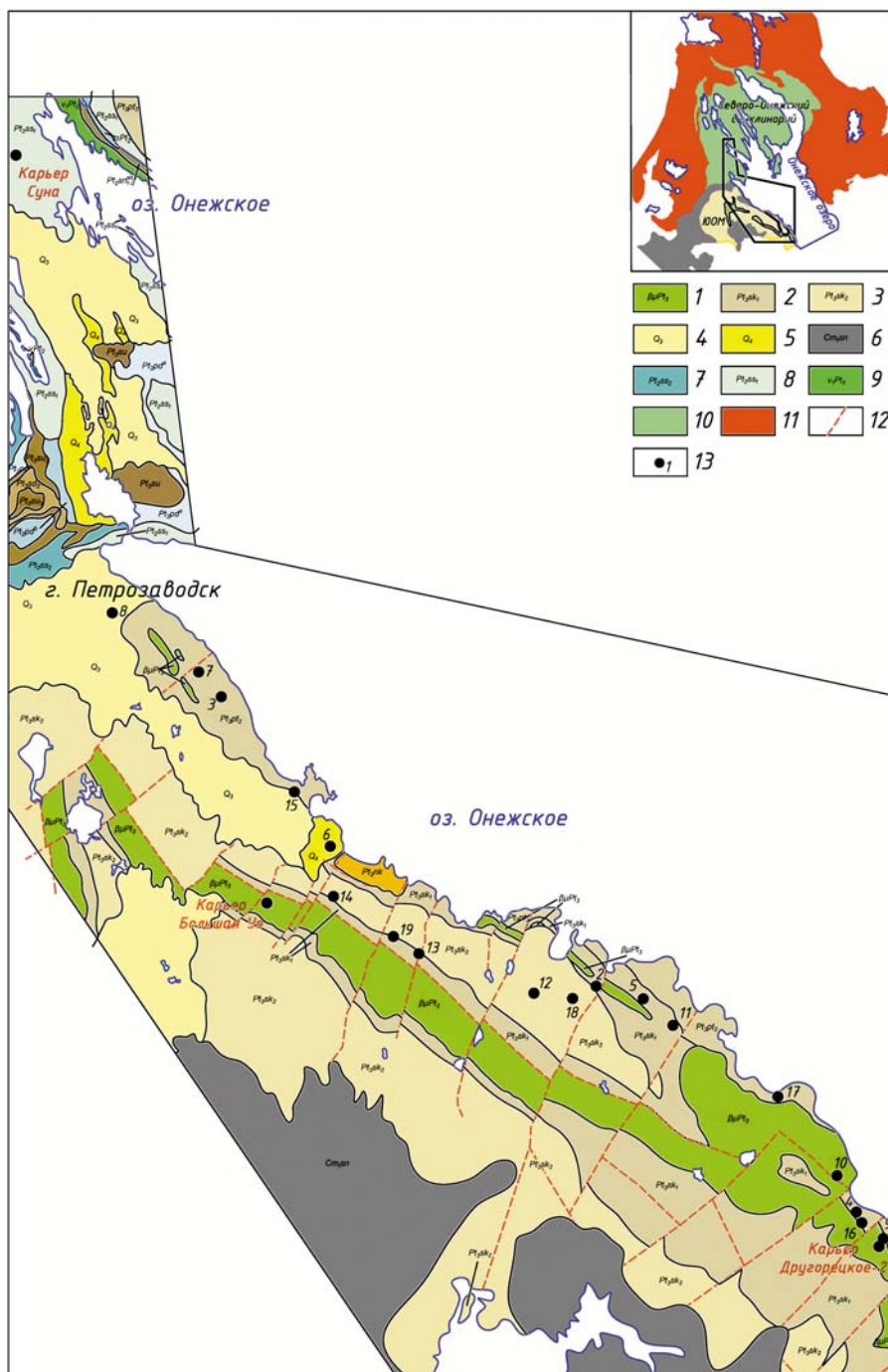


Рис. 1. Обзорная карта с указанием точек наблюдения. Фрагмент государственной геологической карты масштаба 1:200000, листы Р-36-ХVII, Р-36-ХХIII, Р-36-ХХIV, Р-36-ХХIX, Р-36-ХХХ. Масштаб 1:500000:

1) sillы габбродолеритов в Онежской структуре; 2) Шокшинская свита. Нижняя подсвита. Розовые и красные кварцитопесчаники, глинистые сланцы, алевролиты и конгломераты; 3) Шокшинская свита. Верхняя подсвита. Косослоистые, гравелитистые красные песчаники, конгломераты. Малиновые и розовые кварцитопесчаники и конгломераты; 4) верхний отдел. Ледниковые валунные супеси; 5) четвертичные образования; 6) нерасчлененные саргаевский и пашинский горизонты глин; 7) Суйсарская свита. Нижняя подсвита. Афанитовые метапорфириты, туфобрекчии; 8) Суйсарская свита. Нижняя подсвита. Афанитовые, альбитовые, альбито-пироксеновые, пикритовые порфириты и туфосланцы; 9) ранние среднепротерозойские диабазы и габбродиабазы; 10) центральная часть бассейна Онежского озера с проявлениями мантийно-плюмового магматизма; 11) Водлозерский террейн: мезонеоархейская континентальная кора с реликтами палеоархейской; 12) крупные тектонические нарушения; 13) расположение точек наблюдения

Fig. 1. Overview map showing the observation points. A fragment of the state geological map at a scale of 1:200,000, sheets P-36-XVII, P-36-XXIII, P-36-XXIV, P-36-XXIX, P-36-XXX. Scale 1:500,000:

1) gabbrodolerite sills within the Onega structure; 2) Shoksha suite. The lower subsuite. Pink and red quartzite-sandstones, clay shales, siltstones and conglomerates; 3) Shoksha suite. The upper subsuite. Obliquely layered, gravelly red sandstones, conglomerates. Crimson and pink quartzite sandstones and conglomerates; 4) upper section. Glacial boulder sandy loams; 5) Quaternary formations; 6) the undifferentiated Sargaevsky and Pashinsky horizons of clays; 7) Suisar suite. The lower subsuite. Aphanite metaporphyrites, tufobrecchia; 8) Suisar suite. The lower subsuite. Aphanite, albite, albite-pyroxene, picrite porphyrites and tuff shale; 9) early Middle Proterozoic diabases and gabbro-diabases; 10) the central part of the Lake Onega basin with manifestations of mantle-plume magmatism; 11) Vodlozersky terrane: Mesoneoarchean continental crust with Paleoproterozoic relics; 12) large tectonic disturbances; 13) location of the observation points

Дополнительно были произведены измерения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  вне действующих месторождений каменных строительных материалов в Прионежском районе вдоль трассы А-215 (рис. 2). Трасса проходит вдоль юго-западной

части Онежской структуры, ее направление совпадает с простираем крупного Прионежского разлома [Онежская..., 2011]. Предполагалось, что разломные зоны выступают путями миграции радона.

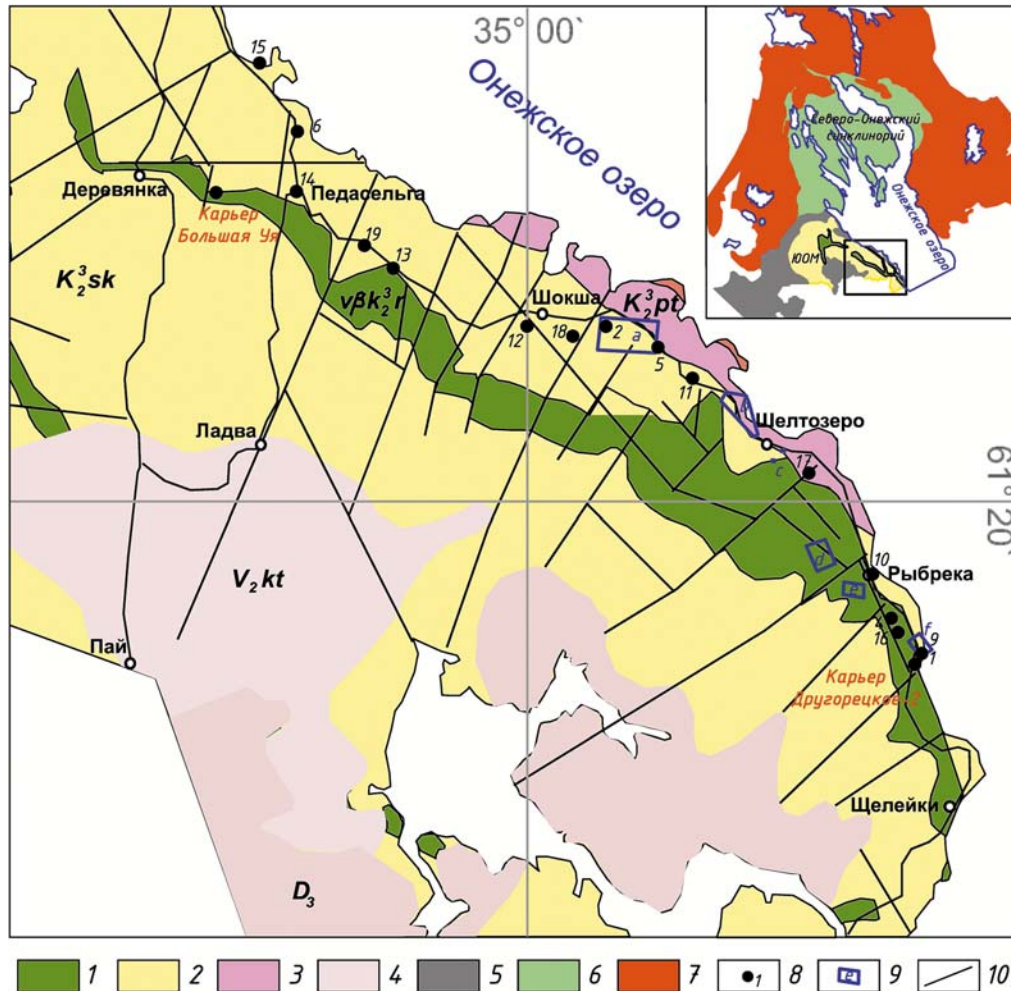


Рис. 2. Расположение разрывных нарушений в южной части Прионежского района [Кевель, Романишко, 1988] с дополнениями авторов. Масштаб 1:500 000:

1) нерасчлененная шокшинская свита песчаников, кварцитопесчаников, конгломератов, алевролитов; 2) нерасчлененная Петрозаводская свита кварцитопесчаников, песчаников, конгломератов; 3) Ропручейский интрузивный комплекс габбродолеритов, мелкозернистых диабазов; 4) нерасчлененные саргаевский и пашинский горизонты глин; 5) чехол Русской плиты Восточно-Европейской платформы; 6) центральная часть бассейна Онежского озера с проявлениями мантийно-плюмового магматизма; 7) Водлозерский террейр: мезонеоархейская континентальная кора с реликтами палеоархейской; 8) расположение точек наблюдения; 9) урановые проявления: а – аномалия Ишанино, b – рудопроявление Вехручей, с – аномалия Шелтозерка, d – рудопроявление Рыбрека, e – аномалия Южная Рыбрека, f – рудопроявление Другая Река; 10) крупные тектонические нарушения

Fig. 2. Location of the discontinuous faults in the southern part of the Prionezhsky District [Kevel', Romaniushko, 1988, with the authors' additions]. Scale 1:500,000:

1) the undifferentiated Shoksha suite of sandstones, quartzite sandstones, conglomerates, siltstones; 2) the undifferentiated Petrozavodsk suite of quartzite sandstones, sandstones, and conglomerates; 3) Ropruchey intrusive complex of gabbrodolerites, fine-grained diabases; 4) the undifferentiated Sargaevsky and Pashinsky horizons of clay; 5) the cover of the Russian plate of the Eastern European Platform; 6) the central part of the Lake Onega basin with manifestations of mantle-plume magmatism; 7) Vodlozersky terrane: Mesoneoarchean continental crust with relics of Paleoarchean; 8) location of the observation points; 9) Uranium manifestations: a – Ishanino Anomaly, b – Vekhruchey ore occurrence, c – Sheltozerka Anomaly, d – Rybreka ore occurrence, e – Yuzhnaya Rybreka Anomaly, f – Drugaya Reka ore occurrence; 10) major tectonic disturbances

## Результаты

Исследования на площади действующих карьеров по добыче каменных строительных материалов показали изменение концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе в пространстве и времени (табл. 1). Достаточно четко выявляется разность активности  $^{222}\text{Rn}$  до и после проведения взрывных работ. Однако на месторождении «Суна» (площадка ДСЗ) было обнаружено падение ОА радона почти в пять раз, тогда как на месторождениях «Большая Уя» (подошва карьера) и «Другорецкое-2» (подошва карьера), напротив, зафиксировано увеличение ОА примерно в 12 раз. Наблюдения в помещениях-бытовках показали значительно меньшее увеличение ОА, которое сохранилось в пределах НРБ. Этот факт может свидетельствовать о том, что большая часть выделившегося после взрыва радона переносится за пределы карьера воздушными потоками.

Полученные данные подтверждают влияние техногенных сейсмических воздействий на интенсивность эксхалляции радона. При этом изменение напряженного состояния массива и трансформация трещинно-порового

пространства горных пород может приводить как к увеличению, так и к снижению ОА. Это можно объяснить изменением напряженного состояния трещинно-порового пространства, сопутствующим перераспределением грунтовых вод и ускорением процессов диффузии в горной породе [Козлова и др., 2022].

Дополнительные измерения ОА  $^{222}\text{R}$  были проведены вдоль трассы А-215 на открытых пространствах. Точки измерения выбирались приближенно к нахождению известных тектонических разломов (рис. 2). Южная часть Прионежского района Республики Карелия в структурно-тектоническом плане является одной из составляющих Прионежской синеклизы, пересеченной рядом мощных тектонических разломов, рассекающих породы с северо-востока на юго-запад. Разломы пересекают урановые аномалии (Ишанино, Шелтозерка, Южная Рыбрека) и рудопроявления урана (Рыбрека, Другая Река, Вехручей) [Громов и др., 1982], которые могут служить естественным источником радона.

По результатам наблюдений зафиксированы ураганные значения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе в районе р. Яни, д. Ишанино, 68 км трассы

Таблица 1. Результаты наблюдений на карьерах

Table 1. The results of the observations at the quarries

Карьер Quarry	Дата/Время Date/Time, 2023 г.	Расположение точки наблюдения Location of the observation point	Объемная активность, погрешность, Бк/м <sup>3</sup> Volumetrical activity, measurement error, Bq/m <sup>3</sup>
Большая Уя Bolshaya Uya	03.03/13:45	Бытовка до взрыва The cabin before the explosion	7 ± 10
	03.03/14:20	Подошва карьера до взрыва The sole of the quarry before the explosion	21 ± 15
	03.03/14:44	Площадка ДСЗ* The site of the crushing and screening plant	14 ± 13
	03.03/16:30	Подошва карьера после взрыва The sole of the quarry after the explosion	178 ± 55
	03.03/16:35	Бытовка The cabin	< 1
Суна Sunu	07.03/6:43	«	31 ± 21
	07.03/9:42	«	32 ± 22
	07.03/9:55	Площадка ДСЗ до взрыва The site of the crushing and screening plant before the explosion	917 ± 183
	07.03/11:31	Площадка ДСЗ после взрыва The site of the crushing and screening plant after the explosion	188 ± 25
	07.03/12:21	Бытовка The cabin	77 ± 34
Другорецкое-2 Drugoretskoye-2	12.03	Подошва карьера до взрыва The sole of the quarry before the explosion	6 ± 9
	12.03	Бытовка The cabin	56 ± 28
	12.03	Подошва карьера после взрыва The sole of the quarry after the explosion	100 ± 39

Примечание. \*ДСЗ – дробильно-сортировочный завод.

A-215 (табл. 2). Данные, приведенные в табл. 2, отличаются значительной вариативностью, что указывает на пространственную неоднородность эманиции радона из геологической среды в атмосферу. Наличие ураганных значений ОА  $^{222}\text{R}$  свидетельствует о возможной высокой

эманацирующей способности пород Онежской структуры, связанной с урановыми рудопроявлениями и/или крупными разломами. Однако отсутствие повторяемости, как, например, в точке «54 км» или точке «д. Ишанино», подчеркивает непостоянство потока радона.

Таблица 2. Результаты наблюдений вдоль трассы А-215

Table 2. The results of the observations along the A-215 highway

№ No.	Координаты Coordinates WGS84		Дата/Время Date/Time, 2023 г.	Расположение Location	Объемная активность, погрешность, Бк/м <sup>3</sup> Volumetrical activity, measurement error, Bq/m <sup>3</sup>
	N	E			
1	61.24542	35.58582	17.06/11:07	Другорецкое-2 Drugoretskoye-2	62 ± 33
2	61.45937	35.12666	17.06/12:36	р. Яни Yani River	271409 ± 54281
3	61.70829	34.50713	17.06	г. Петрозаводск Petrozavodsk	< 1
4.1	61.26719	35.54186	24.06/13:30	Дорога А-215, 54 км Road A-215, 54 km	29344 ± 5868
4.2	«	«	04.08/13:28	«	< 1
4.3	«	«	23.08/12:38	«	< 1
4.4	«	«	30.09/13:54	«	9 ± 13
4.5	«	«	11.10/15:11	«	< 1
5.1	61.44644	35.20294	24.06/14:41	д. Ишанино village Ishanino	324632 ± 64926
5.2	«	«	04.08/12:38	«	10 ± 14
6	61.58358	34.68251	24.06/15:05	Ерошкина Сельга Eroshkina selga	7373 ± 1494
7	61.72910	34.46999	24.06/15:29	д. Ужесельга Uzheselga village	< 1
8	61.77944	34.32627	24.06/17:01	г. Петрозаводск Petrozavodsk	< 1
9	61.24461	35.58458	29.06/13:59	Другорецкое-2 Drugoretskoye-2	< 1
10	61.29756	35.51273	29.06/19:32	д. Рыбрека Rybreka village	26502 ± 5300
11	61.42595	35.25222	29.06/19:57	д. Вехручей Vekhruchey village	18796 ± 3759
12.1	61.45751	35.01670	29.06/20:24	д. Шокша village Shoksha	< 1
12.2	«	«	04.08/14:01	«	34 ± 26
12.3	«	«	23.08/12:38	«	< 1
12.4	«	«	30.09/13:24	«	< 1
12.5	«	«	11.10/14:41	«	< 1
12.6	«	«	15.10/9:30	«	8 ± 11
13	61.49349	34.82509	29.06/20:50	ручей Вантик Vantik stream	1036 ± 207
14	61.54292	34.68446	29.06/21:14	п. Педасельга village Pedaselga	7297 ± 1459
15	61.62885	34.62529	29.06/21:41	с. Деревянное village Derevyannoye	< 1
16	61.25823	35.55006	30.07/07:35	д. Другая Река village Drugaya Reka	66586 ± 13317
17	61.36406	35.41989	30.07/17:31	Дорога А-215 68 км Road A-215 68 km	1428545 ± 285709
18	61.45175	35.08172	30.07/17:56	д. Шокша village Shoksha	22172 ± 4434



## Обсуждение

На предприятиях по добыче каменных строительных материалов в Республике Карелия измерения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе ранее не проводились. Полученные данные измерений на карьерах позволяют предположить наличие связи между сейсмическим воздействием на горный массив и изменением концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе. Исследования других авторов [Семинский, Семинский, 2020; Козлова и др., 2022] показывают умеренное прямое влияние природной и техногенной сейсмичности на последующие всплески радоновой активности. Полученные результаты на карьерах показали соответствие концентрации радона существующим нормам радиационной безопасности.

Дальнейшие исследования на горнодобывающих предприятиях Республики Карелия требуют использования методик непрерывных мониторинговых наблюдений (установка на площадках наблюдения станций, оснащенных сейсмическими датчиками, метеодатчиками и радиометрами объемной активности  $^{222}\text{Rn}$ ) для уточнения обнаруженных зависимостей. Полученные данные дают информацию для создания карт локального радонового потенциала территорий Прионежского и Кондопожского районов Республики Карелия, а также для разработки новых геоэкологических рекомендаций по организации добычных работ на карьерах. Кроме того, поиск и локализация пространственного положения радоновых аномалий позволяет уточнять разломные зоны. Активная разработка нерудных полезных ископаемых (прежде всего щебня методом массовых взрывов) на территориях расположенных здесь карьеров может провоцировать выбросы  $^{222}\text{Rn}$  и быть связана с повышенными уровнями его объемной активности.

Установленные области высоких концентраций  $^{222}\text{Rn}$  вдоль трассы в первом приближении можно объяснить известной ураноносностью кварцитопесчаников Шокшинской и Петрозаводской свит. Однако полученные замеры отличаются слабой повторяемостью, поэтому условия выбросов больших объемов  $^{222}\text{Rn}$  в атмосферу пока неясны. Попытки привязать выбросы  $^{222}\text{Rn}$  к метеорологическим условиям результатов не дали в связи с высокой дискретностью и недостаточным объемом измерений. Необходимо организация измерений с использованием методик непрерывного наблюдения. Также следует отметить, что во время измерений происходил капитальный ремонт федеральной трассы А-215 с отсыпкой дорожного полотна

щебнем с месторождения «Большая Уя». Большое количество пыли могло повлиять на регистрируемую ОА.

## Заключение

В результате проведенных исследований установлены концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в атмосфере на территории карьеров нерудных строительных материалов в Прионежском и Кондопожском районах Республики Карелия. Полученные данные позволяют предположить существование связи между сейсмическим воздействием на горный массив и изменением концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе. Также следует констатировать возможность существования эпизодических ураганных концентраций радона в Прионежском районе Республики Карелия, природа и механизм возникновения которых пока не выяснены. Количество и дискретность проведенных измерений позволяют считать их предварительными, но пригодными для выявления признаков радонового загрязнения исследованных участков. Дальнейшее развитие данного направления в Республике Карелия является актуальным, поскольку геологическое строение и активное развитие горнодобывающей отрасли способствуют повышенной эманации радона в регионе. А наиболее значительный вклад в величину среднего индивидуального пожизненного радиационного риска для населения Российской Федерации вносит облучение радоном и дочерними продуктами его распада в воздухе помещений [О состоянии..., 2023]. Республика Карелия по данному фактору риска имеет показатель от  $3 \times 10^{-4}$  до  $5 \times 10^{-4}$ , что выше среднего показателя по России за 2022 г. ( $3,04 \times 10^{-4}$ ).

## Литература

- Булашевич Ю. П., Уткин В. И., Юрков А. К. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады Академии наук. 1996. Т. 346, № 2. С. 245–248.
- Громов Ю. А., Степанов И. В., Хасанов И. Д. и др. Отчет о результатах прогнозно-геологических работ масштаба 1:50 000 партии № 8 и партии № 7 на Прионежской площади в 1977 и 1981 годах (Геологическое задание 32-12)»/ Невское ПГО. п. Чебино, 1982.
- Дегтярев Н. К. Отчет о результатах геологоразведочных работ на месторождении диабазов Суна (строительный камень для производства щебня), высланных в Кондопожском р-не РК в 2005–2006 гг. / Севпромпроект. Петрозаводск, 2006.
- Жуковский М. В. Радон: история и современность // Вестник УрО РАН. 2009. № 4(30). С. 32–40.
- Кайряк А. И., Кириллов И. А., Боровинин Е. Н. Отчет о геологосъемочных работах масштаба 1:50 000,

проведенных Кондопожской партией в Кондопожском и Медвежьегорском районах КАССР в 1962–1963 гг. Петрозаводск, 1964.

Карпин В. А. Современные экологические аспекты естественной эманации изотопов радона: обзор литературы // Экология человека. 2020. Т. 27, № 6. С. 34–40. doi: 10.33396/1728-0869-2020-6-34-40

Кевель С. А., Романишко А. С. Отчет о поисковых и поисково-оценочных работах на блочный камень для целей прецизионного машиностроения в Прионежском районе КАССР в 1987–88 гг. Петрозаводск, 1988.

Киселев С. М., Маренный А. М., Романов В. В. Радон. Современные подходы к регулированию радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 94–102. doi: 10.21514/1998-426X-019-12-2-94-102

Козлова И. А., Юрков А. К., Бирюлин С. В. Вариации объемной активности радона при техногенных и тектонических сейсмических событиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5-1. С. 119–130. doi: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_1\_0\_119

Михайлов В. П., Карбовская Л. А. Отчет о результатах детальной разведки Восозерского месторождения габбро-диабазов (сырье на строительный щебень), проведенной в Кондопожском районе Карельской АССР в 1980–1981 гг. Петрозаводск, 1981.

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.

О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году: Государственный доклад. М.: Роспотребнадзор, 2023. 368 с.

Семинский А. К., Семинский К. Ж. Предварительные результаты исследования взаимосвязи сейсмической активности с концентрацией радона в подземных водах Южного Приангарья // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 100–111. doi: 10.26516/2073-3402.2020.33.100

Титов В. К., Венков В. А., Черник Д. А., Мишина М. В. Классификация месторождений твердых полезных ископаемых по степени радоновыделения // Атомная энергия. 2000. Т. 88, вып. 6. С. 438–445.

Торицын А. Н. Отчет по оценке месторождения габбро-диабазов (строительный камень для производства щебня) Большая Уя в Прионежском районе Республики Карелия (с подсчетом запасов по категории С1+С2 по состоянию на 1.11.2009 г.). Петрозаводск, 2009.

Тыркин А. И. Отчет о результатах доразведки Юго-Восточной площади Северного участка Другоречного месторождения габброидеритов (блочный камень), проведенной в Прионежском муниципальном районе Республики Карелия в 2016 г. Петрозаводск, 2017.

Уткин В. И., Юрков А. К. Радон как «детерминированный» индикатор природных и техногенных геодинамических процессов // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426, № 6. С. 816–820.

Ball T. K., Cameron D. G., Colman T. B., Roberts P. D. Behaviour of radon in the geological environment: a review // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 1991. Vol. 24, no. 2. P. 169–182. doi: 10.1144/GSL.QJEG.1991.024.02.01.

Lahermo P. J., Juntunen R. Radiogenic elements in Finnish soils and groundwaters // Appl. Geochem. 1991. Vol. 6, no. 2. P. 169–183. doi: 10.1016/0883-2927(91)90027-M

Castren O., Voutilainen A., Winqvist K., Mäkeläinen I. Studies of high indoor radon areas in Finland // Radiation Protection Dosimetry. 1985. Vol. 15. P. 311–318. doi: 10.1016/0048-9697(85)90232-3

Paatero J., Hatakka J., Virtanen T. H. Outdoor radon-222 in Arctic Finland // Environ. Sci. Atmos. 2023. Vol. 3, no. 10. P. 1453–1459. doi: 10.1039/D3EA00097D

Sundal A. V., Henriksen H., Soldal O., Strand T. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway // Sci. Total Environ. 2004. Vol. 328, no. 1–3. P. 41–53. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.02.011

Sundal A. V., Strand T. Indoor gamma radiation and radon concentrations in a Norwegian carbonatite area // J. Environ. Radioact. 2004. Vol. 77, no. 2. P. 175–189. doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.03.007

## References

Ball T. K., Cameron D. G., Colman T. B., Roberts P. D. Behaviour of radon in the geological environment: a review. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 1991;24(2):169–182. doi: 10.1144/GSL.QJEG.1991.024.02.01.

Bulashevich Y. P., Utkin V. I., Yurkov A. K. Changes in radon concentration associated with rock bursts in deep mines. Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Academy of Sciences. 1996;346(2):245–248. (In Russ.)

Castren O., Voutilainen A., Winqvist K., Mäkeläinen I. Studies of high indoor radon areas in Finland. Radiation Protection Dosimetry. 1985;15:311–318. doi: 10.1016/0048-9697(85)90232-3

Degtyarev N. K. Report on the results of geological exploration work at the Sunadiabase deposit (building stone for crushed stone production), conducted in the Kondopoga District of the Republic of Karelia in 2005–2006. Sevpromproekt. Petrozavodsk; 2006. (In Russ.)

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

Gromov Yu. A., Stepanov I. V., Khasanov I. D. et al. Report on the results of predictive geological work at a scale of 1:50,000 for Party No. 8 and Party No. 7 in the Prionezhskaya area in 1977 and 1981 (Geological task 32-12). Nevskoye PGS. Chebino settlement; 1982. (In Russ.)

Kairyak A. I., Kirillov I. A., Borovin E. N. Report on geological survey work at a scale of 1:50,000 conducted by the Kondopoga Party in the Kondopoga and Medvezhyegorsk Districts of the KASSR in 1962–1963. Petrozavodsk; 1964. (In Russ.)

Karpin V. A. Modern ecological aspects of the natural emanation of radon isotopes: a literature review. Ekologiya cheloveka = Human Ecology. 2020;27(6):34–40. doi: 10.33396/1728-0869-2020-6-34-40

Kevel' S. A., Romanishko A. S. Report on prospecting and evaluation work on block stone for the purposes of precision engineering in the Prionezhsky District of KASSR in 1987-88. Petrozavodsk; 1988. (In Russ.)

Kiselev S. M., Marenniy A. M., Romanov V. V. Radon. Modern approaches to the regulation of radiation safety for the population. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2):94–102. (In Russ.). doi: 10.21514/1998-426X-019-12-2-94-102

Kozlova I. A., Yurkov A. K., Birulin S. V. Variations in the volume activity of radon during technogenic and tectonic seismic events. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mountain Informational Analytical Bulletin*. 2022;5-1:119–130. (In Russ.). doi: 10.25018/0236\_1493\_2022\_51\_0\_119

Lahermo P. J., Juntunen R. Radiogenic elements in Finnish soils and groundwaters. *Appl. Geochem*. 1991; 6(2):169–183. doi: 10.1016/0883-2927(91)90027-M

Mikhailov V. P., Karbovskaya L. A. Report on the results of detailed exploration of the Vozozerskoye deposit of gabbro-diabases (raw material for construction gravel), conducted in the Kondopozhsky District of the Karelian ASSR in 1980–1981. Petrozavodsk; 1981. (In Russ.)

On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2022: State Report. Moscow: Rospotrebnadzor; 2023. 368 p. (In Russ.)

Paatero J., Hatakka J., Virtanen T. H. Outdoor radon-222 in Arctic Finland. *Environ. Sci. Atmos*. 2023;3(10):1453–1459. doi: 10.1039/D3EA00097D

Seminskii A. K., Seminskii K. Zh. Preliminary results of the study of the relationship between seismic activity and radon concentration in groundwater of Southern Angara region. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo*

*universiteta. Ser. Nauki o Zemle = Proceedings of Irkutsk State University. Earth Sciences Ser.* 2020;33:100–111. (In Russ.). doi: 10.26516/2073-3402.2020.33.100

Sundal A. V., Henriksen H., Soldal O., Strand T. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Sci. Total Environ*. 2004;328 (1–3):41–53. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.02.011

Sundal A. V., Strand T. Indoor gamma radiation and radon concentrations in a Norwegian carbonatite area. *J. Environ. Radioact*. 2004;77(2):175–189. doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.03.007

Titov V. K., Venkov V. A., Chernik D. A., Mishina M. V. Classification of deposits of solid minerals by the degree of radon emission. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2000;88(6):438–445. (In Russ.)

Toritsyn A. N. Report on the assessment of the Bolshaya Uya gabbro-diabase deposit (construction stone for crushed stone production) in the Prionezhsky District of the Republic of Karelia (with the reserves calculation according to categories C1+C2 as of 01.11.2009). Petrozavodsk; 2009. (In Russ.)

Tyrkin A. I. Report on the results of further exploration of the Southeast area of the Northern site of the Dru-goretskoye gabbro-dolerite deposit (block stone), conducted in the Prionezhsky Municipal District of the Republic of Karelia in 2016. Petrozavodsk; 2017. (In Russ.)

Utkin V. I., Yurkov A. K. Radon as a “deterministic” indicator of natural and technogenic geodynamic processes. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2009;426(6):816–820. (In Russ.)

Zhukovskii M. V. Radon: history and modernity. *Vestnik UrO RAN = Bulletin of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2009;4(30):32–40. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 03.09.2024; принята к публикации / accepted: 09.10.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Ильин Андрей Михайлович

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук

e-mail: andrey.m.ilin@gmail.com

### Шмаков Александр Владимирович

старший преподаватель кафедры наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук

e-mail: shav@microklin.ru

### Семочкин Даниил Романович

студент 5 курса специализации «Открытые горные работы» кафедры наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук

e-mail: stelsman74@gmail.com

## CONTRIBUTORS:

### Ilyin, Andrey

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor

### Shmakov, Alexander

Senior Lecturer

### Semochkin, Daniil

Student

УДК 001.32 (470.22)

## КАРЕЛЬСКИЙ УЧЕНЫЙ-ГЕОЛОГ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ СОКОЛОВ

**В. В. Щипцов**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)  
Петрозаводский государственный университет (пр. Ленина, 33, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910)*

Владимир Алексеевич Соколов (1927–1999) – известный карельский геолог, крупный специалист в области геологии, литологии, стратиграфии, палеовулканологии и палеогеографии докембрия, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки КАССР, почетный доктор философии университета г. Оулу (Финляндия). Свою профессиональную деятельность начал в Карело-Финской научной базе АН СССР с должности научного сотрудника отдела геологии в 1954 г., с 1960 г. работал заведующим сектором региональной геологии, затем возглавлял лабораторию литологии и палеовулканологии, а впоследствии становился директором Института геологии Карельского филиала АН СССР, председателем Президиума Карельского научного центра АН СССР. В статье характеризуются основные вехи научной и научно-организационной деятельности карельского ученого-геолога, дающие право называть В. А. Соколова основателем и руководителем научного направления по стратиграфии, литологии и палеовулканологии докембрия. Значение новых методов исследований показано на конкретных признанных результатах. Отдельный раздел содержит воспоминания сотрудников о совместной работе с ученым.

Ключевые слова: геология; стратиграфия; литология; палеовулканология; палеогеография: докембрий; Балтийский (Фенноскандинавский) цит; Карельский филиал АН СССР

Для цитирования: Щипцов В. В. Карельский ученый-геолог Владимир Алексеевич Соколов // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 6. С. 68–84. doi: 10.17076/geo1941

**V. V. Shchiptsov. KARELIAN SCHOLARLY GEOLOGIST VLADIMIR A. SOKOLOV**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St.,  
185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)  
Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

Vladimir Alekseevich Sokolov (1927–1999), Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Honoured Scientist of the KASSR, Honorary Doctor of Philosophy of the

University of Oulu (Finland). He started his professional career at the Karelian-Finnish Research Facility of the USSR Academy of Sciences in 1954 as a Researcher in the Geology Department, to become the Head of the Regional Geology Section in 1960, and then Head of the Laboratory of Lithology and Paleovolcanology, Director of the Institute of Geology of the Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences and Chairman of the Presidium of the Karelian Research Centre of the USSR Academy of Sciences. He is a well-known Karelian geologist, a reputable specialist in the fields of geology, lithology, stratigraphy, palaeovolcanology and palaeogeography of the Precambrian. The main milestones of scientific and science-administration activities of this geologist are characterised, proving V. A. Sokolov can be rightfully called the founder and leader of the scientific fields of stratigraphy, lithology and paleovolcanology of the Precambrian in Karelia. The high value of novel research methods is demonstrated on the basis of concrete acknowledged results. Recollections of Sokolov's collaborators about their joint work are gathered into a separate section.

**Keywords:** geology; stratigraphy; lithology; palaeovolcanology; palaeogeography; Precambrian; Baltic (Fennoscandinavian) Shield; Karelian Branch, USSR Academy of Sciences

**For citation:** Shchiptsov V. V. Karelian scholarly geologist Vladimir A. Sokolov. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 6. P. 68–84. doi: 10.17076/geo1941

## Введение

Имя и жизненный путь Владимира Алексеевича Соколова, карельского геолога, крупного ученого и организатора карельской геологической науки, благодарно связано с историческими событиями Института геологии Карельского научного центра и значительным вкладом в его научное и практическое развитие.

В. А. Соколов (рис. 1) родился 19 августа 1927 года в Петрозаводске, в семье служащего Онежского завода. Окончив восьмилетку, продолжил учебу в военном училище – спецшколе ВВС. После окончания войны поступил в Карело-Финский государственный университет на геологоразведочный факультет. Одновременно работал старшим рабочим в Карело-Финской научной базе АН СССР. Там и предопределилась научная деятельность студента Соколова благодаря встрече в 1946 году с академиком Александром Алексеевичем Полкановым, в то время директором Карело-Финской базы АН СССР. В поиске своего пути и в дальнейшей работе В. А. Соколову помогли также знания и советы его учителей – Петра Алексеевича Борисова и Кауко Оттовича Кратца [Бацер, 1987].

С 1947 года начались тематические исследования по стратиграфии протерозойских образований Карелии под руководством К. О. Кратца. Владимир Соколов, в ту пору студент уже четвертого набора геологов Карело-Финского госуниверситета, был подключен к этим работам. В группе выпуска 1950 года состояло 12 студентов, из которых пятеро



Рис. 1. В. А. Соколов

Fig. 1. V. A. Sokolov

в разное время работали в Институте геологии – В. А. Соколов, Н. Д. Сыромятина, В. А. Костин, А. С. Пекки и В. Н. Юдин. Профессор Всеволод Сергеевич Слодкевич выделял Владимира Соколова из группы студентов. Он отмечал в нем цепкий пылкий ум, энергию, позволяющую успешно решать самые сложные задачи. После окончания в 1950 году геологического факультета Карело-Финского государственного

университета Соколов учился в аспирантуре Карело-Финского филиала АН СССР (переименованного в 1956 году в Карельский филиал АН СССР в связи с преобразованием Карело-Финской ССР в Карельскую АССР). В 1954 году защитил кандидатскую диссертацию под руководством профессора П. А. Борисова по теме «Карбонатные породы Прионежья: известняки, мраморы».

С 1954 года Владимир Алексеевич становится научным сотрудником отдела геологии Карело-Финского филиала АН СССР, а в 1960 году – уже заведующим сектором отдела региональной геологии Карельского филиала АН СССР.

Основные этапы его карьеры можно хронологически представить следующим образом: с 1961 года – заведующий лабораторией литологии и палеовулканологии и заместитель директора Института геологии по научной работе, в 1966–1978 и 1984–1986 годах – директор Института геологии Карельского филиала АН СССР, с 1976 по 1986 год – председатель Президиума Карельского филиала АН СССР. В 1967 году ему присвоено звание заслуженного деятеля науки Карельской АССР. В 1970 году В. А. Соколов защитил диссертацию по теме «Ятулий Карелии и смежных районов» на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. В 1973–1986 годах он член рабочей группы по геологии Комиссии по научно-техническому сотрудничеству СССР и Финляндии. В 1977–1986 годах возглавлял карельское отделение общества «Знание». В 1983 году получил звание почетного доктора философии Университета Оулу Финляндии [Бацер, 1987; Карелия..., 2011; Куликов, 2017].

### **Научная и научно-организационная деятельность В. А. Соколова**

В 27 лет В. А. Соколов защищает кандидатскую диссертацию в области геологии. Фактически это был первый итог начавшегося научного пути молодого исследователя. Он занимается и преподавательской деятельностью в Петрозаводском госуниверситете – читает лекции по дисциплине «Геология СССР».

С этим периодом связаны публикации ряда работ, среди которых очерки о карельских известняках, доломитах и мраморе [Соколов, 1955б], карельских агрономических рудах [Соколов, 1956], о геологии верхнекарельских образований Северного Приладожья [Соколов, 1955а] и протерозойских (верхнекарельских) карбонатных пород южной части

КАССР [Соколов, 1958], о циклическом строении терригенно-карбонатной толщи протерозоя Южной Карелии [Соколов, 1960].

В этой самостоятельной работе им выявлено закономерное циклическое распределение кальцитовых и доломитовых пород Прионежья, фациальные изменения и установлены различные типы слоистости осадков. На литологической основе выполнено описание ятулийских горных пород, особенностью которых являлось наличие фациальных переходов между морскими карбонатными и континентальными кварцито-песчаниковыми толщами. В дальнейшем показано, что в Центральной Карелии стратиграфическая последовательность ятулийского надгоризонта имеет отчетливые маркирующие толщи карбонатных и терригенных пород.

Назрел момент преобразования отдела геологии Карельского филиала АН СССР в Институт геологии. Профессор П. А. Борисов с коллегами готовят проект постановления для принятия его на заседании Президиума АН СССР. В документе сказано: «В целях усиления и расширения научно-исследовательских работ по геологии и технологическому использованию минеральных богатств КАССР организовать в январе 1961 г. Институт геологии». 18 мая 1961 г. выходит приказ по КФ АН СССР, в котором говорится, что во исполнение Постановления Президиума АН СССР и Приказа по КФ АН СССР на базе существующих в филиале отдела петрографии и минералогии и отдела региональной геологии с их подразделениями организуется Институт геологии. Определилась и структура института. В штате числился 51 человек, в том числе 25 научных сотрудников, 26 научно-технических. Среди них два доктора наук (П. А. Борисов, Г. С. Бискэ) и восемь кандидатов (А. И. Богачев, Л. П. Галдобина, К. О. Кратц, В. А. Соколов, О. А. Рийконен, В. И. Робонен, М. А. Тойкка, Г. П. Филинцев).

11–19 июня 1963 г. под эгидой Госгеолкома СССР, АН СССР и Института геологии Карельского филиала АН СССР проходит 1-е рабочее совещание по литологии докембрийских метаморфических толщ. К началу совещания опубликованы тезисы докладов, а также путеводитель (авт. Р. В. Бутин, Л. П. Галдобина, В. И. Горлов, О. А. Рийконен, В. А. Соколов). Совещание привлекло внимание более 200 специалистов из многих научных учреждений страны. Оно было посвящено утверждению литологических методов изучения метаморфизованных осадочных и осадочно-вулканогенных толщ докембрия.

В структуру созданного Института геологии была включена лаборатория литологии на базе существующих кадров в области литологии осадочно-вулканогенных толщ докембрия (заведующий В. А. Соколов) (рис. 2). Впоследствии ее преобразовали в лабораторию литологии и палеовулканологии. К важным результатам работ раннего периода следует отнести выход первой монографии В. А. Соколова «Геология и литология карбонатных пород среднего протерозоя Карелии» [1963], сыгравшей большую роль в изучении стратиграфии и литологии Карелии. Карбонатные породы Центральной Карелии размещены внутри диабаз-сланцевых горизонтов или кварцитовых слоев вблизи силлов диабазов в линейных структурах раннепротерозойского возраста. В ятулийское время возникали фациальные условия, благоприятные для накопления чистых кварцевых песков в бассейнах с длительным перемывом и сортировкой обломочного материала. В этой обстановке происходило полное разрушение аркозой составляющей, окисление железистых и удаление слюдистых минералов, что и стало

причиной накопления в составе ятулийского надгоризонта мощных пластов чистых кварцевых песков.

Молодым коллективом были проведены литологические исследования вулканогенно-осадочных ятулийских образований Центральной Карелии, определяемых в тот период как средний протерозой. Исследования носили плановый тематический характер. Коллективные статьи появились в журнале «Доклады АН СССР» [Соколов и др., 1965, 1966]. Главные результаты охарактеризованы в коллективной монографии [Соколов и др., 1970]. В ней приводятся данные по вещественному составу, текстурным и структурным особенностям, характеру строения разреза. В результате анализа фактического материала выполнены палеофациальные и палеогеографические реконструкции различных периодов ятулийского времени. На основе палеогеографических схем дан прогноз полезных ископаемых. Впервые были выявлены и описаны вулканические аппараты протерозоя, составлены палеовулканические и палеогеографические карты, отмечены новые местонахождения древней органики.



*Рис. 2.* Сотрудники лаборатории литологии и палеовулканологии. Слева направо: Л. П. Галдобина, Г. М. Кононова, Ю. И. Сацук, В. А. Соколов; стоят: А. И. Голубев, К. И. Хейсканен. 1968 г.

*Fig. 2.* Staff of the Laboratory of Lithology and Palaeovolcanology. From left to right: L. P. Galdobina, G. M. Kononova, Y. I. Satsuk, V. A. Sokolov, A. I. Golubev and K. I. Heiskanen. 1968

Под руководством В. А. Соколова сформировалась научная школа по литологии и палеовулканологии докембрия, из которой выросло три доктора геолого-минералогических наук (А. П. Светов, К. И. Хейсканен, В. С. Куликов) и четыре кандидата наук (А. В. Рылеев, А. И. Голубев, В. В. Макарихин, А. И. Светова).

В марте 1963 года в команду Соколова, в частности в лабораторию литологии, зачисляется на должность старшего лаборанта Анатолий Светов, проработавший в Восточном Саяне три года после окончания Петрозаводского госуниверситета. Владимир Алексеевич делает совершенно правильный выбор, поручая ему исследовать особенности ятулийского базальтового магматизма. Таким образом произошло зарождение палеовулканологических исследований докембрия Карелии. Важным событием стала вулканологическая стажировка А. П. Светова в составе группы карельских геологов на Камчатке, способствовавшая освоению методологии палеовулканологических исследований. Этот пример отражает умение Соколова подбирать кадры для развития важного научного направления. Вот как характеризовал И. М. Бацер подобное качество: «Директор не мог двигать вперед дело, не опираясь на людей, на новые методы исследований. Помню, он говорил: – Вот вы познакомились с Кимом Ивановичем Хейсканеном. Негромко говорит, но громкие дела делает. Знаете, сколько понадобилось усилий ему, геологу, чтобы справиться с высшей математикой, вернее, с освоением математических методов, использования ЭВМ для того, чтобы помочь нам в наших прогнозах и выводах! Или Александр Васильевич Рылеев – великий знаток карельского камня, или Анатолий Павлович Светов... И еще фамилии, и еще. И все новые восклицательные знаки...» [Бацер, 1987, с. 244–245].

В результате палеовулканологических исследований выделены три фазы формирования ятулийского вулканического комплекса. Впервые для Центральной и Южной Карелии установлены корневые части и остатки лавового конуса двух вулканических аппаратов – Орченьского некка (оз. Сегозеро) и Гирвасского вулкана (пос. Гирвас). Выявлены цикличность лавовых потоков и в целом антидромность эволюции магматического родоначального расплава. Палеовулканологические реконструкции позволили установить минерагеническую специализацию вулканической деятельности. Составлены первые палеовулканологические карты-схемы для нижнеятулийских и среднеятулийских вулканических фаз [Светов, 1972]. Например, история открытия Гирвасского

палеовулкана связана с палеовулканологическими исследованиями группы В. А. Соколова. В районе северной окраины пос. Гирвас были обнаружены вулканические породы и реликт вулканического аппарата, связанные с проявлением ятулийского основного вулканизма [Светов, Голубев, 1967]. В настоящее время этот объект функционирует как геологический парк «Вулкан Гирвас» [Геологическое..., 2021].

4 января 1971 г. вышло постановление Совмина СССР о необходимости комплексного исследования углеродсодержащих пород – шунгитов, прогнозные запасы которых достигают сотен миллионов тонн. Ведущей организацией страны, отвечающей за исследования в этом направлении, определен Институт геологии Карельского филиала АН СССР. В. А. Соколов не оставался в стороне от этой проблемы. Под его научной редакцией опубликованы сборники научных трудов «Шунгиты Карелии и пути их комплексного исследования» [1975] (ред. В. А. Соколов и Ю. К. Калинин), «Геология шунгитоносных вулканогенно-осадочных образований протерозоя Карелии» [1982], «Шунгиты – новое углеродистое сырье» [1984] (ред. В. А. Соколов, Ю. К. Калинин, Е. Ф. Дюккиев). Помимо этого, В. А. Соколов содействовал проведению опытов по созданию радиозащитных материалов на основе шунгитов, которые вызвали интерес со стороны ряда ведомств (Минрадиопрома СССР, Минсредмаша СССР, Минавиапрома СССР, Минобороны СССР). Центральное конструкторское бюро радиоматериалов (ЦКБ РМ), представлявшее интересы этих ведомств, заключило с лабораторией шунгитов института большой договор на разработку промышленных технологий радиозащитных материалов (шунгитовых РЭМ), выпуск опытных промышленных партий, строительство экспериментальных помещений из шунгитовых РЭМ и их радиотехнические испытания. По разработанным технологиям были выпущены промышленные партии РЭМ в виде кирпича на Петрозаводском заводе силикатного кирпича. В сооружениях на базе Института геологии в поселке Толвуя Медвежьегорского района материалы были испытаны и получили признание в оборонных ведомствах.

В. А. Соколов активно поддержал важные исследования шунгитовых пород в качестве активных наполнителей широкого класса композиционных материалов на основе органических и неорганических связующих, которые придают композитам целый комплекс новых свойств: износостойкость, химстойкость, электропроводность и др. [Шунгиты..., 1984].



В июне 1971 г. крупным событием стала Международная конференция по тектонике докембрия восточной части Балтийского щита с геологическими экскурсиями по Карелии. Академик Дмитрий Васильевич Наливкин напутствовал участников этого научного мероприятия в Доме ученых в Ленинграде. Экскурсии проходили по расписанию литерного поезда в составе четырех купейных вагонов и одного вагона-ресторана по маршруту «Ленинград – Медвежьегорск – Амбарный – Петрозаводск». Делегации иностранных специалистов из США, Канады, Бразилии, Франции, Великобритании, Испании, Норвегии, Финляндии, Швеции и других стран были весьма представительными. С советской стороны принимали участие ученые-геологи А. А. Богданов, В. Е. Хаин, М. В. Муратов, К. О. Кратц, Л. И. Салоп, Н. П. Семенов, С. С. Шульц и др. Был издан путеводитель на русском и английском языках [Путеводитель..., 1971]. Мероприятие прошло на высоком научном уровне, все поставленные задачи выполнены. Значительно возрос авторитет института, руководителем которого в то время был В. А. Соколов. Вот комментарии некоторых участников: «Наша конференция оказалась чрезвычайно полезной, причем с трех точек зрения. Во-первых, следует сказать о том, что она вылилась в демонстрацию успехов того отряда советских геологов, которые работали в Карелии. Во-вторых, на этом представительном собрании мы имели возможность обсудить широкий круг весьма специальных и очень важных геологических проблем. И, наконец, я придаю особое значение тому, что на конференции создалась благоприятная обстановка для установления деловых контактов разных стран, работающих в смежных областях» (профессор А. А. Богданов, Москва). «Прекрасно! В ходе нашего совещания буквально можно было ощутить, насколько вперед продвинулась мировая геологическая наука. С другой стороны, были обсуждены и те проблемы, которые еще ждут своего решения. Мы еще раз убедились в правильности пословицы: лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать. Еще раз: конференция прекрасно организована» (профессор Е. Р. Фоллинсби, университет Альберты, Канада). «От души радуется самая благоприятная возможность обменяться мнениями и научными идеями. Обменяться непосредственно, общаясь с интереснейшей геологией Карелии, не по картам. Очень понравился город Петрозаводск. Красивый, хорошо ухоженный город» (профессор Ю. А. Шубер, Франция).

«Это интересная и полезная встреча ученых. Особенно хочется подчеркнуть плодотворность совместных экскурсий, в ходе которых, изучая древние образования, мы делаем выводы столь важные практически для нас сегодня. Особенно много общего у геологов Карелии, Финляндии и Швеции, поскольку они работают в сходных условиях. Хочется еще раз отметить прекрасную организацию и гостеприимство наших дорогих хозяев» (профессор Ахти Симонен, Финляндия). «Самое главное – возможность встречаться друг с другом, чтобы внимательно обсудить волнующие нас проблемы, чтобы сделать определенные выводы. С другой стороны, такое сотрудничество в области науки полезно не только для самой науки, но и для дела мира во всем мире» (член-корреспондент АН СССР, профессор К. О. Кратц, Ленинград).

В 1973 году в помещении Института геологии Карельского филиала АН СССР состоялась выездная сессия Отделения геологии, геохимии и геофизики АН СССР. В работе сессии принимали участие академик-секретарь, академик В. И. Смирнов, академик Д. С. Коржинский, академик А. Л. Яншин, академик М. А. Садовский, академик Ф. В. Чухров, члены-корреспонденты А. И. Тугаринов, К. О. Кратц, Г. И. Горбунов. Заседания чередовались с экскурсиями. Институт выдержал экзамен на зрелость. Один из важных моментов расширенной сессии можно определить словами академика В. И. Смирнова, сказанными на заседании по итогам работы: «В процессе изучения докембрийских толщ было обращено внимание на прослоенные осадками тела магматического происхождения, большую часть которых ранее относили к глубинно-магматическим или интрузивным образованиям. В ходе дальнейших работ были обнаружены серии застывших лавовых потоков, которые имели различную мощность, неоднородное площадное и стратиграфическое распространение. Применение вулканологических методов позволило определить направления течения лавы и в итоге привело к открытию древнейших на Земле вулканических аппаратов. Вулканические жерла в докембрии – это логический результат целеустремленного геологического поиска. Так возникла новая ветвь в геологии – палеовулканология докембрия».

В сентябре 1975 г. по программе Международного геологического симпозиума «Корреляция докембрия», который проходил в Москве, институту была поручена организация геологических экскурсий в Карелии. Институт геологии провел такие экскурсии в районе



Рис. 3. Заседание советско-финской рабочей группы по сотрудничеству в области геологии. Сопредседатель К. Кратц (слева), В. Соколов, В. Куликов (крайние справа), члены рабочей группы. Хельсинки, 1975 г.

Fig. 3. Meeting of the Soviet-Finnish working group on co-operation in the field of geology. Co-chairman K. Kratz (left), right V. Sokolov and V. Kulikov, members of the working group. Helsinki, 1975

Гирваса, Спасской Губы-Чалки, Ялгубы-Суйсари. Участвовали в экскурсиях известные ученые из Австралии, Великобритании, Канады, США, Финляндии, ФРГ. Председатель оргкомитета министр геологии СССР академик А. В. Сидоренко и председатель Советского комитета МПГК академик А. В. Пейве выразили благодарность за превосходную организацию экскурсий по докембрию Карелии. Они отметили: «Осуществление этой экскурсии имеет большое значение и позволит выдвинуть разрезы Карелии в число важнейших мировых эталонов для межконтинентальной корреляции отложений среднего докембрия».

Нельзя не отметить деятельность В. А. Соколова в установлении научных контактов с зарубежными учеными. Он находил пути развития, что определяло широту научных связей института с учеными из США, Германии, Австралии, Финляндии и других стран.

Примером международного сотрудничества может служить советско-финляндский симпозиум по геологии ятулия (21–26 августа 1979 г., г. Куусамо, Финляндия). От института в состав советской делегации входили

В. А. Соколов, В. С. Куликов и А. П. Светов. Состоялись экскурсии по ятулийским образованиям Финляндии. Более 10 лет В. А. Соколов был членом советско-финляндской рабочей группы по геологии Комиссии по научно-техническому сотрудничеству СССР и Финляндии (рис. 3).

В августе 1984 г. в составе большой группы сотрудников Института геологии (В. С. Куликов, А. С. Пекки, С. И. Рыбаков, Л. П. Свириденко, М. М. Стенарь, Р. А. Хазов, К. И. Хейсканен) В. А. Соколов принимал участие в качестве члена оргкомитета в работе 27-го Международного геологического конгресса в Москве (рис. 4). Доклады участников опубликованы в «Трудах XXVII сессии МГК», в том числе два доклада Владимира Алексеевича [Соколов, 1984; Соколов, Хейсканен, 1984]. В Карелии состоялись две геологические экскурсии для участников МГК. К экскурсиям был подготовлен и издан путеводитель «Геологическая экскурсия по Карелии. Geological fieldtrips in Karelia». Этот путеводитель вошел в раздел «Северо-Запад РСФСР» «Сводного путеводителя экскурсий XXVII сессии МГК».



*Рис. 4.* Делегаты 27-го Международного геологического конгресса в Москве. Слева направо: С. И. Рыбаков, В. А. Соколов, В. С. Куликов, М. М. Стенарь, А. С. Пекки, Р. А. Хазов и К. И. Хейсканен

*Fig. 4.* Delegates of the 27<sup>th</sup> International Geological Congress in Moscow. From left to right: S. I. Rybakov, V. A. Sokolov, V. S. Kulikov, M. M. Stenar, A. S. Pekki, R. A. Hazov and K. I. Heiskanen

К совещанию, которое проходило в Уфе в 1977 году, институт получил много новых сведений по стратиграфии ряда комплексов Карелии, что было учтено в ходе подготовки и проведения Уфимского всесоюзного совещания по вопросам расчленения докембрия СССР [Келлер и др., 1977]. Несколько позже в результате обобщения материалов по вулканогенно-осадочным породам образования единого комплекса заонежской свиты по предложению В. А. Соколова и Л. П. Галдобиной было обосновано выделение нового стратиграфического подразделения палеопротерозоя ранга системы – людиковий (возраст 2,1–1,92 млрд лет) – и включено в стратиграфическую шкалу докембрия России [Соколов, Галдобина, 1982]. В 1982 году на региональном совещании в Петрозаводске сообщалось о разработке макетов региональных стратиграфических схем докембрия (архей, нижний и верхний протерозой) Карелии и Кольского полуострова (советской части Балтийского щита) (рис. 5).

Владимиром Алексеевичем Соколовым внесен вклад в разработку стратиграфических схем архея и протерозоя Карело-Кольского региона [Соколов, Стенарь, 1980; Кратц и др., 1984]. В 1984 году издается обобщаю-

щая монография по стратиграфии докембрия Карельской АССР под редакцией В. А. Соколова [Стратиграфия..., 1984]. В этом же году решением Межведомственной стратиграфической комиссии (МСК) создана Региональная межведомственная комиссия по Северо-Западу России (РМСК по СЗ России). Председателем комиссии был избран В. А. Соколов. Составы бюро и секций подготовлены на основе предложений геологических организаций, ведущих работы в регионе [Богданов, Робонен, 2011]. Первый пленум намечалось провести в 1986 году. Однако по ряду причин он не состоялся. Из-за болезни В. А. Соколова произошла его замена на этом посту.

К 1987 году на территории Карельской АССР выделены следующие стратиграфические подразделения: архейская эонотема (саамский и лопийский комплексы), протерозойская эонотема (карельский комплекс с надгоризонтами от древних к молодым: сумийский, сариолийский, ятулийский, людиковийский, ливвийский и вепсийский; рифейский комплекс, вендская система) и фанерозойская эонотема (девонская, каменноугольная и четвертичная системы) [Геология..., 1987]. В. А. Соколову удалось объединить большой коллектив



*Рис. 5.* Региональное совещание по проблемам стратиграфии докембрия Карело-Кольского региона. На трибуне В. З. Негруца. В президиуме слева направо: В. А. Коровкин, В. С. Куликов, В. А. Соколов, К. О. Кратц. Петрозаводск, 1982 г.

*Fig. 5.* Regional Meeting on the Problems of Precambrian Stratigraphy of the Karelian-Kola Region. On the podium V. Z. Negrutsa. In the presidium from left to right: V. A. Korovkin, V. S. Kulikov, V. A. Sokolov, K. O. Kratz. Petrozavodsk, 1982

научных сотрудников института, который успешно справился с созданием большой монографии «Геология Карелии» [1987], в которой отражены практически все достижения института по изучению карельских недр и существовавшие представления об их формировании и эволюции до середины 80 годов XX века. Эта книга, в создании и написании которой важная роль принадлежит ответственному редактору Владимиру Алексеевичу Соколову, стала его лебединой песней в научной карьере.

Здесь уместно напомнить, что оценка его труда как руководителя Карельского филиала АН СССР была дана на заседании Президиума АН СССР 23 декабря 1982 года под председательством Президента АН СССР академика Анатолия Петровича Александрова. Вот что об этом писал В. С. Куликов: «В своем выступлении академик-секретарь Отделения наук о Земле Борис Сергеевич Соколов подчеркнул, что Владимир Алексеевич Соколов – это удивительный карельский самородок, и ему надо помогать. Результаты работ филиала были одобрены, утверждены основные направления научной деятельности. Итоги внедренческой деятельности подразделений филиала были рассмотрены на совместном заседании Совета филиала и Госплана КАССР 10.10.1982 г. в присутствии первых лиц республики» [Куликов, 2017, с. 102].

П. В. Медведев в сборнике, посвященном 75-летию Карельского научного центра Российской академии наук, в биографическом очерке о В. А. Соколове отметил: «Владимир

Алексеевич вел большую общественную работу: являлся депутатом Верховного Совета КАССР и членом Президиума Верховного Совета КАССР, членом обкома КПСС, председателем Карельской организации общества «Знание». Он написал несколько научно-популярных книг, посвященных выдающимся исследователям карельских недр (А. Пузыревскому, А. А. Иностранцеву, Г. П. Гельмерсену, Ф. Ю. Левинсон-Лессингу, П. А. Борисову, В. М. Тимофееву), за что был удостоен специального благодарственного письма академика А. Л. Яншина.

Общество высоко оценило труд В. А. Соколова. В 1967 году ему присвоено звание заслуженного деятеля науки КАССР. Он кавалер ордена «Знак Почета», награжден почетными грамотами Президиумов Верховных Советов РСФСР и КАССР, знаком «Отличник разведки недр» [Медведев, 2021, с. 341–342].

### **Страницы воспоминаний**

Повествование о В. А. Соколове будет неполным без рассказов о нем давних сослуживцев, существенно дополняющих образ карельского исследователя-геолога. Использованные далее материалы были подготовлены Гарри Цалеловичем Лаком к 80-летию Владимира Алексеевича, но по каким-то обстоятельствам не опубликованы в 2007 году.

Из воспоминаний Г. Ц. Лака:

«Дом, в котором родился В. А. Соколов, находился в самой старой части города, в так

называемой Зареке, иными словами, «за рекой». Как во всем тогда Петрозаводске в начале XX столетия, преобладали одноэтажные, изредка двухэтажные деревянные дома, среди которых каменные строения можно было пересчитать по пальцам одной руки. Улицы немощеные, редко выложенные булыжниками, тротуары деревянные, но они чаще отсутствуют, чем присутствуют. Летом неимоверная пыль, зимой снежные заносы, расчищаемые плугом в виде деревянного треугольника, который цугом тянула четверка пожарных лошадей. Граница Зареки проходила по современным улицам Ригачина (бывшая Болотная), Перттунена (Задняя Кладбищенская), Волховская (Кладбищенская), Льва Толстого (Большая Казарменская). Улица Большая Казарменская возникла давно и является одной из старейших в городе Петрозаводске. Ее появление относится к началу XVIII века, когда по велению Петра I в устье Лососинки был заложен Петрозаводский пушечный и оружейный завод, прославивший Олонецкий край своей военной продукцией. Рядом с заводом выросла Петровская слобода, положившая основание Петрозаводску. Для работы на заводе в слободу были принудительно доставлены приписные крестьяне, высококвалифицированные мастера-оружейники из Тулы. Их размещали на правом берегу Лососинки, где для них были построены казенные дома-казармы. Улицу так и назвали – Казарменской. На плане Петровской слободы 1720-х годов эта улица уже была обозначена и проходила параллельно Вытегорской дороге, то есть современной улице «Правды». По предположению одного из старейших краеведов города, именно Казарменская улица, на которой располагались дома тульских оружейников, получила в наше время имя Л. Толстого.

Родители Владимира Алексеевича – Алексей Васильевич и Нина Васильевна – проживали на ул. Фабричной (ныне Промышленной). В небольшом дворике существовали грядки, на которых выращивали лук, морковь и другую зелень, там же стояли дровяные сарайчики. Воду брали из колонки, которая, как правило, находилась в центре участка с окружающими домами. Отец Владимира Соколова обладал несколькими специальностями и работал на Онежском заводе. Он любил петь смолоду, обладая хорошим голосом.

На Пробной улице, несущей в своем названии память о «пробном месте», где испытывались когда-то пушки Петровского завода, сохранился «Земляной вал»; летом на этом месте любила собираться молодежь. В тихие летние вечера, когда колокола Крестовоздвиженской церкви призывали к вечерней службе, парни и девушки

распевали на валу песни. «Вечерний звон, вечерний звон...» – разносилось далеко по округе в переливах колокола. Хором на этом валу, как правило, управлял старшекурсник духовной семинарии, а потом студент-медик Алексей Соколов (будущий отец Владимира Соколова).

Прошли годы, и Алексей Соколов женился на прелестной девушке Нине. В 1927 году родился у них Володя. После завершения обучения на геологоразведочном факультете в 1950 году Соколов поступает в аспирантуру. Именно этот шаг явился решающим во всей его дальнейшей научной и административной деятельности. Честолюбие в хорошем смысле этого слова явилось основным двигателем для достижения высот не только в научном плане. Подвластность амбициозности определила его дальнейшую жизнь.

Володя Соколов был веселым, общительным, не замкнутым на себя и в себе молодым человеком, азартным и доброжелательным. Вспоминается, с какой радостью и одновременно гордостью за себя и молодую супругу Олю он позвал меня и Николая Демидова «обмыть» первенца, нареченного Андрюшей. Спустя столько лет не могу забыть то веселье, которое царило в доме Елены Алексеевны (мамы Оли) на Волховской улице».

Вот еще фрагменты из воспоминаний Г. Ц. Лака:

«В годы своей аспирантуры Володя, унаследовав хороший музыкальный голос и слух от своего отца, поет в хоре Карельского филиала вместе с К. Кратцем. Он азартно играет в настольный теннис и очень не любит проигрывать, с удовольствием участвует в филиальных празднествах. Летом, во время экспедиционных работ, мы, молодежь, под присмотром старших товарищей К. О. Кратца и Г. С. Бискэ в течение нескольких лет сами создали традицию – 19 августа, день рождения Владимира Соколова, отмечать у одиноко стоящей сосны на равнине вблизи деревни Уссуны недалеко от поселка Гирвас. В этой экспедиционной встрече участвовали, как правило, Г. С. Бискэ и К. О. Кратц, молодые и азартные М. Стенарь, Ю. Лазарев, Н. Демидов, В. Чернов, студенты А. Дравант и В. Блюдник, конечно, наши девушки-геологи Вера Мейльбаум и Оля Рийконен. Веселились как могли и как умели. В те годы были счастливы, и в памяти остается восклицание «Как молоды мы были!».

Второй эпизод характеризует его как человека, любящего экспедиционную жизнь и ту свободу, которую способна дарить только она. Было это осенью 1962 года в местечке Сайозере. 30 сентября в России отмечают именины

Надежды, Веры и Любви. В отряде была Надежда Николаевна Горюнова, моя жена. В этот день готовили праздничный ужин. Мы с Николаем Демидовым настреляли рябчиков по шутке на человека, Элеонора Девятова стряпала беляши. На столе были ягоды, грибы различного приготовления, жареная щука и раки из Сайозера.

Не успели мы расположиться за столом, как на безлюдной, да еще размытой дождями дороге раздался шум подъезжающей машины. Неожиданным для нас подарком к именинам Надежды явился Володя Соколов вместе с К. Хейсканеном, А. Рылеевым, Ю. Сацуком, Г. Кононовой и шофером машины. Они выстроились в колонну, развернули поздравительный транспарант и под звуки напеваемого марша дружно двинулись под проливным дождем к дому. Вот это было здорово!».

В воспоминаниях Гарри Цалеловича сохранились и события, которые связывали Соколова и Лака. Они оба хорошо знали Петра Алексеевича Борисова:

«19 ноября 1963 года в городе Пушкине умер Петр Алексеевич Борисов, с именем которого связано основание Института геологии. Живший этажом ниже врач не мог уже помочь ничем. Остановилось сердце. Ушел из жизни патриарх карельской геологии.

Владимир Алексеевич, бывая в Ленинграде, всегда навещал дом Борисовых. Не оставлял без внимания Вассу Ефимовну, жену Борисова, и после его смерти. Это была не просто дань вежливости, а истинное проявление уважения благодарного ученика к своему учителю. Прошло пять лет, ушла из жизни и Васса Ефимовна. Чета Борисовых прожила долгую и счастливую жизнь, но не было у них детей и близких родственников. После смерти Вассы Ефимовны суровость закона predeterminedляла трехдневный срок для освобождения квартиры при отсутствии кого-либо прописанного в ней. Все имущество Борисовых подвергалось опасности быть разграбленным и выброшенным. Нужно было спасти памятные вещи Петра Алексеевича. Владимир Алексеевич, зная, что мы с Надеждой при возможности всегда навещали Петра Алексеевича и Вассу Ефимовну, вызвал меня и приказал на машине срочно выехать в город Пушкин и вызволить все, что удастся, из памятных вещей Петра Алексеевича. Предусмотрительность Владимира Алексеевича была нелишней. Дверь квартиры была открыта, часть вещей уже вынесена. Меня встретили в штыки. И все же удалось спасти книги, письменный стол, кресло, папки с личными материалами и документы, личные вещи. Все это сегодня хранится в музее геологии докембрия в Петрозаводске».

Гарри Цалелович также вспоминает и о времени сложных отношений с Владимиром Алексеевичем:

«В 70-е годы взаимоотношения с Соколовым носили напряженный характер. В этот период три сотрудника лаборатории четвертичной геологии и геоморфологии защитили кандидатские диссертации – И. Экман, Г. Лак и А. Лукашов. Каждый из них обладал достаточно большим опытом работы и вполне отвечал требованиям к должности старшего научного сотрудника. Однако штатных единиц в институте не имелось. Началась череда ученых советов в институте. И только через пять лет были расставлены все точки над «i». Это было мучительно для всех участников. В итоге решение директора было следующее: заведующая лабораторией доктор наук Г. С. Бискэ написала заявление о своем переходе на должность научного консультанта; А. Д. Лукашов избирается по конкурсу на должность заведующего лабораторией; И. М. Экман и Г. Ц. Лак избираются по конкурсу на должности старших научных сотрудников. Было ли это решение лучшим? Вряд ли! Прежняя монолитная лаборатория распадается на три фракции, теряя объединяющую их идею. Через И. Экмана заметно возросла связь с финскими геологами, включая финансовую. С учетом трудного положения в стране финнами используется русская поговорка: «кто платит, тот заказывает музыку». Лабораторию подобное положение на том этапе деятельности вполне устраивало. Дирекцию, видимо, тоже».

Были и такого уровня моменты:

«У каждого человека бывает своя заветная мечта. Была она и у меня. Я хотел получить автомашину. Именно «получить», потому что в то время купить ее простому смертному было невозможно: их распределяли по месту работы, хотя при их получении оплачивалась полная стоимость все равно. Такие были времена!

В 1976 году Владимир Алексеевич избирается председателем Президиума Карельского филиала. Не проходит и года, как я получаю подарок судьбы в виде новенького «Запорожца». Я понимал, что благодарить в первую очередь следует, конечно, Владимира Алексеевича. Чтобы закрыть страницу о машинах, скажу о том, что через пять лет В. А. Соколов исполнил вторую заветную мечту и из личных своих фондов выделил мне «Ладу» последней модели. Я был на седьмом небе! Возможно, таким способом Володя Соколов в память о нашей юности решил сгладить то неблагоприятное впечатление, которое сложилось о нем за время «выборных баталлий» на ученых советах начала семидесятых».

Любопытно повествование Г. Ц. Лака о визите в Карелию Манфреда Шидловски с супругой. Об этом следующие страницы воспоминаний.

«В 1984 году по личному приглашению В. А. Соколова к нам из Западной Германии приехал видный ученый из Института Макса Планка – Манфред Шидловски. Он был единственным такого масштаба исследователем, который занимался изучением углерода в природе. Именно в этой связи познать шунгиты Карелии было его давней мечтой. Однако, будучи уверенным в том, что Шидловски, как западному ученому, получить разрешительную въездную визу в Карелию будет крайне затруднительно, Владимир Алексеевич не питал иллюзий. И конечно, был удивлен, узнав, что такого-то числа Манфред Шидловски прибывает из Мюнхена в Пулково в сопровождении своей жены и просит его встретить. Дело в том, что немецкий ученый был прикован к инвалидному креслу и не мог самостоятельно передвигаться. Обо всем этом я узнал значительно позднее, когда В. А. Соколов попросил меня, как геолога, знающего немецкий язык, сопровождать

М. Шидловски. При этом выяснилось, что я буду управлять собственной машиной, т. е. сидеть за рулем. Все это было для меня неожиданным, сложным и очень интересным. В назначенный день и час я был у гостиницы «Северная», где меня поджидал еще один сюрприз. Сюрприз состоял в том, что Владимир Алексеевич пригласил в мой жигуленок Шидловски с женой, Людмилу Павловну Галдобину и сам сел на заднее сиденье третьим. Я осмелился напомнить Соколову, что не имею права перевозить иностранца. В. А. Соколов заверил меня, что все вопросы в этом отношении улажены. И мы поехали в Сундозеро. На всем пути за мной следовала черная «Волга» (видимо, на всякий случай). В узике ехали Ю. И. Сацук, парни-носильщики и две девочки для приготовления чаепития на природе, как ныне говорят, «ланча». Для чего был нужен этот «одноактный спектакль»? Видимо, для того, чтобы показать, что в нашем институте есть старшие научные сотрудники, которые свободно говорят на иностранном языке и имеют собственную машину (рис. 6).



Рис. 6. Участники геологической экскурсии во время визита Манфреда Шидловски в Карелию. Нижний ряд: Ю. И. Сацук, М. Шидловски; стоят: М. Ковалев (водитель), Л. Мелинаускани, Г. Ц. Лак, В. А. Соколов, супруга М. Шидловски, Л. П. Галдобина

Fig. 6. Participants of the geological excursion during Manfred Szydlowski's visit to Karelia. Bottom row: Y. I. Satsuk, M. Shidlovski; standing: M. Kovalev (driver), L. Melinauskane, G. Ts. Lak, V. A. Sokolov, Manfred's wife, L. P. Galdobina

Надо признать, это была незабываемая поездка, интересная по своей деловой сути и приватному общению. И после нескольких лет заметного охлаждения в наших взаимоотношениях с Владимиром Алексеевичем он через М. Шидловски стал снова близким и понятным прежним Володей. Особенно он покорила тогда меня своей гражданской смелостью. В предпоследний день своего пребывания в Петрозаводске Манфред и его супруга проявили желание угостить всех принимавших участие и способствовавших их пребыванию в Карелии ужином, но при возможности не в официальной обстановке. Оказалось, что подобная встреча ими была продумана еще в Германии. Думается, что они были осведомлены о наших трудностях в доставке некоторых (чтобы не сказать всех) продуктов питания, так как буквально все необходимое в фабрично-упакованном виде ими было привезено из Мюнхена (закуски, деликатесы, консервы, вино, тарелки, вилки, ножи, стаканчики и даже хлеб и масло). Тогда это было для нас фантастикой. Тут же встал вопрос: а где это можно устроить? Когда Владимир Алексеевич предложил обосноваться в его председательском кабинете после окончания рабочего дня, то, скажу честно, я был поражен его безоглядным мужеством.

В то время без разрешения обкома партии такой поступок мог иметь трудно предсказуемые последствия. Я мысленно снял шляпу. Это было смелое действие. Преклоняюсь перед Владимиром Алексеевичем и сегодня по истечении многих лет.

В этот вечер мы разошлись далеко за полночь. Было светло. Вот-вот взойдет за Бараньим Берегом солнце. На Пушкинской ни одной машины, тишина. На душе покойно и хорошо».

И заключительная часть воспоминаний Г. Ц. Лака о Владимире Алексеевиче Соколове:

«Через два года (1986 г.) В. А. Соколов тяжело заболел. В 1999 году ушел навсегда. Мы с Надеждой не смогли проводить его в последний путь, о чем до сих пор жалею. И хотя Владимира Алексеевича уже давно нет с нами, память продолжает хранить события давно минувших дней. Ведь он был из тех, кто начинал при Петре Алексеевиче Борисове в секторе геологии Карело-Финской научной базы Академии наук СССР.

Владимира Алексеевича нельзя рассматривать сквозь призму обычного человека. Неистребимое желание достичь новых высот гнало его бессонными ночами за рабочим столом к новым замыслам и новым свершениям. Это не было стремление к известности, свойственное артистам, жаждущим всеобщего признания,

скорее подспудное желание быть признанным в большой науке. Возможно, его замыслы и нашли бы свое претворение в жизни, если бы не трагические случайности, подстерегавшие его на творческом пути. Было еще одно обстоятельство, которое я осмелюсь назвать и которое было для Владимира Алексеевича непреодолимым. Имя ему К. О. Кратц. Владимир Алексеевич очень хотел быть на него похожим, но это было невозможно. Кауко Оттович был недосыгаем».

Еще одна сотрудница В. А. Соколова Людмила Павловна Галдобина окончила геологический факультет Карело-Финского государственного университета в 1951 году. После университета несколько лет работала в Карельской комплексной геологической экспедиции. С 1955 года занималась педагогической деятельностью в университете, работая в должности ассистента, а затем преподавателя на геологоразведочном факультете. В 1959 году защитила кандидатскую диссертацию и была приглашена В. А. Соколовым на работу в отдел региональной геологии Карельского филиала АН СССР. Людмила Павловна вспоминала, что ее научные интересы были связаны с ятулийскими осадочными образованиями, распространенными на большой площади Центральной и Северной Карелии (эти воспоминания относятся к 2007 году). С этой целью был создан коллектив для выполнения данных работ, руководил которыми Владимир Алексеевич Соколов. Л. П. Галдобина вспоминает, что в состав группы исследователей ятулийских пород Карелии вошли Ким Иванович Хейсканен, Анатолий Павлович Светов, Александр Васильевич Рылеев, Юрий Иванович Сацук и позже Анатолий Иванович Голубев.

Из воспоминаний Л. П. Галдобины:

«Ятулийские образования довольно хорошо обнажены на территории Карелии. Мы приступили к работе в районе озера Сегозера, где по всем берегам и островам развиты осадочные образования ятулия. Начали с того, что стали составлять текстурные, гранулометрические и минералогические профили ятулия, при этом произошло разделение по конкретным специальным группам исследований: А. П. Светов вел исследования по вулканитам, А. В. Рылеев и Ю. И. Сацук проводили геологическую съемку и оконтуривали разрезы ятулия, я и К. И. Хейсканен вели документацию и составление фациальных профилей, а В. А. Соколов осуществлял общее руководство и планирование. Поздними вечерами мы обсуждали полученные результаты. Так в тесной взаимосвязи от Сегозерской структуры исследования продолжались на Елмозерской,



Янгозерской, Воломской и наконец Куолаярвинской структурах, а затем мы работали в районе Гирваса.

Законченные результаты исследований терригенных ятулийских отложений опубликованы в коллективной работе под руководством В. А. Соколова. Это издание относится к ярким страницам коллективных исследований ятулийских образований. Благодаря В. А. Соколову была создана благоприятная атмосфера. Его ученики возглавили созданные научные лаборатории в Институте геологии: А. П. Светов – лабораторию палеовулканологии, К. И. Хейсканен – лабораторию математической геологии, А. В. Рылеев – лабораторию природного камня. Впоследствии А. П. Светов и К. И. Хейсканен защитили докторские диссертации.

Выходы целых разрезов на поверхность позволили считать наш район более доступным для изучения докембрийских пород, что стало основанием для проведения крупных совещаний по докембрийской тематике и последующих геологических экскурсий, в которых количество участников доходило до 100 человек. Издавались путеводители геологических экскурсий. В 1982 году была издана книга под редакцией В. А. Соколова «Геология шунгитовых вулканогенно-осадочных образований протерозоя Карелии». В ней на фоне шунгитовых образований Заонежья приводятся данные авторов по другим районам Карелии. Сделана первая попытка обобщить геологические материалы по вулканогенно-осадочным породам. Все эти образования были включены в единый комплекс, эталоном которого принята заонежская свита, названная, по предложению В. А. Соколова, людиковием. По геологическим, литологическим и геохимическим данным устанавливается контрастная граница между ятулием и людиковием.

Я и Юрий Иванович Сацук продолжали исследования по карбонатным породам ятулия совместно с геологами СЗГУ, а затем по Заонежью и всей Южной Карелии.

В. А. Соколов, к великому нашему огорчению, тяжело заболел в 1986 году, и с этих пор приостановилась его профессиональная деятельность, но интерес к геологии у него не угас до последних дней жизни. Он внимательно и с интересом слушал наши новости о геологических событиях. Я продолжала работать с шунгитами. Пришла к выводу, что шунгит поступает из глубины. Кроме шунгитового вещества, содержащегося в туффитах, он обнаруживается в линзах неосадочного происхождения. В. А. Соколов был сторонником магматического происхождения шунгитов».

## Заключение

Жизненный путь В. А. Соколова был обозначен убеждением, что основой экономики Карелии должно стать в будущем использование недр. Он призывал в буквальном смысле слова заглядывать в завтрашний день, наполненный содержанием и целью работы.

В продолжение идей В. А. Соколова создана обзорная геологическая карта масштаба 1:750 000 на площадь более 320 000 км<sup>2</sup>, включающая территорию Республики Карелия и сопредельных областей северо-запада России и Восточной Финляндии. Разработана легенда, базирующаяся на международной стратиграфической шкале, в отличие от традиционных легенд государственных геологических карт РФ [Геологическая..., 2017]. На 33-й сессии МГК, которая прошла в Осло (Норвегия) в августе 2008 г., была принята Международная хроностратиграфическая шкала [Корень, 2009]. Она представляет собой последовательность таксономических единиц, отражающих идеальный полный разрез стратисферы Земли без пропусков и перекрытий, и тем самым может рассматриваться как эталон абсолютного геологического времени, в течение которого сформировалась осадочная оболочка Земли. Шкала служит мерной линейкой отдельных отрезков геологического времени и используется для корреляции интервалов стратисферы.

1 апреля 2005 года на здании Института геологии была установлена мемориальная доска Владимиру Алексеевичу Соколову (рис. 7).



Рис. 7. Мемориальная доска на стене здания Института геологии КарНЦ РАН

Fig. 7. Memorial plaque on the wall of the building of the Institute of Geology of the Karelian Centre of RAS

Открыл мероприятие председатель Президиума КарНЦ РАН, чл.-корр. РАН А. Ф. Титов. На открытии присутствовали зам. Председателя Правительства РК А. П. Мухин, члены Президиума КарНЦ РАН, сотрудники института, ветераны, пенсионеры, председатель агентства по недропользованию Л. В. Глушанин, директор территориального геологического фонда Б. Н. Сиваков, гл. геолог Карельской геологической экспедиции В. П. Михайлов, проректор ПетрГУ Г. Б. Стефанович, руководители горных компаний «Карбон-Шунгит», «Интеркамень» и др. На открытии выступили А. П. Мухин, В. В. Щипцов, В. С. Куликов, Л. П. Галдобина, В. И. Робонен и сын В. А. Соколова – А. В. Соколов.

## Литература

- Бацер И. М.* Человек с именем: Очерки. Петрозаводск: Карелия, 1987. 264 с.
- Богданов Ю. Б., Робонен В. И.* Результаты деятельности региональной межведомственной комиссии по Северо-Западу России // Геология Карелии от архея до наших дней. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 56–65.
- Геологическое наследие Карелии.* Путеводитель историко-геологических экскурсий по городу Петрозаводску и Центральной Карелии / Под ред. Л. В. Кулешевич, С. А. Светова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 207 с.
- Геология Карелии* / Отв. ред. В. А. Соколов. Л.: Наука, 1987. 231 с.
- Карелия.* Энциклопедия / Гл. ред. А. Ф. Титов. Петрозаводск: ПетроПресс, 2011. Т. 3. С. 112–113.
- Келлер Б. М., Кратц К. О., Митрофанов Ф. П., Семихатов М. А., Соколов Б. С., Соколов В. А., Шуркин К. А.* Достижения в разработке общей стратиграфической шкалы докембрия СССР // Известия АН СССР. Сер. геол. 1977. № 11. С. 16–21.
- Корень Т. Н.* Международная стратиграфическая шкала докембрия и фанерозоя: принципы построения и современное состояние. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 40 с.
- Кратц К. О., Негруца В. З., Соколов В. А. и др.* Новое в изучении стратиграфии докембрия советской части Балтийского щита // Советская геология. 1984. № 7. С. 105–118.
- Куликов В. С.* Владимир Алексеевич Соколов (к 90-летию со дня рождения) // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 11. С. 101–102.
- 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
- Медведев П. В.* Удивительный карельский самородок // Карельский научный центр: история в лицах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 333–345.
- Путеводитель геологической экскурсии по Карелии.* К международной конференции по тектонике докембрия восточной части Балтийского щита. Петрозаводск, 1971. 79 с.
- Светов А. П., Голубев А. И.* Вулканический аппарат ятулийского вулканического комплекса // ДАН СССР. 1967. Т. 171, № 1. С. 171–174.
- Светов А. П.* Палеовулканология ятулия Центральной Карелии. Л.: Наука, 1972. 113 с.
- Соколов В. А.* Геология и литология карбонатных пород среднего протерозоя Карелии. М.-Л.: АН СССР, 1963. 183 с.
- Соколов В. А.* К геологии верхнекарельских образований Северного Приладожья // Труды Карело-Финского филиала АН СССР. 1955. Вып. 3. С. 17–27.
- Соколов В. А.* К геологии и палеогеографии ятулия Карелии // Геология докембрия. МГК. 27 сессия. Доклады советских геологов. М.: Наука, 1984. С. 61–76.
- Соколов В. А.* К геологии протерозойских (верхнекарельских) карбонатных пород южной части КАССР // Труды Карельского филиала АН СССР. 1958. Вып. 2. С. 197–225.
- Соколов В. А.* Карельские агрономические руды. Петрозаводск: Госиздат КФССР, 1956. 35 с.
- Соколов В. А.* О циклическом строении терригенно-карбонатной толщи протерозоя Южной Карелии // Труды Карельского филиала АН СССР. 1960. Вып. 26. С. 58–64.
- Соколов В. А.* Очерки о карельских известняках, доломитах и мраморе. Петрозаводск: Госиздат КФССР, 1955. 56 с.
- Соколов В. А., Галдобина Л. П.* Людиковий – новое стратиграфическое подразделение нижнего протерозоя Карелии // ДАН СССР. 1982. Т. 267, № 1. С. 187–190.
- Соколов В. А., Галдобина Л. П., Рылеев А. В., Сацук Ю. И., Светов А. П., Хейсканен К. И.* Геология, литология и палеогеография ятулия Центральной Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1970. 363 с.
- Соколов В. А., Галдобина Л. П., Рылеев А. В., Сацук Ю. И., Светов А. П., Хейсканен К. И.* Новый вулканический комплекс в протерозое Карелии // ДАН СССР. 1965. Т. 161, № 3. С. 675–678.
- Соколов В. А., Галдобина Л. П., Рылеев А. В., Сацук Ю. И., Светов А. П., Хейсканен К. И.* Некоторые формы предъятулийского погребенного рельефа в Карелии // ДАН СССР. 1966. Т. 168, № 2. С. 432–434.
- Соколов В. А., Стенарь М. М.* Принципы расчленения и корреляции восточной части Балтийского щита // Принципы и критерии расчленения докембрия в мобильных зонах. Л.: Наука, 1980. С. 140–173.
- Соколов В. А., Хейсканен К. И.* Этапы формирования химических кор выветривания в докембрии // Геология докембрия. МГК. 27 сессия. Доклады советских геологов. Т. 5. М.: Наука, 1984. С. 35–43.
- Стратиграфия докембрия Карельской АССР (архей, нижний протерозой)* / Отв. ред. В. А. Соколов. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1984. 115 с.
- Геология шунгитоносных вулканогенно-осадочных образований протерозоя Карелии:* Сб. науч. трудов / Ред. В. А. Соколов. Петрозаводск: Карелия, 1982. 204 с.

*Шунгиты* – новое углеродистое сырье: Сб. науч. трудов / Ред. В. А. Соколов, Ю. К. Калинин, Е. Ф. Дюккиев. Петрозаводск: Карелия, 1984. 182 с.

*Шунгиты Карелии и пути их комплексного исследования*: Сб. науч. трудов / Ред. В. А. Соколов, Ю. К. Калинин. Петрозаводск: Карелия, 1975. 240 с.

## References

Batser I. M. The man with the name: Sketches. Petrozavodsk: Karelia; 1987. 264 p. (In Russ.)

Bogdanov Y. B., Robonen V. I. Results of the Regional Interdepartmental Commission for the North-West of Russia. *Geologiya Karelii ot arkheya do nashikh dnei = Geology of Karelia from the Archean to the present day*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. P. 56–65. (In Russ.)

Guide to a geological excursion in Karelia. International conference on Precambrian tectonics of the Eastern part of the Baltic Shield. Petrozavodsk; 1971. 79 p. (In Russ.)

Keller B. M., Kratz K. O., Mitrofanov F. P., Semikhatov M. A., Sokolov B. S., Sokolov V. A., Shurkin K. A. Achievements in the development of the general stratigraphic scale of the Precambrian of the USSR. *Izvestiya AN SSSR. Ser. geol. = Izvestia AS USSR. Ser. Geol.* 1977;11:16–21. (In Russ.)

Koren' T. N. International stratigraphic scale of the Precambrian and Phanerozoic: principles of construction and current state. St. Petersburg: VSEGEI; 2009. 40 p. (In Russ.)

Kratz K. O., Negruzta V. Z. Sokolov V. A. et al. New in the study of the Precambrian stratigraphy of the Soviet part of the Baltic Shield. *Sovetskaya geologiya = Soviet Geology*. 1984;7:105–118. (In Russ.)

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

Kulikov V. S. Vladimir A. Sokolov (on the 90<sup>th</sup> anniversary). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2017;11:101–102. (In Russ.)

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

Medvedev P. V. The amazing Karelian nugget. *Karel'skii nauchnyi tsentr: istoriya v litsakh = Karelian Scientific Centre: History in Persons*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. P. 333–345. (In Russ.)

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

Sokolov V. A. (ed.). Geology of shungite-bearing volcanogenic-sedimentary formations of the Proterozoic of Karelia: Proceedings. Petrozavodsk: Karelia; 1982. 204 p. (In Russ.)

Sokolov V. A. (ed.). Stratigraphy of the Precambrian of the Karelian ASSR (Archean, Lower Proterozoic). Petrozavodsk: KF AN SSSR; 1984. 115 p. (In Russ.)

Sokolov V. A. Essays on Karelian limestones, dolomites and marble. Petrozavodsk: Gosizdat KFSSR; 1955. 56 p. (In Russ.)

Sokolov V. A. Geology and lithology of carbonate rocks of the Middle Proterozoic of Karelia. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1963. 183 p. (In Russ.)

Sokolov V. A. Karelian agronomical ores. Petrozavodsk: Gosizdat KFSSR; 1956. 35 p. (In Russ.)

Sokolov V. A. On the cyclic structure of the terrigenous-carbonate strata of the Proterozoic of South Karelia. *Trudy Karelo-Finskogo filiala AN SSSR = Proceedings of the Karelian-Finnish Branch of the USSR Academy of Sciences*. 1960;26:58–64. (In Russ.)

Sokolov V. A. To geology and palaeogeography of the Jatulia of Karelia. *Geologiya dokembriya. MGK. 27 sessiya. Doklady sovetskikh geologov = Precambrian Geology. IGC. 27<sup>th</sup> session. Reports of Soviet geologists*. Moscow: Nauka; 1984. P. 61–76. (In Russ.)

Sokolov V. A. To the geology of the Upper Karelian formations of the Northern Ladoga. *Trudy Karelo-Finskogo filiala AN SSSR = Proceedings of the Karelian-Finnish Branch of the USSR Academy of Sciences*. 1955;3:17–27. (In Russ.)

Sokolov V. A. To the geology of Proterozoic (Upper Karelian) carbonate rocks of the southern part of the KASSR. *Trudy Karelo-Finskogo filiala AN SSSR = Proceedings of the Karelian-Finnish Branch of the USSR Academy of Sciences*. 1958;2:197–225. (In Russ.)

Sokolov V. A., Galdobina L. P. Ludikovii – a new stratigraphic subdivision of the Lower Proterozoic of Karelia. *DAN SSSR = DAN USSR*. 1982;267(1):187–190. (In Russ.)

Sokolov V. A., Galdobina L. P., Ryleev A. V., Satsuk Y. I., Svetov A. P., Heiskanen K. I. Geology, lithology and palaeogeography of the Jatulian of Central Karelia. Petrozavodsk: Karelia; 1970. 363 p. (In Russ.)

Sokolov V. A., Galdobina L. P., Ryleev A. V., Satsuk Y. I., Svetov A. P., Heiskanen K. I. New volcanic complex in the Proterozoic of Karelia. *DAN SSSR = DAN USSR*. 1965;161(3):675–678. (In Russ.)

Sokolov V. A., Galdobina L. P., Ryleev A. V., Satsuk Y. I., Svetov A. P., Heiskanen K. I. Some forms of the Proterozoic buried relief in Karelia. *DAN SSSR = DAN USSR*. 1966;168(2):432–434. (In Russ.)

Sokolov V. A., Heiskanen K. I. Stages of the chemical weathering crust formation in the Precambrian. *Geologiya dokembriya. MGK. 27 sessiya. Doklady sovetskikh geologov = Precambrian Geology. IGC. 27<sup>th</sup> session. Reports of Soviet geologists*. Moscow: Nauka; 1984. P. 35–43. (In Russ.)

Sokolov V. A., Kalinin Y. K., Dyukkiev E. F. (eds.). Shungites – a new carbonaceous raw material: Proceedings. Petrozavodsk: Karelia; 1984. 182 p. (In Russ.)

Sokolov V. A., Kalinin Y. K. (eds.). Shungites of Karelia and ways of their complex research: Proceedings. Petrozavodsk: Karelia; 1975. 240 p. (In Russ.)

Sokolov V. A., Stenar M. M. Principles of dissection and correlation of the Eastern part of the Baltic Shield. *Printsipy i kriterii raschleneniya dokembriya v mobil'nykh zonakh = Principles and criteria of Precambrian*

*dissection in mobile zones*. Leningrad: Nauka; 1980. P. 140–173. (In Russ.)

*Svetov A. P., Golubev A. I.* Volcanic apparatus of the Yatulian volcanic complex. *DAN SSSR = DAN USSR*. 1967;171(1):171–174.

*Svetov A. P.* Palaeovolcanology of the Yatulian of Central Karelia. Leningrad: Nauka; 1972. 113 p.

*Titov A. F. (ed.)*. Karelia. Encyclopaedia. Vol. 3. Petrozavodsk: PetroPress; 2011. P. 112–113. (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 05.08.2024; принята к публикации / accepted: 17.09.2024.*  
*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.*

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

##### **Щипцов Владимир Владимирович**

д-р геол.-мин. наук, заведующий отделом минерального сырья ИГ КарНЦ РАН; профессор кафедры наук о Земле и геотехнологий ПетрГУ

*e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com*

#### **CONTRIBUTOR:**

##### **Shchiptsov, Vladimir**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Mineral Materials Department, Institute of Geology KarRC RAS; Professor, PetrSU

## 110 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ КАУКО ОТТОВИЧА КРАТЦА (1914–1983)

Кауко Оттович Кратц родился 16 июня 1914 года в г. Садбери (Канада) в семье рабочего, эмигрировавшего в 1906 году в Канаду из княжества Финляндского Российской империи. Окончил горно-техническое училище в Садбери. В 1932 году семья переехала в СССР. В Петрозаводске Кауко Оттович преподавал в строительном техникуме, затем до поступления в университет работал на авторемонтном заводе.

В. А. Соколов рассказывал, что в 1937 году в Ленинграде готовилась очередная сессия Международного геологического конгресса, в программу которого была включена геологическая экскурсия в Карелии. Возглавлявший эту экскурсию профессор В. М. Тимофеев скончался до начала конгресса, поэтому его дело продолжили ученики Н. Г. Судовиков и Л. Я. Харитонов под руководством проф. А. А. Полканова. Кауко, тогда еще студент, очень пригодился профессору, так как был внештатным его переводчиком, обучал его английскому языку, помогал общаться с иностранцами. Такова была первая практика Кауко Оттовича в геологической деятельности и общении с иностранными туристами. В 1939 году он окончил с отличием биолого-почвенный факультет Ленинградского государственного университета.

В предвоенные годы работал геологом в Ленинградском геологическом управлении. В начале Великой Отечественной войны участвовал в обороне блокированного Ленинграда в составе истребительной части УНКВД. В 1942 году был отправлен на лечение в Иркутск и там, в Сибири трудился в качестве геолога Восточно-Сибирского нерудного треста. После войны К. О. Кратц год работал в Центральной научно-исследовательской лаборатории геологии НКПСМ в Москве и подготовил сводный отчет по проблеме абразивного граната. С 1946 года начался длительный путь исследователя



древнейших образований Балтийского щита в геологическом отделе Карело-Финской научной базы АН СССР с должности младшего научного сотрудника.

В 1946 г. в Петрозаводске К. О. Кратц поступил в заочную аспирантуру, которую окончил в 1949 году по кафедре петрографии, в 1950 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Иотнийские диабазовые интрузии Карелии и их железорудное оруденение». Руководителем аспиранта был академик А. А. Полканов.

В дальнейшем К. О. Кратц сконцентрировался на проблемах стратиграфии и тектоники протерозоя Карелии, с 1948 по 1957 год вел тематические исследования. Определенный период руководил отделом региональной геологии.

В 1958 году в «Известиях Карельского и Кольского филиалов АН СССР» появляется статья «К расчленению и терминологии протерозоя Карелии». Речь идет об общей стратиграфической шкале. Кратц предлагает исключить существующий разнобой в терминологии и добиться общего понимания между исследователями.

Параллельно с 1949 по 1958 год в Петрозаводском государственном университете он читает курсы по общей петрографии, физико-химическим основам петрографии, структурной геологии и учению о геологических формациях.

Под его редакцией большим коллективом геологов Северо-Западного геологического управления, а также Карельского и Кольского филиалов АН СССР и некоторых других организаций создается Геологическая карта Карело-Кольского региона масштаба 1:1 000 000. Схема стратиграфии, предложенная Кауко Оттовичем, легла в основу государственной геологической карты и карт других масштабов, послужила канвой для составления карельского тома издания «Геология СССР» (1960 г.), редактором и основным автором которого стал Кратц. Он также являлся редактором ряда геологических карт Карело-Кольской серии масштаба 1:200 000.

С 1959 по 1962 г. К. О. Кратц работал старшим научным сотрудником в Лаборатории геологии докембрия АН СССР. Весной 1962 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Геология карелид Карелии» на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук.

В 1962 году происходит новый поворот в судьбе Кратца. Он возвращается в Петрозаводск. 31 октября 1962 г. назначается директором Института геологии Карельского филиала АН СССР.

В то время в геологии господствовала геосинклинальная концепция развития складчатых областей, и было практически важно использовать ее сильные положения применительно к глубоко метаморфизованному раннему докембрию. Так и действовали геологи группы К. О. Кратца в Карелии. Постановка этих исследований, проводившихся по запросу Северо-Западного геологического управления, была вызвана тем, что широко развернувшиеся в те годы на территории Карелии геологосъемочные и поисково-разведочные работы приносили все новые данные по геологии докембрия, которые не могли быть достаточно полно объяснимы с позиций существовавших ранее представлений, сложившихся к середине 1930-х годов в результате региональной геологической съемки.

Новые исследования потребовали развития методики изучения метаморфизованных осадочных и вулканогенных толщ докембрия, которая нашла свое выражение в опыте применения структурно-фациального анализа докембрия, в специализированном изучении слоистости и цикличности, в использовании данных радиометрии (в то время в основном калий-аргоновой). Разработанные К. О. Кратцем и его коллективом методические приемы нашли широкое практическое применение в работах геологов производственных организаций. Схема стратиграфии докембрия, предложенная К. О. Кратцем, легла в основу государственных геологических карт территории Карелии разного масштаба.

В 1966 г. К. О. Кратц назначается директором Лаборатории геологии докембрия АН СССР и переезжает в Ленинград. В 1967 году он довел становление лаборатории до завершения, и она получила новый статус – Института геологии и геохронологии докембрия АН СССР (ИГГД АН СССР). Кратц стал его директором, будучи избранным в 1968 г. членом-корреспондентом АН СССР по специальности «минералогия и петрография».

Идеи К. О. Кратца были направлены на создание советской геологической науки в области докембрия. И это определялось не только и не столько тем, что он многие годы возглавлял Институт геологии и геохронологии докембрия АН СССР и Научный совет по геологии докембрия при ОГГГГ АН СССР, но и его талантом исследователя и личными качествами.

К. О. Кратц был инициатором, руководителем и непосредственным исполнителем большинства коллективных исследований ИГГД АН СССР, в том числе и межведомственного характера. Появляются целые серии работ, посвященные глубинному строению СССР, принципам стратиграфии и геолого-геохронологического расчленения и корреляции нижнего и верхнего докембрия, задачам и методам радиологического анализа докембрийских образований и процессов, специфическим особенностям раннедокембрийских процессов тектогенеза, магматизма, метаморфизма, рудогенеза, методологическим аспектам древнейшей геологии. Впервые было показано, что структурно-вещественные комплексы докембрия, от раннеархейских до позднерифейских, слагают фундамент более чем 0,7 территории всей нашей страны, захватывая и краевые моря. Выявлены пределы применимости различных изотопных методов для датирования докембрийских образований и процессов и установлена связь изотопных датировок с глубинным строением и историей развития крупных блоков

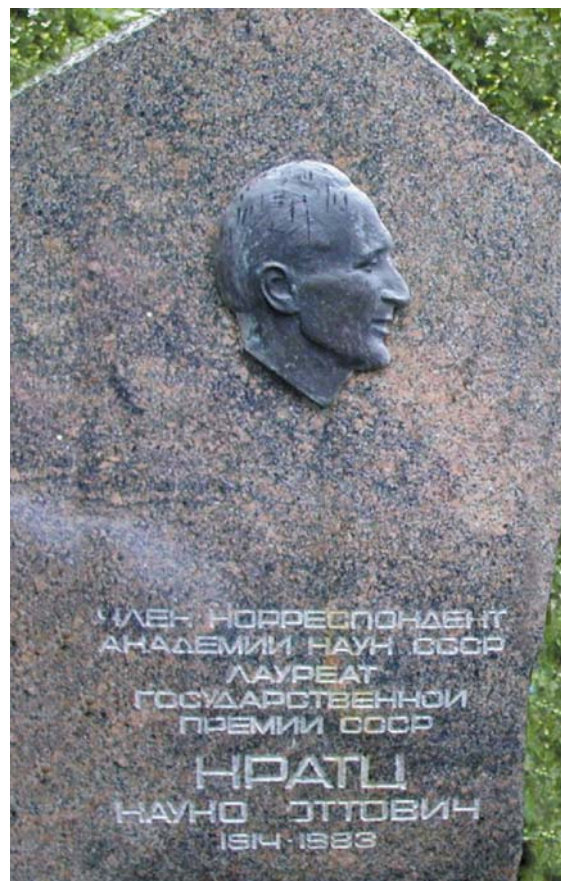
земной коры. Один только этот неполный перечень проблем показывает всеобъемлющий характер творческого наследия К. О. Кратца. Особое место в нем в последние годы его жизни занимали работы геолого-геохронологического и тектонического направления.

Кауко Оттович, безусловно, был авторитетнейшим ученым. Он мог объединять большие научные коллективы, которые решали на высоком научном уровне поставленные задачи.

В 1982 г. Президиум АН СССР присудил К. О. Кратцу премию имени А. П. Карпинского за серию работ по теме «Докембрийская земная кора материков, ее становление и эволюция». Золотая медаль имени А. П. Карпинского присуждается отечественным ученым за выдающиеся научные работы в области геологии, стратиграфии, петрологии и полезных ископаемых.

Необходимо напомнить о его роли в укреплении научных связей с зарубежными геологами в области докембрия, прежде всего с геологами Финляндии. Например, крупным событием стала Международная конференция по тектонике докембрия восточной части Балтийского щита с геологическими экскурсиями по Карелии в июне 1971 г., в проведении которой был немалый вклад К. Кратца. На протяжении 9 лет Кауко Кратц был сопредседателем советско-финляндской рабочей группы по научно-техническому сотрудничеству двух стран в области геологии. Первое ее заседание состоялось в 1972 году. Первый сопредседатель рабочей группы – Герман Стигцелиус (Финляндия), сопредседатели – Кауко Кратц (СССР) и Калеви Кауранне (Финляндия). Зарубежные научные командировки в Канаду, Швецию, Финляндию, ГДР, Болгарию позволили Кратцу и возглавляемым им научным коллективам глубже понять докембрийскую геологию, геохронологию и металлогению.

В 1989 году опубликованы избранные труды К. О. Кратца «Геология и геохронология докембрия» как свидетельство созданной научной школы геологов-докембристов. До последних минут своей жизни, которая оборвалась 23 января 1983 г., Кауко Оттович сохранял оптимизм, работоспособность, жизнелюбие и трудолюбие. У него были большие творческие планы. Вместе с академиком Б. С. Соколовым он задумал программу будущих комплексных исследований по проблеме «Докембрийская литосфера: ресурсы, состав, структура, процессы, время, жизнь». Вместе со своими учениками и сотрудниками он мечтал написать книгу «Докембрийская геология СССР». Все, казалось, было еще впереди...



Памятник на могиле К. О. Кратца на Сулажгорском кладбище в г. Петрозаводске



XXV Молодежная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения ученого, состоялась в 2014 г. в ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург



Открытие мемориальной доски памяти К. О. Кратца на здании Института геологии КарНЦ РАН. Слева направо: А. Ф. Титов, С. Б. Лобач-Жученко, В. А. Глебовицкий, В. В. Щипцов, Ф. П. Митрофанов. 2004 г.



Мемориальная доска памяти К. О. Кратца, установленная в 2014 году в ИГГД РАН

Кауко Оттович Кратц, заслуженный деятель науки Карельской АССР, лауреат Государственной премии СССР, лауреат премии АН СССР имени А. П. Карпинского, кавалер двух орденов Трудового Красного Знамени, член-корреспондент АН СССР, доктор геолого-минералогических наук, остается с нами и сегодня. В геологических академических институтах ИГГД РАН, ИГ КарНЦ РАН и ГИ КНЦ РАН ежегодно проходит геологическая конференция, посвященная его памяти. 1–4 октября 2024 года в ИГ КарНЦ РАН проводилась уже XXXV Молодежная научная школа-конференция «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии», посвященная памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова.

На здании Института геологии Карельского научного центра РАН в Петрозаводске в 2004 году установлена мемориальная доска, а осенью 2014 года мемориальная доска памяти К. О. Кратца открыта в стенах Института геологии и геохронологии РАН в Санкт-Петербурге.

*Редакционная коллегия серии «Геология докембрия», коллеги – сотрудники Института геологии КарНЦ РАН*



## ЛИТЕРАТУРА О К. О. КРАТЦЕ

Григорьев С. В. Кауко Оттович Кратц // Биографический словарь. Естествознание и техника в Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1973. С. 131–132.

Кратц Кауко Оттович // Карелия: энциклопедия: в 3 т. Т. 2 / Гл. ред. А. Ф. Титов. Петрозаводск: Петропресс, 2009.

Кратц Кауко Оттович // Кольская энциклопедия: в 5 т. Т. 2 / Гл. ред. А. Н. Виноградов. СПб.: КНЦ РАН, 2009.

Кратц Кауко Оттович // Ученые Карельского научного центра Российской академии наук. Биогр. словарь. 3-е изд., доп. и перераб. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 188–189.

Кратц Кауко Оттович. К 70-летию со дня рождения / Сост. В. В. Щипцов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. 47 с.

Мелуа А. И., Сясько В. А. Кратц Кауко Оттович (1914–1983) // Геологи, горные инженеры – члены Отделения наук о Земле и смежных специальностей РАН. 1724–2024. Т. 1. СПб.: Гуманистика, 2023. С. 630–632.

Митрофанов Ф. П. Кауко Оттович Кратц (1914–1983) – значение его личности и его идей для российской геологии // Геология и геоэкология Фенноскандии, Северо-Запада и Центра России: Мат-лы XI Молодежной науч. конф., посвященной памяти К. О. Кратца. Петрозаводск, 2000. С. 5–9.

Митрофанов Ф. П., Щипцов В. В. О Кратце и К. О. Кратце о себе // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 7–19.

Памяти Кауко Оттовича Кратца // Записки ВМО. 1983. Ч. 102, вып. 3. С. 381–382.

Премия имени А. П. Карпинского К. О. Кратцу // Вестник АН СССР. 1982. № 9. С. 140–141.

Саранчина Г. М., Лебедев В. И., Шинкарев Н. Ф. Памяти К. О. Кратца // Вестник ЛГУ, сер. Геология, география. 1983. № 24. С. 108–109.

Слабунов А. И., Первунина А. В. Кратц Кауко Оттович. Становление школы геологии докембрия на Северо-Западе России // Карельский научный центр РАН: история в лицах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 173–189.

Тимофеев В. Руна геологов // Лауреаты Государственной премии СССР 1983 года. Очерки. Петрозаводск, 1983. С. 39–56.

Щипцов В. В. 100 лет со дня рождения чл.-корр. АН СССР Кауко Оттовича Кратца // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 7. С. 211–212.

Щипцов В. В. Наш Кауко Кратц // Геология, полезные ископаемые и геоэкология Северо-Запада России: Мат-лы XX Всерос. конф. молодых ученых, посвящ. памяти чл.-корр. АН СССР К. О. Кратца. Петрозаводск, 2009. С. 5–6

Юбилей ученых. К. О. Кратцу – 60 лет // Вестник АН СССР. 1974. № 10. С. 112–113.

Kauko O. Kratz // Geology. 1983. Vol. 35, no. 2. P. 30.

## К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АЛЕКСАНДРА СТЕПАНОВИЧА ПЕККИ (1924–2008)

28 августа этого года исполнилось бы 100 лет Александру Степановичу Пекки, заслуженному работнику народного хозяйства Карельской АССР, кандидату геолого-минералогических наук, специалисту в области минерально-сырьевой базы полевошпатowego сырья.

А. С. Пекки работал в Институте геологии 25 лет, с первых дней его официального образования. Петр Алексеевич Борисов, основоположник нашего института, оказал большое влияние на начальную научную и практическую деятельность А. С. Пекки. Александр Степанович высоко ценил это и всегда с теплотой вспоминал профессора П. А. Борисова. Достаточно быстро Александр Степанович стал заведующим лабораторией минерального сырья, обладая опытом работы в тресте «Геолнеруд» на Полярном Урале. А. С. Пекки окончил геологоразведочный факультет Карело-Финского государственного университета, куда он перевелся через год после поступления в Томский госуниверситет. Он был сокурсником В. А. Соколова.

В Институте геологии Пекки работал горным инженером-геологом в Приладожском рудоуправлении, тресте «Ленгеолнеруд», затем в Коми-Ненецком геологическом управлении (г. Воркута).

Когда в 1965 году я поехал поступать на работу в Институт геологии после службы в армии по рекомендации известных в стране специалистов в области пегматитов профессоров П. П. Боровикова и В. Д. Никитина, а также знаменитого пегматитчика Ю. Е. Рыцка, они попросили меня передать привет Саше Пекки и уверили, что он окажет всякую поддержку и помощь. И это были не пустые слова, все было так и на деле – советы, доброжелательность и внимание к молодому специалисту. Таким образом я познакомился с Александром Степановичем.



А. С. Пекки защитил кандидатскую диссертацию в 1970 году на тему «Геолого-промышленная оценка месторождений полевошпатowego сырья южной и центральной Карелии». Защита проходила на диссертационном совете геологоразведочного факультета Ленинградского горного института. Руководителем диссертации был профессор Ленинградского горного института А. В. Скропышев.

В 1977 году в книге А. А. Пекки и В. И. Разреновой «Месторождения полевошпатowego сырья Карелии» (отв. редактор В. И. Терновой) были обобщены результаты научно-исследовательских и геологоразведочных работ по изучению минерально-сырьевой базы полевошпатовой



В. А. Соколов вручает А. С. Пекки Почетную грамоту за плодотворную научную работу и активное участие в общественной жизни (День геолога, 1969 г.)

промышленности Карелии. На основе разработанной авторами геолого-промышленной классификации даны характеристики промышленных типов месторождений полевошпатового сырья. Приведены сведения об изученности, геологическом строении, качестве и запасах полевошпатового сырья по месторождениям гранитных пегматитов и новых эффективных источников калиевого и высококалийного сырья – гранитов-рапакиви и кислых вулканогенных пород, показана их народнохозяйственная значимость на тот момент для удовлетворения потребностей основных отраслей промышленности страны.

Это было первое и достаточно полное обобщение широких и комплексных исследований, проведенных за последние 15–20 лет Северо-Западным территориальным геологическим управлением, Карельским филиалом АН СССР и другими организациями. «В целом рассматриваемая работа интересна, своевременна и полезна. Она вооружила геологов-практиков важным справочным материалом, оценкой перспектив развития геологоразведочных работ и керамической промышленности» – так отметил в предисловии отв. редактор, доктор геолого-минералогических наук, профессор Ленинградского горного института, лауреат Ленинской премии В. И. Терновой.

К этому времени Пекки стал зрелым и авторитетным специалистом. В 1983 году под его

научным руководством подготовлена новая монография по вскрышным породам Костомукшского железорудного месторождения. И эта изданная книга до сих пор сохраняет актуальность, являясь хорошим примером девиза «Наука – производству».

В Приладожье активно обрабатывались рекомендованные им пегматитовые жилы Лесная, Лупикко, Линнаваара и другие, проводилась комплексная оценка кварцевых порфиров Роза-Лампи и геллефлинт Костомукшского месторождения. Постановка пилотных геолого-технологических исследований сиенитов Ельтеозерского массива – это еще один пример его деятельности. Он осуществлял работы по договорам, связанные с керамическими пегматитами Средней Азии и Северного Кавказа, и множество других проектов.

Дальнейшее развитие, ценность и залог успеха исследований геологических объектов А. С. Пекки видел в комплексировании геологических, минералогических и технологических методов при изучении горных пород и минералов, что позволяло оценить их не только как геологический объект, но и разработать технологию обогащения, а тем самым приблизиться к ответу о пригодности к использованию в промышленном производстве. Именно он приложил немало усилий, чтобы в лаборатории полноценно развивалось технологическое направление исследований минерального сырья.

В лаборатории появились специалисты-обогатители, профессионалы в своем деле Люба Скамницкая, Володя Кевлич, Алексей Бархатов, Света Марьина.

В 1984 году мы отмечали 60-летие Александра Степановича. Юбилей он праздновал в ресторане «Калевала», где собрал всех дорогих его сердцу людей: семью (супругу Таисию Дмитриевну, сыновей с женами), родственников, друзей и, конечно, коллег по институту. Они-то и составляли самую большую и, может быть, самую заметную группу гостей. В ту пору я был ученым секретарем института, поэтому принимал активное участие в подготовке к юбилейному торжеству. На этом этапе Пекки решил покинуть пост заведующего лабораторией. Для меня было полной неожиданностью, что во мне он видел своего преемника. Многочасовые разговоры привели к тому, что я согласился на руководство бывшей его лабораторией, понимая большую ответственность и предъявляемые ко мне требования.

В 1980-е годы по просьбе генерального директора Костомукшского ГОКа Н. П. Ершова представитель нашего института должен был поехать на правительственное совещание в Кремль по вопросу возможностей использования геллефлинты в народном хозяйстве с совершенно конкретными предложениями. В то время шли бурные разговоры о поисках новых экономических решений, внедрении хозрасчета. Уж кто, как не Александр Степанович, знал этот вопрос досконально. Я обратился к нему с просьбой, чтобы он представительствовал, но он ответил, что я должен набираться опыта и только я должен ехать, а сам он поможет советами. К тому же состояние его здоровья было не на высоте. Пришлось ехать, и благодаря теплым и деловым советам ученого-практика А. С. Пекки удалось выдержать на кремлевском заседании под председательством заместителя председателя Совета министров СССР Н. Н. Ведерникова генеральный экзамен по практическому использованию геллефлинты.

С 1984 по 1986 г. А. С. Пекки был руководителем Музея геологии докембрия при Институте геологии.

После выхода на пенсию он часто заходил в нашу лабораторию, внимательно и небезучастно слушал о делах, наших успехах и трудностях. Уже потом, когда состояние здоровья Александра Степановича ухудшилось, мы старались по определенным датам приходить к нему. Всегда он и его жена Таисия Дмитриевна, преданная ему до его последних дней, радушно встречали нас. Александр Степанович живо реагировал на все происходящее. Он хранил в памяти

много важного и интересного. Я понимал, что ему было приятно знать, что его помнят.

Мне с семьей приходилось бывать в Димитровграде (Мелекесе). Я был приятно удивлен, что в местном краеведческом музее Александру Степановичу уделен целый стенд, который, помимо документального рассказа о нем, включает экспонируемые образцы полевошпатовой продукции и природного каменного материала Карелии, лично подаренные им этому музею. О годах жизни в Мелекесе и обстоятельствах, которые сложились в те годы, Александр Степанович рассказывал нам. Его сын Андрей Пекки повествует об этом в книге, которая была издана к 85-летию со дня рождения А. С. Пекки.

В упомянутой книге есть глава, написанная Е. И. Марковой, доктором филологических наук, зав. сектором литературы ИЯЛИ КарНЦ РАН, членом Союза писателей России. Эта глава называется «А. С. Пекки как литератор». В ней Елена Ивановна вспоминает об очерке Александра Степановича «По дороге в Костомукшу», опубликованном в начале 1990-х годов в газете «Петрозаводский университет» (№ 38 от 17 декабря 1992 г.; № 39 от 24 декабря 1992 г.; № 1 от 14 января 1993 г.; № 2 от 21 января 1993 г.): «Писать в это время о геологах, об их открытиях – это не только воскрешать в памяти былые дни, к коим был причастен и ты, но и не дать зачеркнуть свое время, сказать, что оно – «пустая порода», породившая пустых мечтателей от науки. Поэтому-то литературные заметки для Александра Степановича были не новым «хобби», не ворчанием старика («Да, были люди в наше время...»), а гражданским служением». Старший сын Александра Степановича Евгений Александрович Пекки привел перечень статей, который составил сам Александр Степанович: 1988 г. – 1 публикация; 1991 г. – 9; 1992 г. – 13; 1993 г. – 11; 1994 г. – 16; 1995 г. – 8; 1996 г. – 3; 1997 г. – 2; 1998 г. – 4. Маркова пишет: «Безусловно, учтены не все работы, нет, например, ссылок на мемуары о судьбе ингерманландцев в эвакуации, напечатанные в журнале «Carelia», и большую публикацию в журнале «Север». Со свойственной для исследователя серьезностью он подходит ко второй своей профессии, отвечая в каждой публикации на обязательные для журналиста вопросы: что? где? когда? Например, в эссе «Концерт» («Петрозаводский университет». № 4 от 30 января 1982 г.) речь идет о концерте знаменитого композитора В. П. Соловьева-Седого и группы артистов, который состоялся в декабре 1946 года в здании учительского института (позднее пединститута), что на углу улиц Ленина и Антикайнена».

Завершить статью памяти Александра Степановича Пекки хотелось бы воспоминаниями ветерана института Владимира Ивановича Кевлича: «С Александром Степановичем Пекки я познакомился в Институте геологии в 1964 году. Именно тогда меня приняли в лабораторию минерального сырья, которую возглавлял А. С. Пекки. Предполагалось, что я займусь изучением технологических свойств керамического сырья. К тому моменту это направление находилось в стадии зарождения. Я познакомился с А. С. Пекки, Тармо Кулмала и др. в первый полевой сезон. Первое мое впечатление было такое: он человек динамичный, с блистательной реакцией, умеющий уходить от стереотипов и принимать нестандартные решения.

Впоследствии это подтвердилось. Кроме того, меня изумила и покорила его всесторонняя эрудиция, мудрый жизненный опыт и доброжелательность. Сейчас, вспоминая, я думаю, как важен личный пример, корректность и обаяние, которые были присущи Александру Степановичу Пекки».

А. С. Пекки награжден золотой и бронзовой медалями ВДНХ СССР, медалями «За доблестный труд» и к 100-летию со дня рождения В. И. Ленина, почетными грамотами АН СССР, Совета министров КАССР и другими наградами.

Память о нем продолжает жить в наших сердцах.

*В. В. Щипцов*

## К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АНАТОЛИЯ ДМИТРИЕВИЧА ЛУКАШОВА (1934–2004)

Анатолий Дмитриевич Лукашов родился 2 ноября 1934 г. в Петрозаводске. В 1959 году окончил геологоразведочный факультет Петрозаводского госуниверситета. Судьба определила так, что он был принят на работу в Отдел геологии Карельского филиала АН СССР на должность лаборанта. С первого дня создания в 1961 году Института геологии Лукашов стал сотрудником данного учреждения и работал в нем до последнего дня своей жизни, до 7 мая 2004 года. В КФ АН СССР он был старшим лаборантом (1959–1963 гг.), младшим научным сотрудником (1963–1975 гг.). В 1971 году защитил кандидатскую диссертацию «Основные черты неотектоники Карелии» (научный руководитель К. О. Кратц). С 1975 по 1995 год А. Д. Лукашов – заведующий лабораторией четвертичной геологии и геоморфологии Института геологии. Избрание на эту должность – яркое свидетельство его научного авторитета. Он заведовал лабораторией на протяжении двадцати лет. Затем работал в должности ведущего научного сотрудника.

Его университеты – это не только Петрозаводский государственный, но – люди, в первую очередь люди творческие. И особенно люди театра. Он дружил с актером Национального театра Вилье Ахвоненом, с актерами «Творческой мастерской» Людмилой Живых, Георгием Ситко, Олегом Белонучкиным и Еленой Бычковой, с премьером Музыкального театра Залманом Эстриным. В связи с этим уместно вспомнить один из фрагментов воспоминаний о нем друга семьи, журналиста Дмитрия Свинцова: «За годы совместной жизни Лукашovy не надоели друг другу, и Эльвира Александровна объясняла это очень частыми расставаниями по разным причинам: своей долгой учебой в Ленинграде, длительными геологическими экспедициями Анатолия Дмитриевича.



Они просто успевали соскучиться на всю оставшуюся жизнь. Не скажешь про них «муж и жена – одна сатана». Эльвира Александровна со школы очень ответственная, правильная, общественно-увлеченная, Анатолий Дмитриевич, наоборот, увливал от всяких митингов и собраний как мог. У него была своя теория о двойственности мира: мужской пол и женский, лодыри и трудоголики, домоседы и путешественники, директорат и электорат... Знаменитое высказывание Максима Горького «Рожденный ползать летать не может» он трактовал по-своему. Не попал в летчики – стал геологом. Но все равно остался путешественником, передвигаясь во времени и пространстве.

Даже после того, как с ним случилась беда, он шутил: «Зато «летчиком» все-таки стал». На коммунистическом субботнике, разбирая с коллегами по Академии наук крышу овощехранилища, он рухнул с шестиметровой высоты вниз (проломилась старая крыша). Опыт, приобретенный в клубе ДОСААФ, спас от смерти, но перелома позвоночника избежать не удалось, он долго провалялся в больнице, где о нем уже заботилась Эльвира Александровна. Он любил возвращаться из длительных экспедиций в свой родной дом, где его любили. – Почему же меня не любить?! – восклицал он. – Пью в меру, сигареты курю дешевые, причем курю только в ванной. К тому же к своему 60-летию удостоился даже медали ордена «За заслуги перед Отечеством» второй степени... Да еще регулярно вожу Эльвиру Александровну в театр «Творческая мастерская» (из книги: Лукашов Анатолий Дмитриевич. Петрозаводск, 2010, с. 18–19). А. Д. Лукашов был не только эрудированным ученым с разносторонними интересами. Он был общительным, остроумным, веселым и справедливым человеком. Коллеги, друзья и знакомые, участники многочисленных экспедиций обожали его за оптимизм и юмор, порядочность и уважительное отношение к людям.

Основное научное направление исследований Лукашова – четвертичная геология, геоморфология, гляциотектоника, неотектоника, палеосейсмология. Он становится научным руководителем ряда тем и активно участвует в международном проекте «Продуктивность четвертичных отложений», включенном в Программу рабочей группы по научно-техническому сотрудничеству в области геологии между СССР и Финляндией, в проекте № 253 «Завершающий этап плейстоцена» Международной программы геологической корреляции (МППГК) под эгидой ЮНЕСКО. Большим вкладом становится его участие в составлении листов ряда обзорных карт территории Карелии: Геоморфологическая карта СССР. Масштаб 1:25 000 000. 1978 г.; Карта неотектоники Карелии. Масштаб 1:2 000 000. 1980 г.; Карта геоморфолого-неотектонического районирования Нечерноземной зоны РСФСР. Масштаб 1:1 500 000. 1984 г.; Международная карта четвертичных отложений Финляндии и Северо-Запада РФ и их сырьевых ресурсов. Масштаб 1:10 000 000. 1993 г. Последняя карта экспонируется в Музее геологии докембрия Института геологии КарНЦ РАН. Она отражает современные данные по строению четвертичного покрова, сформировавшегося в основном в ходе развития и стадийной деградации последнего

скандинавского ледникового покрова и сопряженных с ним приледниковых водоемов. На ней отмечены крупнейшие месторождения полезных ископаемых четвертичного периода.

Опубликовано более 100 его работ, в том числе две авторские и пять коллективных монографий. В ходе изучения неотектоники и палеосейсмологии им выделены новейшие структуры различного порядка, в разной степени унаследованные от докембрийских складчатых и блоковых структур. Определен основной стиль новейшей тектоники Карелии, характеризующийся перемещением жестких блоков фундамента по долгоживущим или омоложенным древним разломам. А. Д. Лукашов отмечал, что вертикальные движения блоков преобладают над горизонтальными (Лукашов А. Д. Новейшая тектоника Карелии. Л.: Наука, 1976). Выявлены гляциоизостатические компенсационные движения земной коры, сопровождающиеся землетрясениями. Следы их проявились в различных типах послеледниковых палеосейсмодислокаций в докембрийских и четвертичных образованиях (Lukashov A. Paleoseismotectonics in the Northern part of Lake Onego (Zaonezskij Peninsula, Russian Karelia). Geologian Survey of Finland. Report YST-90, Espoo, 1995). Уже после его кончины вышла в свет монография с его участием (Елина Г. А., Лукашов А. Д., Токарев П. Н. Картографирование растительности и ландшафтов на временных срезах голоцена таежной зоны Восточной Фенноскандии. СПб.: Наука, 2005), затем переведенная на английский язык.

Большое значение для его научного мировоззрения имело знакомство с Кауко Оттовичем Кратцем. Сам Анатолий Дмитриевич, вспоминая об этом, говорил, что Кратц в его жизни сыграл роковую роль, потому что под его влиянием он стал «четвертичником». С легкой руки Кауко Оттовича Анатолий Дмитриевич был брошен на помощь географам, геоморфологам и палинологам, чтобы к ним добавить специалиста в области коренной геологии, следствием чего получилась четвертичная геология. Вот так Анатолий Дмитриевич говорил на заседании Ученого совета, посвященного 70-летию К. О. Кратца, 15 июня 1984 г.: «Два момента в связи с этим мне хотелось бы вспомнить. Момент первый – поступление в аспирантуру. Кауко Оттович говорит: «Надо в аспирантуру поступать. Неотектоника, есть такое направление». Но я тогда еще только начинал и говорю, что не знаю, что это такое. В ответ: «Если бы ты знал, нечего было бы в аспирантуру идти. Не знаешь, значит, и сделаешь». Второй момент – это сдача кандидатских экзаменов. Кратц определяет:

«...геотектоника – это такая наука, которая стоит на стыке двух наук – геоморфологии и тектоники. Значит, сдавать надо два экзамена – геоморфологию и тектонику. Поедешь в Московский университет, там у тебя примут два экзамена...», а затем добавляет: «...а что это тебе даст? Ну, выучишь ты по книжкам геоморфологию и сдашь, выучишь геотектонику и сдашь. Значит, такой будет экзамен – это принципы, легенда и самообоснование морфологической карты Карелии» (стенографическая запись). Между ними долгие годы существовали теплые и дружеские отношения. Последняя их встреча состоялась незадолго до смерти К. О. Кратца, 18 января 1983 года в больнице в Ленинграде.

Известный сейсмолог А. А. Никонов писал, что в Карелии пионерские и наиболее продвинутые исследования сейсмодиформаций осуществлены А. Д. Лукашовым. «Им выявлено на территории республики 8 участков распространения сейсмодиформаций и подробно изучен

Онежский участок» (Глубинное строение и геодинамика Фенноскандии, окраинных и внутриплатформенных транзитных зон. Петрозаводск, 2002, с. 178).

С 1998 г. Анатолий Дмитриевич совмещал научную деятельность с педагогической, вернувшись в свою alma mater, где он читал курс лекций по дисциплине «Общая геология» на кафедре геологии и геофизики (ныне кафедра наук о Земле и геотехнологий) и участвовал в учебной практике студентов первого курса.

Он награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени и медалью «Ветеран труда», грамотами Президиума РАН и КарНЦ РАН.

Человек жив, пока о нем помнят. Мы хорошо помним дорогого нам Анатолия Дмитриевича и рассказываем о нем молодому поколению!

*Редакционная коллегия серии  
«Геология докембрия», коллеги –  
сотрудники Института геологии КарНЦ РАН*



## 85 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ СЕРГЕЯ ИВАНОВИЧА РЫБАКОВА (1939–2000)

Заслуженный деятель науки КАССР, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик РАН С. И. Рыбаков принадлежит к плеяде крупных ученых в области геологии и металлогении докембрия.

Он родился 3 марта 1939 года в деревне Большие Лихачи Дивеевского района Горьковской (ныне Нижегородской) области. В 1962 году окончил геологический факультет МГУ по специальности «геология и разведка месторождений полезных ископаемых». По распределению был направлен работать в Петрозаводск, в Институт геологии Карельского филиала АН СССР, где прошел путь от старшего лаборанта до заместителя председателя Президиума КФ АН СССР (1986–1987 гг.), и в том же году Сергей Иванович Рыбаков был утвержден Президиумом АН СССР на пост директора Института геологии КФ АН СССР, которым руководил до последнего дня жизни – 21 февраля 2000 г.

В 1970 году Сергей Иванович Рыбаков защитил кандидатскую диссертацию, в 1983 году в Московском государственном университете он защищает диссертацию на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук на тему «Колчеданное рудообразование в раннем докембрии Балтийского щита». В 1979 году С. И. Рыбакову присвоено ученое звание старший научный сотрудник по специальности 04.00.14 «Геология, поиски и разведка рудных и нерудных месторождений».

Основное направление научной деятельности – геология и металлогения раннего докембрия.

В 1986 году Сергей Иванович возглавил лабораторию металлогении, в 1988 году переименованную в лабораторию геодинамики и металлогении, которой руководил до 1995 года.



Являлся научным руководителем ряда научно-исследовательских работ, в том числе «Металлогения и факторы контроля благороднометалльного оруденения в докембрии Карелии».

Под его руководством в лаборатории исследовались вулканогенно-осадочные комплексы зеленокаменных поясов и рифтогенных структур раннего протерозоя, колчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения, началось изучение закономерностей формирования минерализации и рудопроявлений благородных металлов.

Он участвовал в разработках методов палеофациального и палеовулканологического анализа древних осадочно-вулканогенных

комплексов, предложил концепцию реакционно-обменного взаимодействия при метаморфогенном рудообразовании. Впервые для мировой геологической науки С. И. Рыбаков установил и изучил реликты архейских палеовулканических построек, обосновал выделение в Карелии новой благороднометалльной провинции.

С. И. Рыбаков всегда поддерживал сотрудничество с производственными организациями. Совместная деятельность с ПГО «Севзапгеология» осуществлялась с целью комплексного анализа геолого-геофизических материалов, полученных на территории восточной части Балтийского щита. Были разработаны и переданы производству рекомендации на поисковые работы медно-цинковых руд и редкометалльных пегматитов в Хаутаваарской зоне и др. В качестве директора института Сергей Иванович выступал инициатором и активным участником ряда совместных региональных программ в области изучения, освоения и использования минерально-сырьевых ресурсов Карелии, регулярно выступал в печати по этому вопросу.

Он активно способствовал развитию международных связей Института геологии с геологическими организациями Индии, Канады, Норвегии, США, Финляндии, Швеции. Под его руководством организованы и проведены международные и российские совещания по проблемам геологии, рудообразования и металлогении докембрия. Заложен фундамент теплых и дружественных отношений Геологической службы Финляндии и Института геологии именно тогда, когда генеральными директорами ГСФ были Вейкко Лаппалайнен и Калеви Кауранне, а директором Института геологии – Сергей Рыбаков. С 1997 года совместно с финскими геологами исследования стали проводиться в рамках договора научно-исследовательского центра Финляндии и Института геологии КарНЦ РАН, подписанного 7 октября 1997 года в г. Петрозаводске. Они велись по определенным направлениям.

В 1978 году опубликованы работы «Вулканические постройки протерозоя Карелии», авторы В. А. Соколов, В. И. Робонен, С. И. Рыбаков, А. П. Светов, и «Серноколчеданные месторождения Карелии (геология, метаморфизм, генезис)», авторы В. Д. Конкин, В. И. Робонен, Г. В. Ручкин, С. И. Рыбаков. В монографиях приведены результаты исследований с использованием палеовулканологических методов, проведен анализ истории геологического развития региона в нижнем протерозое и показаны условия образования серноколчеданных руд.

В 1980 году С. И. Рыбаков издает монографию «Метаморфизм осадочно-вулканогенных формаций раннего докембрия Карелии», в основу которой вошли результаты исследований архейских вулканогенно-осадочных комплексов в сопоставлении с зеленокаменными поясами докембрийских щитов мира. Здесь же обсуждаются закономерности метаморфической зональности и регенерации колчеданных месторождений. В 1981 году под редакцией В. А. Соколова выходит в свет монография коллектива авторов Института геологии «Вулканизм архейских зеленокаменных поясов Карелии», авторы С. И. Рыбаков, А. И. Светова, В. С. Куликов, В. И. Робонен, В. Я. Горьковец, М. Б. Раевская и др., где впервые приводится обобщение материала по архейскому вулканизму Карелии. В 1987 году издана обобщающая монография С. И. Рыбакова «Колчеданное рудообразование в раннем докембрии Балтийского щита».

Сергей Иванович был руководителем раздела межотраслевой программы «Платина России» и региональных проектов «Платина Карелии» и «Золото Карелии». Материалы этих исследований обобщены в опубликованной в 1993 году издательством «Наука» монографии коллектива авторов «Металлогенная эволюция архейских зеленокаменных поясов Карелии. Ч. I: Вулканизм, седиментогенез, метаморфизм и металлогения», ответственный редактор Ю. И. Лазарев. В своих работах С. И. Рыбаков предложил общую систематику колчеданных месторождений и выделил четыре тектономагматических цикла – саамский, лопийский, карельский и свекофеннский, каждый из которых характеризуется особым палеотектоническим режимом и обстановками рудообразования.

В 1996 году в сборнике трудов, посвященном 50-летию Карельского научного центра РАН, С. И. Рыбаков с коллективом авторов Института геологии публикует обзорную статью о геологических обстановках нахождения докембрийского золоторудного проявления в Карелии. В 1999 году под редакцией С. И. Рыбакова и А. И. Голубева вышла в свет коллективная монография «Металлогения Карелии», ставшая завершающим трудом Сергея Ивановича.

Всего С. И. Рыбаков опубликовал более 150 научных работ, в том числе 12 монографий. О высоком научном авторитете С. И. Рыбакова, его роли ведущего специалиста в области геологии и металлогении раннего докембрия свидетельствует то, что ряд его работ опубликованы в Финляндии, Швеции, Чехословакии.

По идее С. И. Рыбакова стал выходить ежегодный тематический сборник «Геология и полезные ископаемые Карелии». Он возглавил редакционную коллегию. Второй номер издания 2000 года был посвящен памяти Сергея Ивановича.

С. И. Рыбакова всегда отличала принципиальность, скромность, самокритичность. Он был добр и внимателен по отношению к окружающим, много сил отдал сохранению научных кадров и развитию материально-технической базы института в условиях сложных экономических и политических событий в стране. Именно эти качества руководителя института помогли в период перестройки коллективу института не дрогнуть, а продолжать в тяжелой финансовой ситуации научную деятельность. Он не допустил хаоса, растаскивания имущества, сохранил единство коллектива и веру в служение науке. Сотрудники института того времени хорошо это понимают и благодарны Сергею Ивановичу за это и многое другое.

С. И. Рыбаков являлся членом специализированного совета по защите диссертаций в ИГГД РАН, членом Научного совета по проблемам

металлогении и рудообразования РАН, членом Президиума Карельского научного центра РАН, председателем Совета молодых ученых Карелии. Награжден Юбилейной медалью за доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина (1970), почетными грамотами АН СССР, Совмина КАССР, памятной медалью М. В. Ломоносова. Активная общественная позиция С. И. Рыбакова проявилась в том, что он был секретарем бюро ВЛКСМ Института геологии, членом Петрозаводского горкома ВЛКСМ, являлся председателем Совета молодых ученых при Карельском обкоме ВЛКСМ, много лет входил в состав партийного бюро, профкома Института геологии и Объединенного комитета профсоюза КФ АН СССР.

Смерть подкралась неожиданно, вызвав мгновенную остановку сердца; лишь несколько дней он не дожил до 61 года. Похоронен Сергей Иванович на мемориальном кладбище в Сулажгоре в Петрозаводске.

*Редакционная коллегия серии  
«Геология докембрия», коллеги –  
сотрудники Института геологии КарНЦ РАН*

## ВАСИЛИЙ ИВАНОВИЧ ИВАЩЕНКО (к 75-летию со дня рождения)

Василий Иванович Иващенко родился 26 августа 1949 года в Краснодарском крае. В 1971 году окончил Новочеркасский политехнический институт. 50 лет тому назад начал работать в Институте геологии КФ АН СССР в должности старшего лаборанта, затем поочередно становился младшим, старшим и ведущим научным сотрудником. В 1981 году в ИГЕМ РАН защитил кандидатскую диссертацию на тему «Минералогия, петрография генезис скарноворудных образований Северного Приладожья» по специальности «петрография, вулканология», что определило основные направления его исследований в области петрологии и рудообразования, минералогии, магматизма и металлогении.

Важной вехой в творческой деятельности В. И. Иващенко стало выполнение проектных заданий по Программам фундаментальных исследований Президиума РАН: проект «Минерагения Онежского рудного района: основы прогнозирования месторождений стратегических видов минерального сырья и новых их типов в Карельском регионе» 2009–2011 гг.; проект «Комплексная оценка ресурсной базы традиционных и новых типов докембрийских месторождений благородных металлов в перспективных рудных районах Карельского региона» 2012–2014 гг.; проект «Металлогения благородных и редких металлов докембрия Карелии: прогнозная оценка и перспективы» 2015–2017 гг.; проект «Основные источники и прогнозная оценка минерально-сырьевого потенциала стратегических и высокотехнологичных металлов на территории Карелии» 2018–2020 гг. В настоящее время В. И. Иващенко является научным руководителем раздела 1 темы НИР № 216: «Минерагенические и рудообразующие системы докембрия Карелии».



Основные результаты научной деятельности текущего периода:

- выделены рудноформационные, минеральные и промышленные типы оруденения критических металлов на территории Карелии с последующим определением специфики докембрийского рудогенеза этих металлов;
- определены главные минеральные рудные ассоциации и минералого-геохимические индикаторы оруденения металлов платиновой группы (МПГ) в рудных объектах пудожгорского типа (месторождения Пудожгорское, Койкарское-Викша, проявления Мотко, Куолисма);

- установлено исключительное разнообразие редкометалльной (Bi, Te, Se, Be, In) минерализации (самородные металлы, оксиды и гидроксиды, карбонаты, теллуриды, селениды, сульфиды, сульфосоли, бораты и силикаты) в Питкярантских скарновых месторождениях в связи с существенными вариациями физико-химических условий ее образования (Т,  $\log fO_2$ ,  $\log fS_2$  и др.), определяемых дискретно-пульсационным поступлением флюидов, генерируемых в каждый из шести магматических импульсов формирования Салминского анортозит-рапакивигранитного батолита;

- обоснован вывод о том, что минералы Be (>10) и In (рокезит) встречаются преимущественно в апоскарновых грейзенах;

- установлены главные особенности распределения In в рудах и минералах скарновых месторождений Питкярантского рудного района, определяющиеся преимущественно его изоморфным вхождением ( $Cu^{+1} In^{+3}$ )  $\leftrightarrow$  ( $Zn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ) в структуру сфалерита.

Одной из его практических задач было научное руководство программой исследований на основе договора с ООО «Семченское золото» на выполнение работы по проекту «Геохимическое опробование дифференцированных интрузивов Карельского региона на благородные металлы». В соответствии с техническим заданием на научно-исследовательские работы проведены рекогносцировочные исследования и геохимическое опробование мафических интрузивов в Ладожской, Онежской и Селецкой структурах в период с 2017 по сентябрь 2019 гг.

В. И. Иващенко характеризуется постоянной творческой активностью. В представленном далеко не полном списке научных публикаций раскрывается его многогранная деятельность:

*монографии*

- Скарновое оруденение олова и вольфрама южной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1987;

- Вулкан-плутонизм свекокарелид Балтийского щита. Петрозаводск: КНЦ АН СССР, 1990. (Совместно с А. П. Световым, Л. П. Свириденко.);

- Магматогенно-рудная (Mo, W, Cu, Au) система ялонварского вулканоплутонического комплекса архея Карелии. Петрозаводск, 1994. (Совместно с О. Б. Лавровым.);

- Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. (Совместно с А. И. Голубевым.);

- Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерогения). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. (Совместно с коллективом авторов.);

*отдельные статьи настоящего периода*

- Минерально-сырьевая база Карельской Арктики – перспективы развития и освоения // Арктика: экология и экономика. 2019. №3(35). С. 123–134. (Совместно с В. В. Щипцовым.);

- Минерально-сырьевой потенциал (Pd, Pt, Au, Sc) Кааламского магматического комплекса (Карелия, Приладожье) // Горный журнал. 2020. № 3. С. 40–44;

- Rare-Metal (In, Bi, Te, Se, Be) Mineralization of Skarn Ores in the Pitkäranta Mining District, Ladoga Karelia, Russia // Minerals. 2021. Vol. 11. Art. 124;

- Geology, geochemistry and mineralogy of indium resources at Pitkäranta Mining District, Ladoga Karelia, Russia // Journal of Geochemical Exploration. 2022. Vol. 240. Art. 107046;

- Critical metals mineralization in the late-stage intrusions of Salmi batholith, Ladoga Karelia, Russia. Minerals. 2023. Vol. 13. Art. 648.

Василий Иванович выступал с докладами на российских и региональных конференциях, участвует в экспедиционных работах, руководил ВКР студентов кафедры наук о Земле и геотехнологий ИЛГСН ПетрГУ.

Активную международную деятельность на протяжении многих лет отражает его участие в целом ряде проектов:

- Международный проект Tacis Cross-Border Co-operation Small Project Facility IMSEDIGIS TSP/RK/9803/094. «Development of Suojarvi District as a Model Area for Sustainable Development with the Example of the International Biosphere Reserve in Finnish and Russian Karelia». 1990 г.;

- Международный проект IGCP-373 (INTAS) «Ore-Bearing Granites of Russia and Adjacent Countries». Moscow, IMGRE. 2000 г.;

- «Металлогения южной части Фенноскандинавского щита». 2003–2008 гг. Договор ИГ КарНЦ РАН с университетом г. Турку, Финляндия (координатор с российской стороны);

- Проект “Research Center For prognosis of Large and Superlarge Mineral Deposits (COCOP RUS/3B1/800). Российско-французская металлогеническая лаборатория. 2004 г.;

- Договор с некоммерческой организацией Фонд «Наука и будущее» (г. Москва) на проведение научно-исследовательских работ по подготовке международной геологической экскурсии в Северном Приладожье для участников 12-го Международного IAGOD симпозиума. 2006 г. (научный руководитель);

- Международный проект «FENGOT» – Фенноскандинавский золотой трансект (Геологические службы Финляндии, Швеции и Норвегии, Россия – ИГ КарНЦ РАН, ГИ КНЦ РАН, ФГБУ «Минерал»). 2007–2013 гг.;

- Международный проект «Металлогения отдельных регионов Фенноскандинавского щита» по договору с университетом г. Турку, Финляндия. 2009–2016 гг.

С целью эффективного продолжения образовательной деятельности и дальнейшего повышения квалификации в 2018 году Василий Иванович прошел обучение по программе «Современные образовательные технологии реализации программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре в соответствии с ФГОС ВО» Межрегионального гуманитарно-

технического университета ООО «Научно-образовательные технологии».

В. И. Иващенко награжден Почетной грамотой Президиума РАН (2004 г.), Почетными грамотами КарНЦ РАН (2006, 2011, 2019 гг.) и др.

Желаем Василию Ивановичу Иващенко доброго здоровья и успехов в творческой деятельности.

*Редколлегия серии «Геология докембрия»  
журнала «Труды Карельского научного  
центра РАН»*

## 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 завершённых 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 учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил её 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 высылаются 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 высылаются 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.

Объём 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. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (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](mailto: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 клейках (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 желательным 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 groenlandicus* (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 желательным 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<sup>1\*</sup>, О. В. Балан<sup>1</sup>, В. А. Корнева<sup>2</sup>, И. Е. Малышева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), \*topchieva@ya.ru

<sup>2</sup>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<sup>1\*</sup>, O. V. Balan<sup>1</sup>, V. A. Korneva<sup>2</sup>, I. E. Malysheva<sup>1</sup>. 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**

<sup>1</sup>Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*topchieva@ya.ru

<sup>2</sup>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

Funding. 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 последствии 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 <sup>2</sup> Chloroplast cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм <sup>2</sup> Mitochondria cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм <sup>2</sup> Peroxisome cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	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 mitochondria 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 Dulldurga:

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., Loisesides 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., Loisesides 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 онлайн-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. 6, 2024**  
**“PRECAMBRIAN GEOLOGY ” Series**

**TABLE OF CONTENTS**

ORIGINAL ARTICLES

N. A. Bozhko. GEODYNAMIC EVOLUTION OF THE EASTERN PART OF THE BALTIC SHIELD AGAINST THE BACKGROUND OF SUPERCONTINENTAL CYCLICITY . . . . .	5
P. V. Medvedev. PRECAMBRIAN BANDED IRON FORMATIONS: PALEOECOLOGICAL AND PALEO-BIOLOGICAL ASPECTS . . . . .	17
A. I. Slabunov, A. A. Isachenko. LITHOGEOCHEMISTRY OF THE SHURLOVAARA BANDED IRON FORMATION, KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT, KARELIAN CRATON, RUSSIA . . . . .	30
Yu. L. Voytekhovskiy, D. G. Stepenschikov, A. A. Zakharova. STATISTICAL DESCRIPTION OF MINERAL INTERGROWTHS IN ROCKS AND ORES . . . . .	51
A. M. Ilyin, A. V. Shmakov, D. R. Semochkin. STUDIES OF RADON-222 OCCURRENCES WITHIN THE ONEGA PALAEOPROTEROZOIC STRUCTURE, REPUBLIC OF KARELIA . . . . .	58

HISTORY OF SCIENCE

V. V. Shchiptsov. KARELIAN SCHOLARLY GEOLOGIST VLADIMIR A. SOKOLOV . . . . .	68
--	----

DATES AND ANNIVERSARIES

110th anniversary of birth of Kauko O. Kratz (1914–1983) . . . . .	85
V. V. Shchiptsov. 100th anniversary of birth of Aleksandr S. Pekki (1924–2008) . . . . .	90
90th anniversary of birth of Anatolii D. Lukashov (1934–2004) . . . . .	94
85th anniversary of birth of Sergei I. Rybakov (1939–2000) . . . . .	97
Vasilii I. Ivashchenko (on the 75th anniversary) . . . . .	100

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS . . . . .	103
------------------------------------	-----

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра  
Российской академии наук**  
№ 6, 2024

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 22.10.2024. Дата выхода 31.10.2024. Формат 60x84<sup>1/8</sup>.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,2. Усл. печ. л. 12,8.  
Тираж 100 экз. Заказ 824. 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