

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.

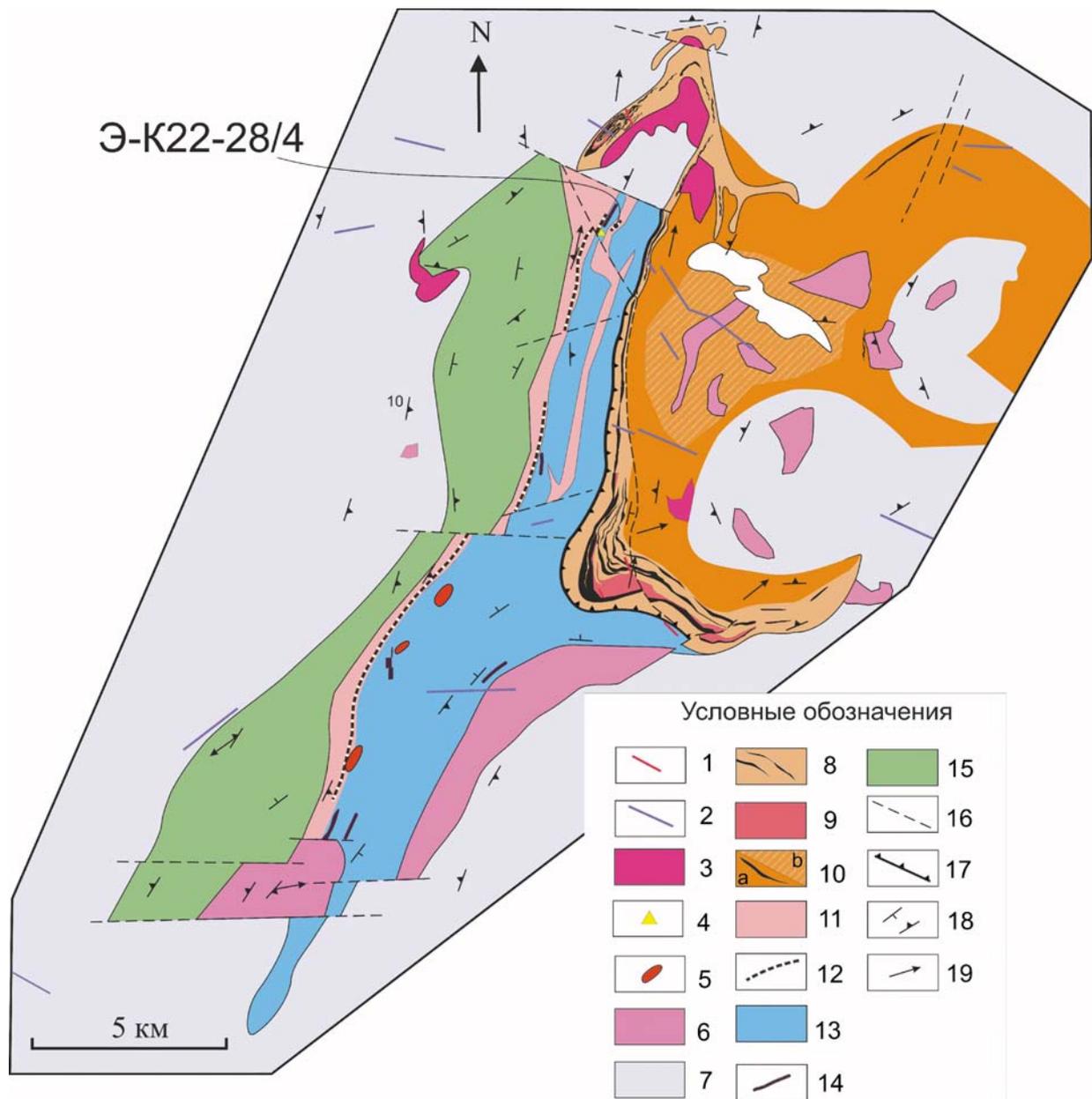


Рис. 1. Схема геологического строения Костомукшского зеленокаменного пояса [Лазарев, 1971; Горьковец и др., 1991; Кулешевич, Фурман, 2009; Мудрук и др., 2024; Слабунов и др., в печати; Slabunov et al., 2024b, c с дополнениями] и место отбора пробы Э-K22-28/4:

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; Höltta 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

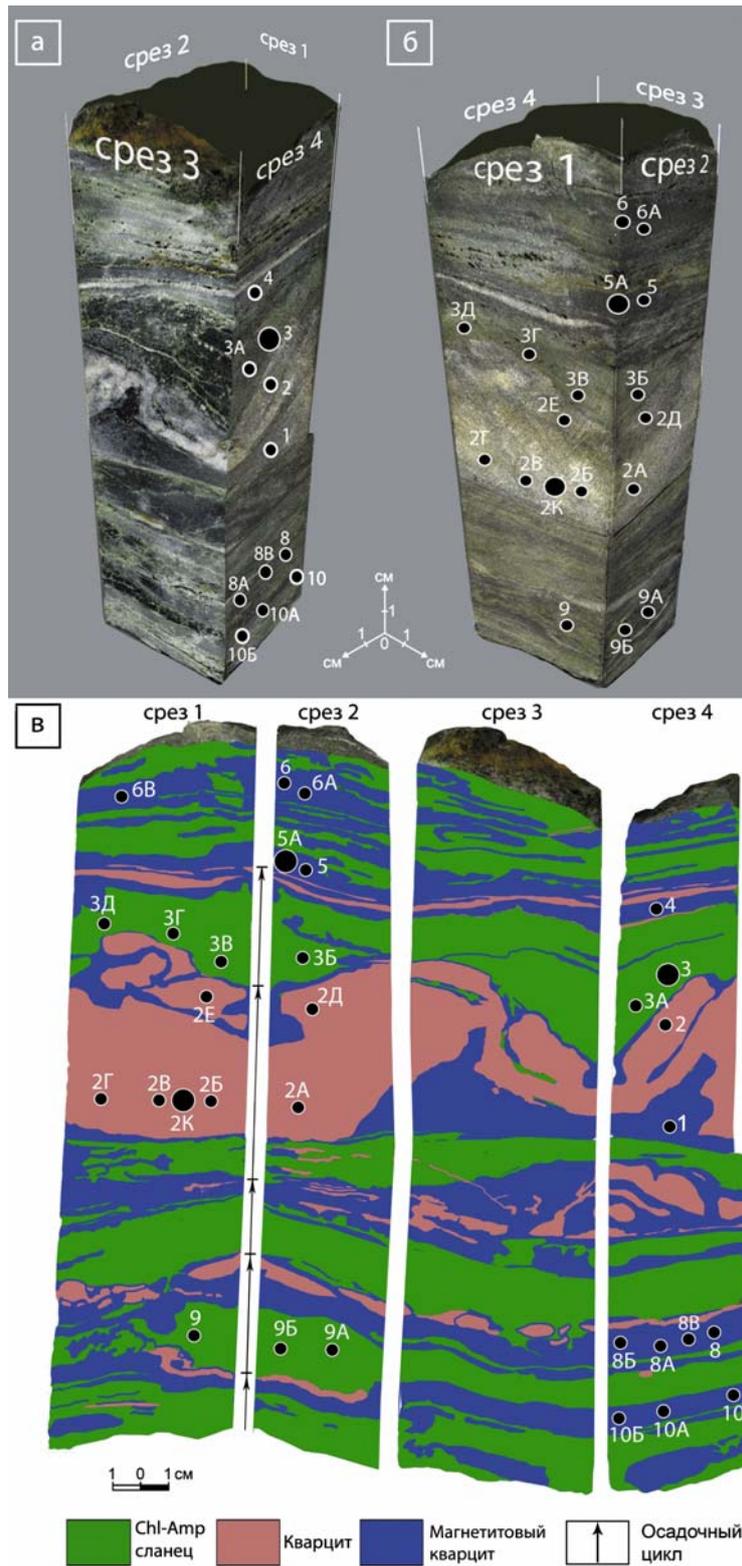


Рис. 2. 3D (а, б) и 2D по плоскостям среза 1–4 (в) модели образца BIF-2 Э-K22-28/4; окружности с черной заливкой и маркировкой (номера соответствуют таковым в табл. 1 и 2): мелкие – места отбора керн, крупные – спилы

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.

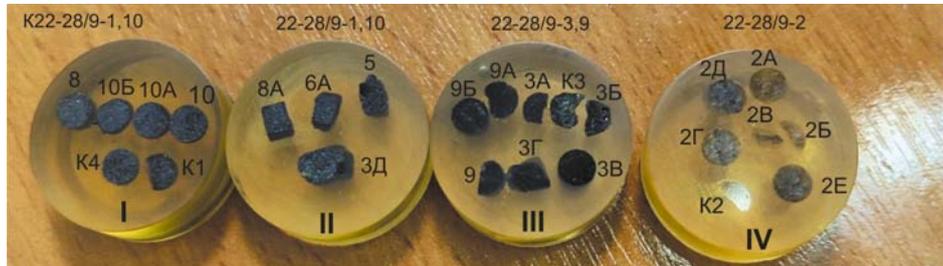


Рис. 3. Шайбы (диаметр 25 мм) аншлифов микрокернов из различных слоев BIF-2
Fig. 3. Mounds (25 mm in diameter) of the polished sections of cores from the various layers of BIF-2

Таблица 1. Химический состав (окислы в мас. %) BIF (Э-K22-28/4), 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 ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	П.п.п. Р.	сумма total
Э-K22-28/4	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 порфиρο-лепидо-нематобластовая. Порфирировые 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),

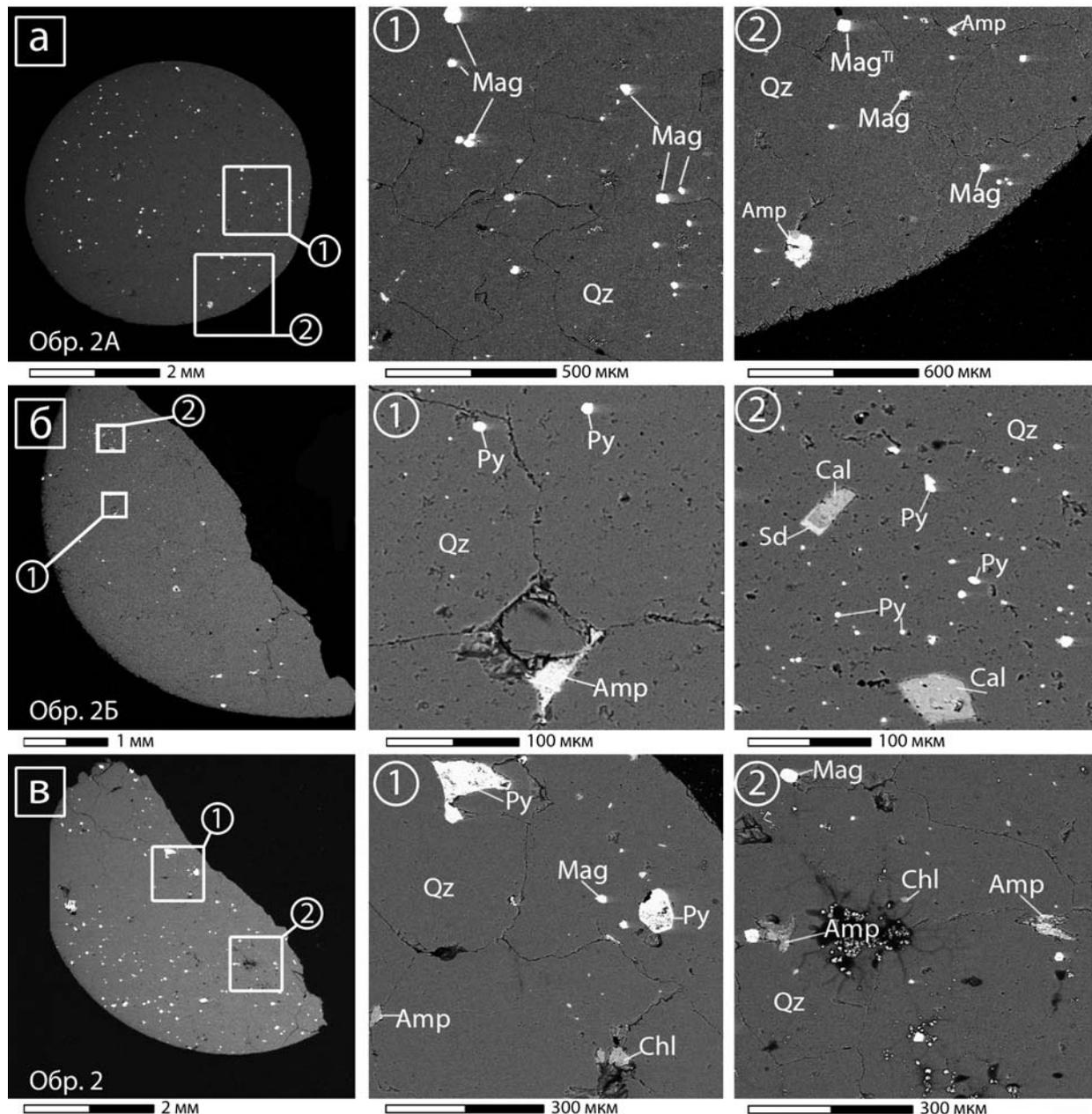


Рис. 4. BSE-изображения шлифов прослоев кварцитов из BIF-2: а – обр. 2А, б – обр. 2Б, в – обр. 2. Названия минералов [Warr, 2021]: Amp – амфибол, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Qz – кварц, Mag – магнетит, Py – пирит, Sd – сидерит

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

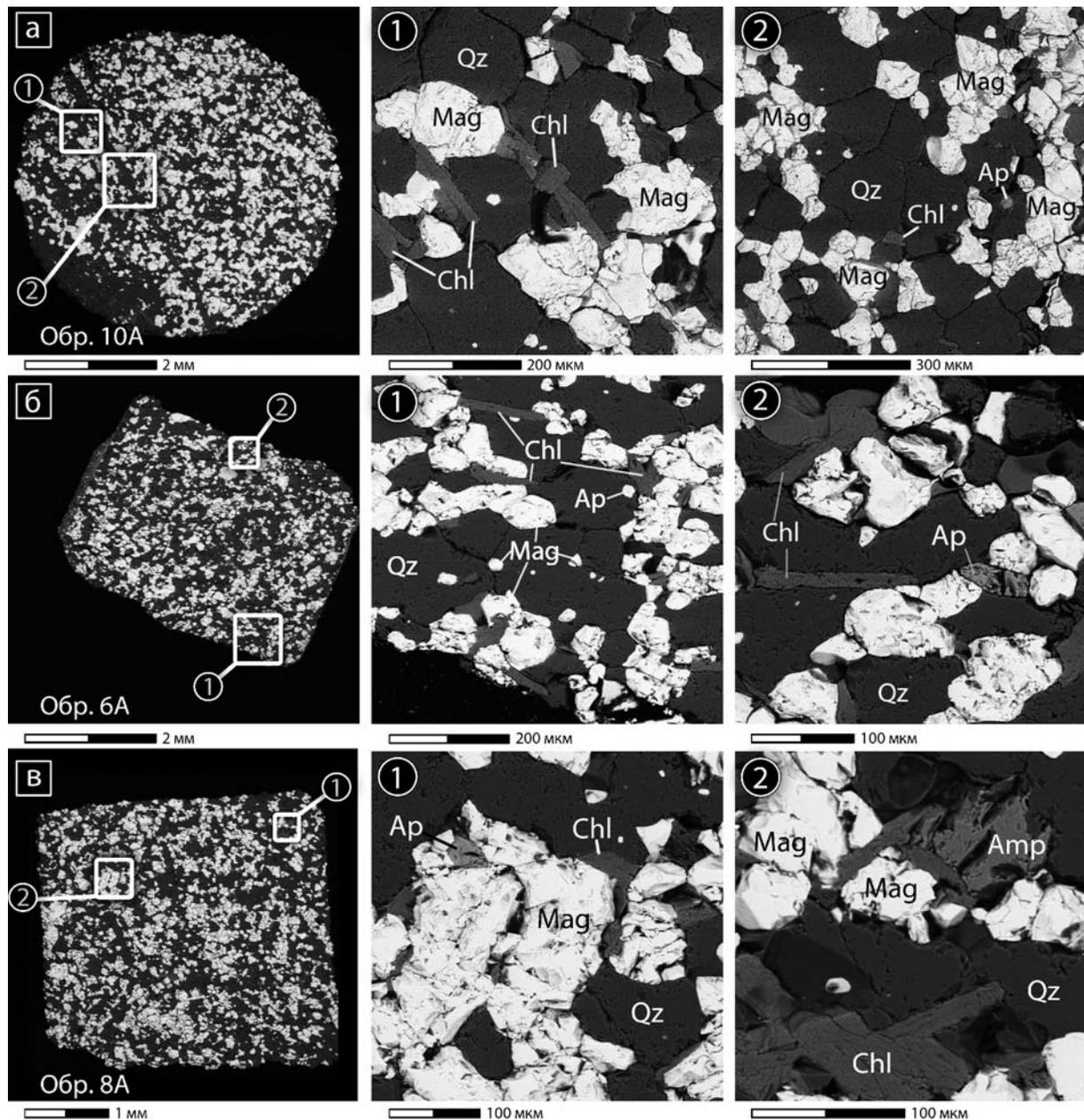


Рис. 5. BSE-изображения шлифов прослоев магнетитовых кварцитов из BIF-2: а – обр. 10А, б – обр. 6А, в – обр. 8А. Названия минералов [Warr, 2021]: Amp – амфибол, Ap – апатит, Chl – хлорит, Qz – кварц, Mag – магнетит

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

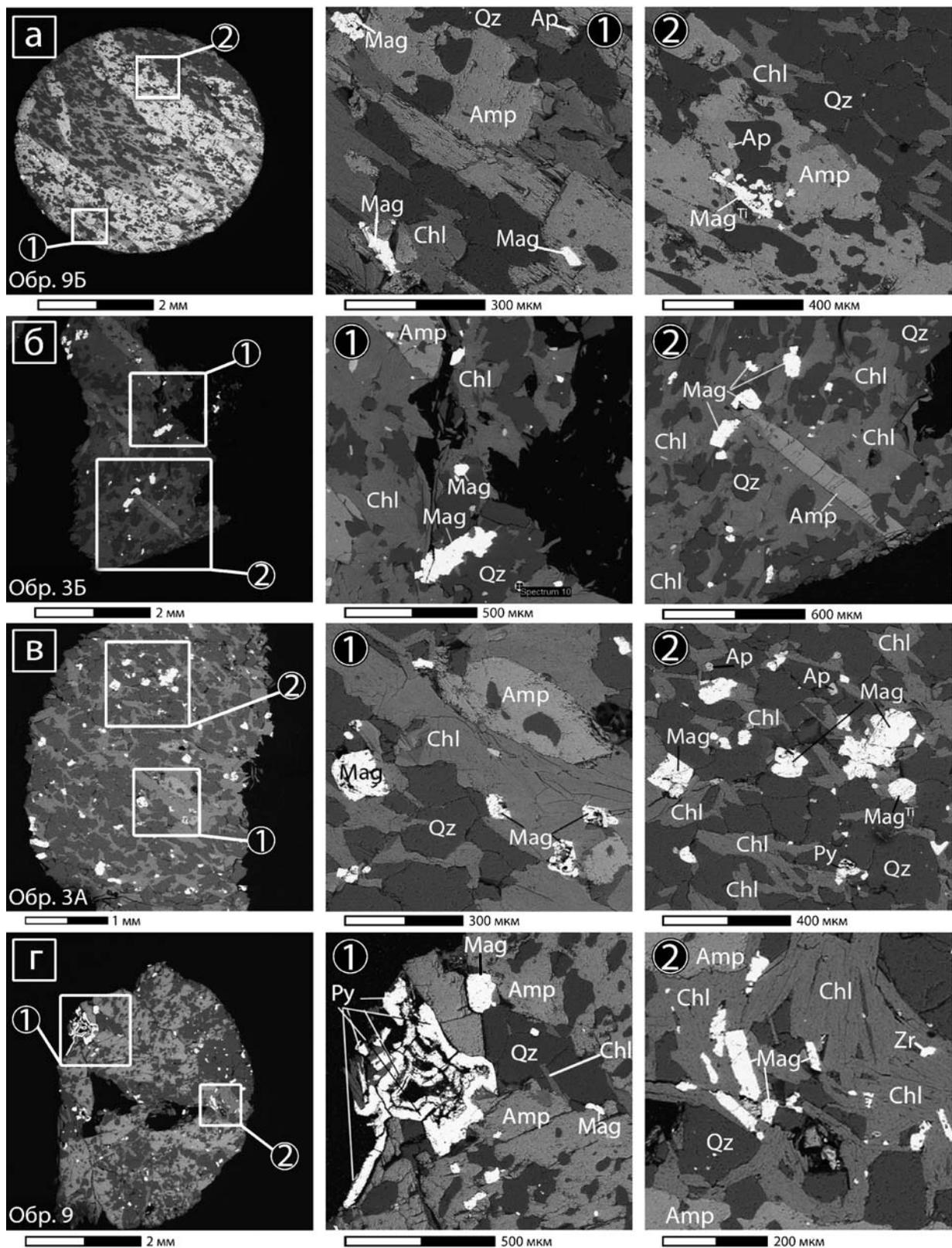


Рис. 6. BSE-изображения прослоев хлорит-амфиболовых сланцев из BIF-2: а – обр. 9Б, б – обр. 3Б, в – обр. 3А, г – обр. 9. Названия минералов [Warr, 2021]: Amp – амфибол, Ap – апатит, Chl – хлорит, Qz – кварц, Mag – магнетит, *Mag^{Ti} – титаномагнетит, Py – пирит, Zr – циркон, * – название модифицировано

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^{Ti} – 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).

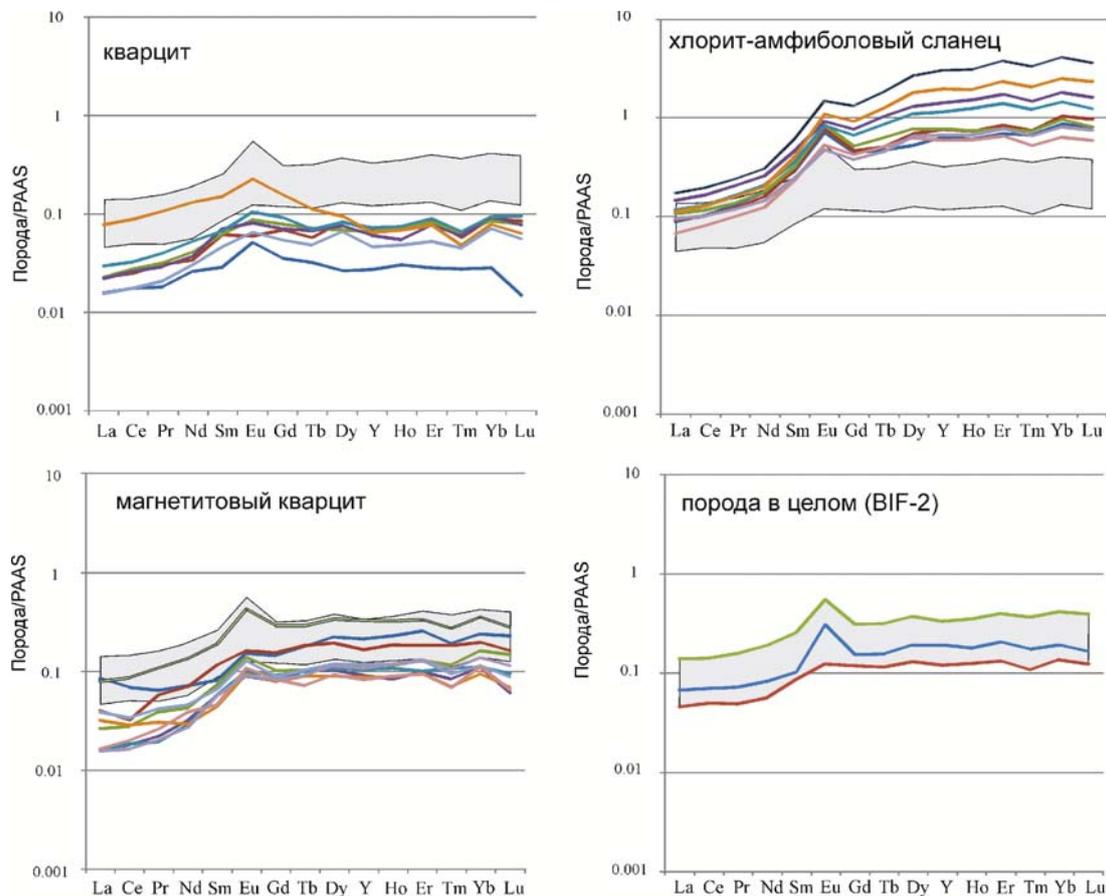


Рис. 7. PAAS-нормированные [Nance, Taylor, 1976] содержания РЗЭ+Y в слоях кварцитов, магнетитовых кварцитов, хлорит-амфиболовых сланцев из образца Э-K22-28/4 и породы (BIF-2) в целом (серое поле):

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, magnetite 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^T (51,7 %) и низким SiO₂ (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 Al₂O₃, TiO₂, 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).

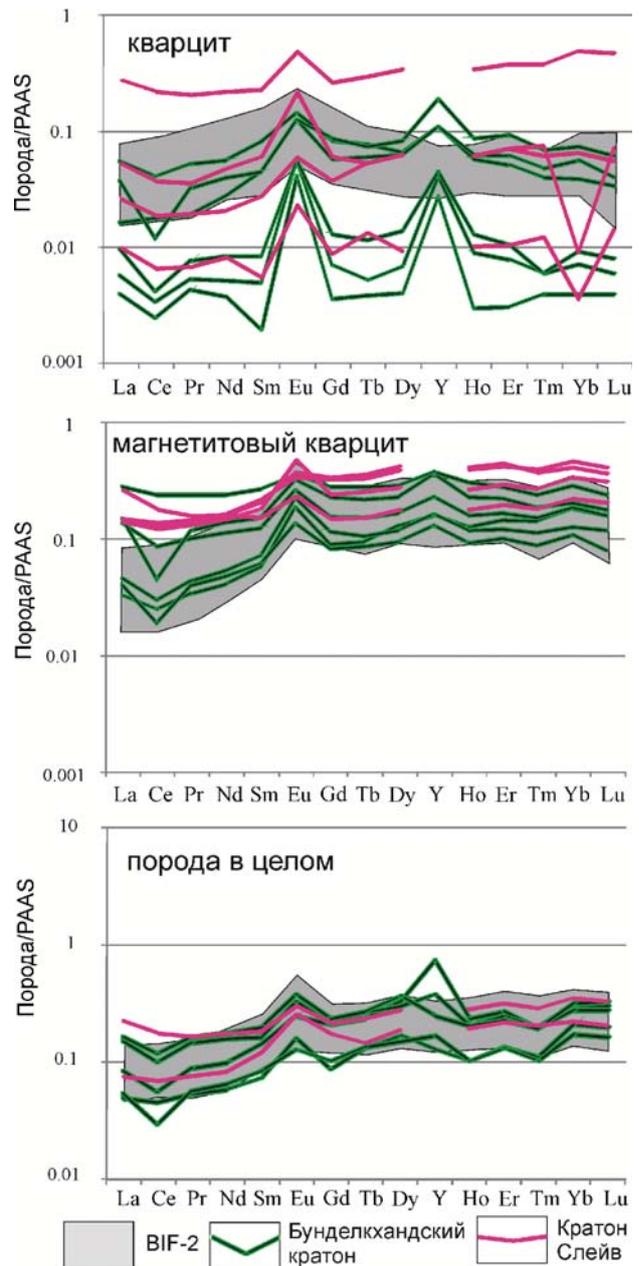


Рис. 8. PAAS-нормированные [Nance, Taylor, 1976] содержания РЗЭ+Y в слоях кварцитов, магнетитовых кварцитов и породы в целом из BIF шурловарской свиты Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона (BIF-2), Центрально-Бунделкхандского зеленокаменного комплекса Бунделкхандского кратона [Alfimova 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).

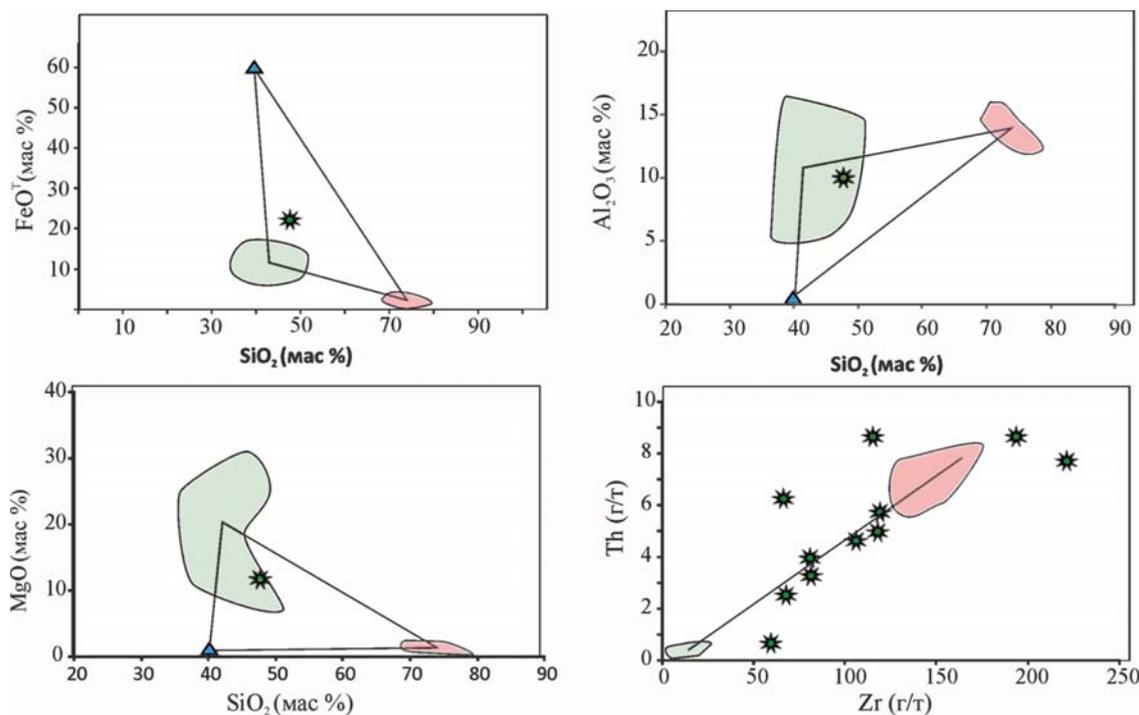


Рис. 9. Бинарные диаграммы для хлорит-амфиболовых сланцев из BIF-2 (зеленые звезды) и ассоциирующихся с ними пород Костомукшского зеленокаменного пояса (коматиит-базальтового комплекса [Puchtel et al., 1998; Slabunov et al., 2024c] – зеленое поле, кислых вулканитов шурловаарской свиты [Бибикова и др., 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 циклическость: 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* (2nd 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

Hölttä 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., 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. 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 4th 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*, 2nd 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. 75th 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 Archaean: 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 Archaean greenstone complex, Bundelkhand Craton, Central India: Geology, composition, and geochronology of supracrustal rocks. *Int. Geol. Rev.* 2015;57:1349–1364. doi: 10.1080/00206814.2014.919613

Slabunov 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 4th 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