

УДК 553.6 (470.22)

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА КАРЕЛИИ: ПРОМЫШЛЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ

В. В. Щипцов^{1,2*}, С. А. Светов¹

¹ Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *vv.shchiptsov@gmail.com

² Петрозаводский государственный университет (пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

На протяжении десятилетий промышленным минералам Карелии отводилось большое место в области теоретических исследований и практического применения. В статье объясняется использование термина «промышленные минералы» для определенной группы полезных ископаемых. Отмечено, что некоторые металлические полезные ископаемые без металлургического передела применяются как промышленные минералы. Выделены главные перспективные виды промышленных минералов Карелии, приведен общий анализ состояния изученности минерально-сырьевой базы промышленных минералов с оценкой запасов или ресурсов, выделены стратегически и экономически важные промышленные минералы по многофакторности состояния, в первую очередь нахождения в арктической зоне Республики Карелия. К таким промышленным минералам отнесены графиты и флюориты Приладожья, высокочистый кварц арктической зоны РК, включая пегматитовые отвалы Плотины и Климовского участка, кианиты и мелкочешуйчатый мусковит Хизоваарской структуры, щелочные сиениты Елетьозерского интрузивного комплекса, высокоуглеродистые шунгитовые образования, архейские карбонат-талковые толщи Каменноозерской структуры, нетрадиционные комплексные источники полевого шпата (Роза-Лампи и др.). Предлагается повысить роль органов государственного управления в области разработки специальных целевых программ, обеспечивающих увеличение масштабов геологоразведки, добычи и глубокой переработки промышленных минералов силами республиканских горных предприятий, а также привлечь Институт геологии КарНЦ РАН и Институт лесных, горных и строительных наук ПетрГУ для участия в систематическом внедрении в производство инновационных технологий и передовых решений в области менеджмента и управления горнодобывающей отраслью.

Ключевые слова: минерально-сырьевая база; промышленные минералы; месторождения; проявления; недра; Фенноскандинавский щит; докембрий; инновации

Для цитирования: Щипцов В. В., Светов С. А. Минерально-сырьевая база Карелии: промышленные минералы // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 5–44. doi: 10.17076/geo2208

Финансирование. Исследования выполнены в рамках госзадания по теме № 216 плана НИР, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

V. V. Shchiptsov^{1,2*}, S. A. Svetov¹. KARELIA'S PROVEN MINERAL RESOURCES: INDUSTRIAL MINERALS

¹*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *vv.shchiptsov@gmail.com*

²*Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

The application of the term “industrial minerals” to a certain group of minerals is explained. It is noted that some metallic minerals are used as industrial minerals without metallurgical processing. For decades, industrial minerals of Karelia have occupied an important place in theoretical research and practical use. The most promising types of industrial minerals of Karelia, which constitute the mineral and raw material resources of the republic, are highlighted. The article presents a general analysis of the state of knowledge on the region’s industrial minerals, including an assessment of reserves or resources. Strategically and economically important industrial minerals are identified based on multiple factors, primarily their location in the Arctic zone of the Republic of Karelia. Such industrial minerals include graphites and fluorites of the Ladoga region, high-purity quartz of the Arctic zone of the Republic of Karelia, including pegmatite dumps of the Plotina and Klimovsky sites, kyanites and fine-flaky muscovite of the Khizovaara structure, alkaline syenites of the Elet’ozersky intrusive complex, high-carbon shungite formations, Archean carbonate-talc strata of the Kamennoozersky structure, unconventional complex sources of feldspar (Rosa-Lampi, etc.). It is proposed to increase the role of government bodies in the development of ad hoc programs designed to upscale geological exploration, extraction and deep processing of industrial minerals by mining enterprises in the region. We also recommend involving the Institute of Geology of the Karelian Research Center RAS and the Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences of the Petrozavodsk State University in the systematic work to introduce innovative production technologies and advanced solutions in the management and administration in the mining industry.

Keywords: proven mineral resources; industrial minerals; deposits; occurrences; subsoil; Fennoscandian Shield; Precambrian; innovations

For citation: Shchiptsov V. V., Svetov S. A. Karelia’s proven mineral resources: industrial minerals. *Trudy Karel’skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 5–44. doi: 10.17076/geo2208

Funding. The studies were carried out within Research Plan under state assignment #216 funded by the Ministry of Science and Higher Education of Russia.

Введение

В бывшем СССР и современной России традиционно принято употреблять термин «неметаллические (нерудные) полезные ископаемые». Под этим определяют группу полезных ископаемых, весьма разнообразных по своей природе и свойствам, из которых не извлекают металл, а используют непосредственно в природном или переработанном виде.

В мире подобная группа полезных ископаемых трактуется как Industrial Minerals [Harben, Bates, 1990; Industrial..., 1994; Harben, 1995; Gautneb et al., 2013]. На наш взгляд, этот термин более емкий и понятный, к тому же признанный и широко употребляемый в англоязычной литературе. В этой статье предлагается использовать термин «промышленные минералы», который охватывает все минеральное сырье, извлекаемое из недр,

кроме энергетических видов сырья, металлов, воды и самоцветов [Precambrian..., 1993; Industrial..., 1999; Щипцов, 2019; Shchiptsov, Shekov, 2020; Щипцов и др., 2020в, 2023а]. Важное значение придается тому, что некоторые металлические полезные ископаемые не подвергаются металлургическому переработке и используются как промышленные минералы.

П. Харбен и Р. Бейтс [Harben, Bates, 1990] заявляют, что большая ответственность возлагается на поставщиков промышленных минералов в смысле соблюдения стандартов на готовую продукцию. Особенно это относится к стекольному производству, наполнителям и покрытиям в бумагоделательной промышленности и т. п. Процесс горной добычи, рудоподготовки и обогащения промышленных минералов все чаще связан с применением новых современных методов, в частности электро-

статической сепарации, оптической сортировки, использования различных химических процессов и т. п. Приоритет отдается развитию новых направлений применения минерального сырья, например, как наполнителей для производства резины, бумаги, красок и пластиков. На мировом рынке минерального сырья усиливается конкуренция. В связи с этим целый ряд промышленных минералов, используемых в прошлом и настоящем, могут за короткий срок стать неконкурентоспособными за счет появления конъюнктуры на новые виды промышленных минералов.

В мировой практике уделяется большое внимание промышленным минералам. Информация представлена во многих периодических изданиях – «Industrial Minerals», «Mineral Price Watch», «Asian ceramics», «North American Minerals News», «Industrial Minerals Prices & Data», «The Industrial Minerals Handy Book», «Industrial Minerals: Geology and World Deposits», «Industrial Minerals Directory (a World Guide to Producers and Processors)», «Industrial Minerals of the Far East», «Trading in Industrial Minerals», «Industrial Minerals Traders Directory», «World Minerals Statistics», «CIS Industrial Minerals», «Chinese Industrial Minerals», «Raw Materials for the Refractories Industry» и др.

Промышленные минералы Республики Карелия подразделены на две группы: первая группа представлена монокристаллами или агрегатами и вторая группа – промышленные горные породы, сложенные двумя или более минералами. Промышленные минералы Карелии могут использоваться в различных сферах производства [Precambrian..., 1993; Дейнес и др., 2020; Shchiptsov, Shekov, 2020; Щипцов и др., 2020в]. В основу положен критерий конечного применения минерального продукта с учетом имеющихся разработок Международной рабочей группы по промышленным минералам (IMWOG) [Virta et al., 1994].

На протяжении десятилетий промышленные минералы занимали ключевое место в исследованиях Института геологии. Профессор П. А. Борисов уделял этому направлению особое внимание. Диапазон исследований расширился под руководством Б. Я. Алексева, Л. Л. Гродницкого, Ю. К. Калинина, В. В. Ковалевского, А. С. Пекки, А. В. Рылеева, В. А. Шевкова, В. В. Щипцова. В разные годы в геологических и минералого-технологических исследованиях промышленных минералов принимала участие целая плеяда ученых института, среди которых помимо вышеупомянутых – А. В. Бархатов, Н. С. Бискэ, Т. П. Бубнова, О. В. Букчина, В. Я. Волочаев, Л. П. Галдобина,

А. В. Гаранжа, Л. С. Голованова, М. И. Голод, В. И. Горлов, А. С. Гришин, Л. А. Данилевская, Ю. Е. Дейнес, И. Н. Демидов, Е. Ф. Дюкжиев, А. С. Заверткин, А. З. Зайденберг, А. А. Иванов, В. П. Ильина, И. Н. Карелина, В. И. Кевлич, Е. Е. Климовская, В. А. Концин, А. И. Крохин, Т. К. Кулмала, О. Б. Лавров, Г. А. Лебедева, Ю. И. Лукин, З. Т. Митрофанова, А. Б. Наливкин, Е. В. Нефедов, А. Г. Никифоров, Г. П. Озерова, А. В. Первунина, А. К. Полин, В. Г. Пудовкин, Н. Н. Рожкова, А. Е. Ромашкин, А. М. Ручьев, Д. В. Рычанчик, Р. В. Садовничий, Г. П. Сафронова, Е. Н. Светова, С. А. Светов, Л. С. Сканницкая, В. А. Соколов, В. И. Соколов, В. К. Соловов, Г. П. Филинцев, М. М. Филиппов, П. В. Фролов, Р. А. Хазов и др.

Время не стоит на месте. Движение продолжается.

Алмазы

В 1992–1999 гг. по инициативе австралийской компании «Ashton Mining Limited» на территории восточной части Фенноскандинавского щита проведены специализированные шлиховые поиски минералов – индикаторов кимберлитов (рис. 1). В Онежской структуре было обнаружено Кимозерское проявление кимберлитов с алмазами (первые находки алмазоносных кимберлитов в Карелии). В эрозионном срезе выход кимберлитов имеет форму овала и достигает размеров по длинной оси 2 км и по короткой – 800 м [Ушков, 2001]. Минералами-индикаторами являются хромиты, присутствуют пироп, пикроильменит и хром-диопсид. Пока установлен низкий уровень содержания алмазов в кимозерских кимберлитах. Во многих зернах хромитов содержание MgO более 8 %, что указывает на глубинную природу и отвечает хромитам алмазоносных кимберлитов [Устинов и др., 2009]. Мантийный источник кимберлитов был сформирован на рубеже не позднее 2048 ± 48 млн лет, и его глубинная эволюция в течение 100–150 млн лет привела к становлению кимозерских кимберлитов переходного типа на рубеже 1814 ± 20 млн лет [Putintseva, Spiridonov, 2018].

Отмечено присутствие даек лампроитов и диатремовых трубок кимберлитов в Костомукшской структуре, представленных слюдяными кимберлитами-оранжеитами и сложенными ксенолитами в виде тонкозернистых брекчиевидных сростаний талька и серпентина [Костомукшский..., 2015], что связывается с благоприятными условиями для формирования мантийного материала в архейской коре.



Рис. 1. Потенциальные алмазоносные участки [Щипцов и др., 2020в]

Fig. 1. Potential diamond-bearing areas [Shchiptsov et al., 2020в]

Хромшпинелиды, по мнению В. Я. Горьковца, являются наиболее характерной группой аксессуарных минералов кимберлитов-оранжеитов. В лампроитах отмечены многочисленные включения сульфидов и арсенидов во флогопите основной массы породы и вторичных силикатах. Абсолютный возраст лампроитов (проявление Луупеансуо) рифейской системы – 230 млн лет [Костомукшский..., 2015].

Графит

Графит обладает формой чистого углерода, которая существует в простом составе и имеет слоистую структуру. Особенности строения кристаллической решетки графита преломляются в его физических свойствах. В практическом отношении важное место отводится чешуйчатому графиту.

В природе встречаются три природных морфотипа графита:

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

б) дисперсный некристаллический аморфный графит с содержанием С 70–85 %;

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

Размер графитовых чешуек, как правило, варьирует от 50 до 1600 мкм, при этом длина большинства из них составляет от 200 до 500 мкм, а соотношение между длинной и короткой осями большинства чешуек находится в диапазоне от 2 до 5. Чешуйчатый графит связан с метаморфическими породами условий высоких давлений, где органический углерод, отложенный в осадочных и осадочно-вулканогенных породах, преобразуется в графит под воздействием давления, обычно превышающего 5 кбар, и температуры около 650–700 °С [Щипцов и др., 2022]. Метаморфические реакции, в результате которых образуется графит, приводят к высокой электропроводности, поляризуемости и пониженной теплопроводности [Beysac, Rumble, 2014; Engvik et al., 2020].

Основные области использования графита в современных технологиях выделены в три группы [Щипцов, 2022]. В первую группу входит промышленный графит с размером частиц > 200 μm (фольга и экранирование (нуклеарный класс), высокотехнологичные компоненты батарей (СЕМ)). В общем объеме важных сырьевых материалов данная группа составляет 35 %. Вторая группа включает размеры < 200 μm (электроды (ЭАФ), тигли, части ракеты). Ее объем достигает 45 %. Третья группа с размером частиц < 150 μm объединяет выпуск батарей БАМ и ГЭМ, огнеупоров, пресс-форм, синтетических алмазов, порошкообразных металлов, дымомаскирующих средств (технология ослабления ЭМ), смазочных материалов и составляет 20 %.

Существуют высокие требования к чистоте и кристаллической структуре графита.

Все известные методы очистки графита можно разделить на три типа: химико-термическое, термическое и газотермическое рафинирование.

В настоящее время позицию крупнейшего производителя природного графита в мире занимает Китай. С 2011 г. Европейский Союз включил природный графит в список критически важных сырьевых материалов [European..., 2017].

Обширной частью Фенноскандинавского щита является Свекофеннская область, характеризующаяся метаморфическими породами от амфиболитовой до гранулитовой фаций метаморфизма. Поскольку высокое качество графита связывается с высоким уровнем метаморфизма супракрустальных пород Свекофеннского домена, то на этом основании прогнозируются перспективные объекты для разработки месторождений высококачественного чешуйчатого графита. Месторождения графита в Фенноскандии изучены достаточно полно [Gautneb, Tveten, 2000; Palosaari et al., 2016; Rønning et al., 2018 и др.]. В 2016 году несколько проектов по разведке графита были активными и актуальными в Норвегии, Швеции и Финляндии [Gautneb, Wanvik, 2016]. На данный момент действующим графитовым рудником в Фенноскандии является Skaland Graphite AS в Норвегии. Возобновляется добыча на графитовом руднике Woxna в Швеции, которая была приостановлена в 2015 году [Leading..., 2018]. Динамика спроса начинается от нулевого показателя в 2015 году и будет резко увеличиваться, по прогнозу спроса на шаровидный графит (SPC) и природные аноды (т) на период 2015–2040 гг. По данным компании Benchmark Mineral Intelligence, к 2040 году востребованность чешуйчатого графита достигнет уровня 4 000 000 тонн.

Что касается Республики Карелия, то еще в 1787 г. Самуил Алопеус на берегах Ладожского озера встретил обломки графита, карандашного минерала. Для истории горного промысла интерес представляет проявление графита Кимамяки, расположенное в 13 км от г. Сортавала. В XIX веке в Кимамяки добывали до 20–30 тонн в год графитосодержащих сланцев (всего добыто 450 тонн). Графитовые каменоломни были также сосредоточены в окрестностях г. Сортавала и Питкяранта. В 1830-х началась добыча графитосодержащих сланцев на о. Пусунсаари. Она велась в небольших масштабах попутно с разработкой месторождений других видов сырья. Наиболее крупным предприятием была шахта Шварц-1, где в 1890–1892 и 1914 гг. помимо железной и медной руды добыто 120 т графита [Дорога..., 2014].

Графитовые проявления обнаружены в двух структурных зонах – Ладожской подвижной зоне и Северо-Карельской структуре (рис. 2). Отмечены различные типы графита – криптокристаллический, плотнокристаллический, мелкочешуйчатый и крупночешуйчатый. Последний тип представляет наибольшую коммерческую ценность благодаря хорошим параметрам флотационного и химического обогащения графитовых руд [Precambrian..., 1993].

В Ладожской подвижной зоне открыто более 30 проявлений указанных типов графита. По обогатимости выделяются две категории графитовых руд: 1 – легкообогатимые руды явнокристаллического и крупно-среднечешуйчатого графита; 2 – труднообогатимые руды скрытокристаллического (аморфного) графита.

Крупные проявления скрытокристаллического (аморфного) графита выявлены на участках Романовская аномалия, Полвилампи, Майсульское и других в углеродистых сланцах людиковия, связанных с породами соанлахтинской свиты Свекофеннской складчатой области. Все эти проявления отнесены к стратоформной шунгит-графитосодержащей формации в углеродистых сланцах [Минерально-сырьевая..., 2006].

В Западном Приладожье открыты графитовые руды метаморфогенного типа, в частности Ихальское рудное графитовое поле. Подобный тип месторождения графита имеет основное значение в мировом балансе графитового сырья. Ихальское рудное поле включает в себя собственно Ихальское месторождение (Ихала III) и большой ряд перспективных проявлений легкообогатимых руд с чешуйчатым графитом – Ихальское I, Ихальское II, Ихальское IV, Ихальское V, Ихальское VI, Ихальское VII, Терварвинское, Ликолампинское и Кайвомякское, которые слагают стратиформную гнейсовую графитовую формацию [Ладожская..., 2020].

АО «Центральное ПГО» завершило в 2022 году работы по объекту «Поиск и оценка графитов на участке недр Ихала VI» в 5 км к северо-западу от месторождения Ихала IV. Здесь выявлены вулканогенно-осадочные породы, метаморфизованные в условиях гранулитовой фации регионального метаморфизма с графитовой минерализацией, относимые к ихальской и куркиекской толщам палеопротерозойского метаморфогенного комплекса. Технологические испытания руд Ихала VI показали, что они имеют высокие показатели обогащения с получением кондиционных графитовых концентратов, пригодных для производства графитокерамических изделий, первичных химических источников электрического тока и в литейном производстве.

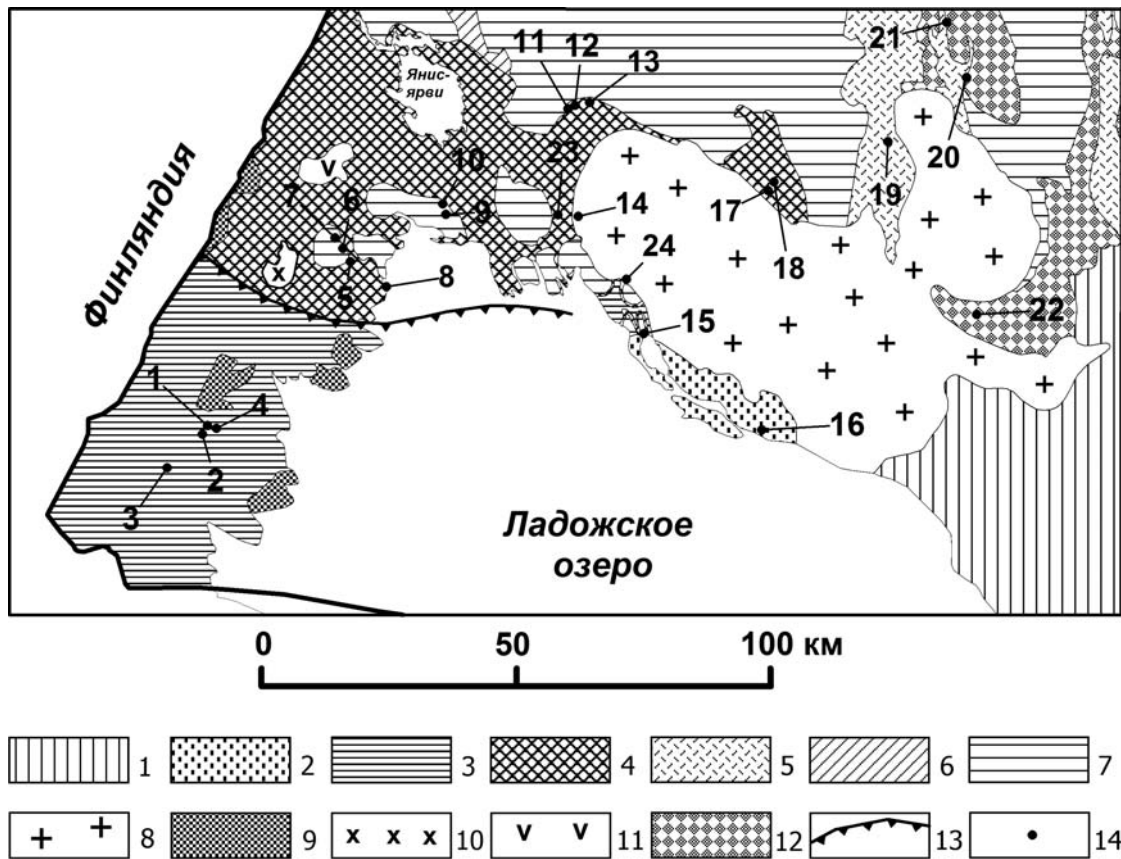


Рис. 2. Схема размещения основных месторождений и крупных проявлений графита Свеккофеннской минерагенической провинции (Приладожье). Сост. В. В. Щипцов на адаптированной геологической основе с использованием материалов Geological Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2 000 000. GSF, GSN, GSS и ГУП «Минерал»:

1 – объединенный венд и палеозой; 2 – рифей (приозерская и салминская свиты); 3 – калевий (ладожская серия) и вепсий; 4 – ятулий-людиковый нерасчлененные (соанлахтинская и питкяррантская) свиты сортавальской серии; 5 – зеленокаменные пояса; 6 – нерасчлененный архей; 7 – архейский комплекс ТТГ; 8 – анортозит-рапакивигранитный комплекс (1,547–1,530 млрд лет); 9 – посторогенные калиевые ультрамафиты до субщелочных габброидов, кварцевых монзонитов, гранодиоритов, лейкосиенитов (1,8 млрд лет); 10 – граниты, гранодиориты, кварцевые монзонидориты и др. (1,86–1,84 млрд лет); 11 – перидотиты, пироксениты, габбро (1,97 млрд лет); 12 – архейские граниты (2,7–2,65 млрд лет); 13 – надвиг, отделяющий породы гранулитогнейсовой области от более низкотемпературных пород (Мейерский надвиг); 14 – месторождения и проявления графитовых руд (1 – Ихала III, 2 – Ликолампинское, 3 – Кайвомьякское, 4 – Ихальское (I, II, IV–VII), 5 – Южно-Туоксиярвинское, 6 – Туоксиярвинское, 7 – Северо-Туоксиярвинское, 8 – Красный Победитель, 9 – Кукколампинское, 10 – Теньярвинское, 11 – Романовская аномалия, 12 – Полвилампи, 13 – Майсульское, 14 – Руоярви-1, 15 – Иру-вуори, 16 – Салминское, 17 – Калаярвинское, 18 – Вези-Суон-сельга, 19 – Суваоя, 20 – Гижозерское, 21 – Нинисельга, 22 – Паннисельга, 23 – Кительское, 24 – Хопунваара)

Fig. 2. The layout of the main deposits and large manifestations of graphite in the Svecofennian mineragenic province (Priladozhye). Compiled by V. V. Shchiptsov on an adapted geological basis using materials from the Geological Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2.000.000. GSF, GSN, GSS and GUP Mineral:

1 – combined Vendian and Paleozoic; 2 – Riphean (Priozerskaya and Salminskaya suites); 3 – Kalevian (Ladoga series) and Vepsian; 4 – undifferentiated Jatulian-Ludicovian (Soanlakhtinskaya and Pitkyaranta suites of the Sortavala series); 5 – greenstone belts; 6 – undifferentiated Archean; 7 – Archean complex of the TTG; 8 – anorthosit-rapakivi granite complex (1.547–1.530 Ga); 9 – postorogenic potassium ultramafic rocks to subalkaline gabbroids, quartz monzonites, granodiorites, leucosyenites (1.8 Ga); 10 – granites, granodiorites, quartz monzoniorites, etc. (1.86–1.84 Ga); 11 – peridotites, pyroxenites, gabbro (1.97 Ga); 12 – Archean granites (2.7–2.65 Ga); 13 – thrust separating the rocks of the granulite-gneiss region from lower-temperature rocks (Meyer Thrust); 14 – deposits and manifestations of graphite ores (1 – Ikhala III, 2 – Likolampinskoye, 3 – Kaivomyakskoye, 4 – Ihalskoye (I, II, IV–VII), 5 – Yuzhno-Tuoksjarvi, 6 – Tuoksjarvi, 7 – Severo-Tuoksjarvi, 8 – Krasny Pobeditel, 9 – Kukkolampinskoye, 10 – Tenjarvi, 11 – Romanovskaya Anomaly, 12 – Polvilampi, 13 – Maisulskoye, 14 – Ruojarvi-1, 15 – Iru-vuori, 16 – Salminskoye, 17 – Kalajarvi, 18 – Vezi-Suon-selga, 19 – Suvaoya, 20 – Gizhozerskoye, 21 – Niniselga, 22 – Panniselga, 23 – Kittelskoye, 24 – Khopunvaara)

На участке недр Ихала VII также проведены поисково-оценочные работы АО «Центральное ПГО» с итоговыми положительными результатами.

Незавершенными остались работы, которые проводились ООО «Графит-Пром» на участке Ихала IV.

В 2024 году завершены поисковые работы на графит на Кирьеволахтинской площади, которые проводились АО «Центральное ПГО». Перспективы на графит оцениваются минимальными ресурсами.

Ихальское месторождение графитовых руд (Ихала III)

Месторождение Ихала III открыто в 1971 г. геологами Карельской комплексной геологоразведочной экспедиции [Минерально-сырьевая..., 2006]. На данной площади этой экспедицией проводились поисковые и поисково-оценочные работы на графит в периоды 1983–1986 гг. (Т. П. Мочаловой и др.) и 1989–1993 гг. (К. И. Степановым и др.).

Месторождение приурочено к образованиям углеродистой сланцево-карбонат-толеитобазальтовой геологической формации раннего людиковия питкьярантской свиты сортавальской серии (рис. 3).

Основная рудная залежь Ихальского месторождения представляет собой крутопадающее и относительно выдержанное по простиранию пластообразное тело, в котором сформированы промышленные графитовые руды. Графитосодержащие биотитовые сланцы и мигматиты по ним вытянуты в субмеридиональном направлении и выклиниваются на севере и юге. Длина залежи по простиранию составляет 1700 м, мощность достигает 450 м, общая площадь 8,2 км². По падению залежь прослежена до глубины около 100 м и не имеет признаков разубоживания. Основным природным типом графитовых руд Ихальского месторождения являются мелко-, среднезернистые биотитовые гнейсы с содержанием чешуйчатого графита от 2,8 до 9,2 % и более. Размеры чешуек колеблются в пределах от 0,01 до 3–4 мм. В отдельных случаях наблюдаются концентрации графита в виде гнезд или тонких прожилков. Графитоносные мигматиты широко распространены в Ихальской структурно-фациальной подзоне, но графита в них, как правило, малое содержание. Мигматиты с содержанием графита до 6 % слагают небольшие участки среди графитосодержащих пород. Минеральные разновидности графитоносных метаморфитов обычно образуют полосы и линзы среди графитосодержащих биотитовых гнейсов.

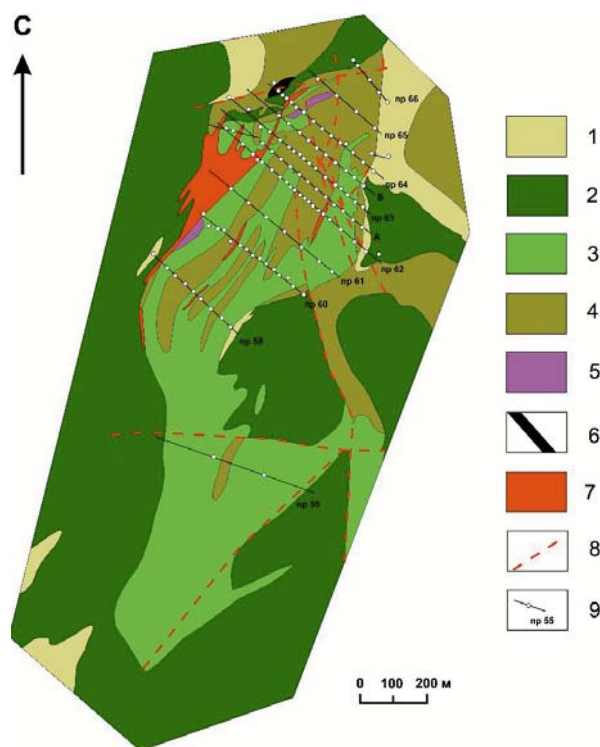


Рис. 3. Схематическая геологическая карта Ихальского месторождения графитов (участок III). Сост. В. В. Щипцов [Ладожская..., 2020] с использованием материалов К. И. Степанова, Карельская геологическая экспедиция, 1995:

1 – гранат-биотитовые сланцы, биотитовые и пироксеновые гнейсы и мигматиты; 2 – амфиболиты; 3 – силифицированные графитоносные сланцы; 4 – графитоносные биотитовые сланцы; 5 – амфиболовые и амфибол-пироксеновые сланцы; 6 – графитовые тела с содержанием углерода более 7 %; 7 – микроклиновые и плагио-микроклиновые граниты; 8 – предполагаемые тектонические нарушения; 9 – скважины и линии профилей

Fig. 3. Schematic geological map of the Ikhala graphite deposit (section III). Compiled by V. V. Shchiptsov [Sharov, 2020] using the materials of K. I. Stepanov, Karelian Geological Expedition, 1995:

1 – garnet-biotite schists, biotite and pyroxene gneisses and migmatites; 2 – amphibolites; 3 – silicified graphite-bearing schists; 4 – graphite-bearing biotite schists; 5 – amphibole and amphibole-pyroxene schists; 6 – graphitic bodies with carbon content over 7 %; 7 – microcline and plagioclase-microcline granites; 8 – supposed tectonic disturbances; 9 – wells and profile lines

Отмечается гранитизация пород, особенно интенсивно проявленная в низах питкьярантской свиты. Технические параметры – влажность 0,35 % и зольность 94 %.

Чешуйчатый графит связан в основном с метаморфическими породами условий высокого давления, где органический углерод, отложенный в осадочных и осадочно-вулканогенных породах, преобразуется в графит под воздействием давления, обычно превышающего 5 кбар, и температуры около 650–700 °С.

В табл. 1 отражена последовательность рудообразующих процессов в пределах Ихальского рудного поля.

Морфоструктурные особенности сростаний графита с другими минералами в разных типах пород и вторично измененных зонах описаны и изучены с использованием поляризационного и электронного сканирующего микроскопов.

Мелко-среднезернистые биотит-полевошпатовые гнейсы являются основным типом пород, в которых на месторождении вмещаются графитовые руды. В составе пород отмечается полевой шпат (плагиоклаз, микроклин) – 25–40 %, кварц – 20–35 %, биотит – 15–32 %, сульфиды – 7–21 %, графит – 3–5 %. Графит содержится в кварц-плагиоклазовом матриксе

в виде разноориентированных чешуй или образует сростания с биотитом. Содержание графита в неосоме связано с химической специализацией процесса. В плагиоклаз-кварцевых лейкосоме содержание графита может достигать 15 %.

Скарноиды относятся к группе биотит-полевошпат-пироксеновых околоскарновых метасоматитов, сформированных в условиях контактового метасоматоза биотит-полевошпатовых гнейсов и гранитных интрузий. Минеральный состав и наличие полностью сохранных участков реликтовых пород позволяет отнести их к околоскарновым породам. Минеральный состав скарноидов включает плагиоклаз, калиевый полевой шпат, биотит, кварц и графит.

Таблица 1. Последовательность геодинамических графитформирующих процессов в пределах Ихальского рудного поля

Table 1. Sequence of geodynamic graphite-forming processes within the Ihalsky ore field

Время геологического процесса Time of geological process	Описание процесса Description of the process	Графитовая и иная рудная кристаллизация Graphite and other ore crystallization
2100–1920 млн лет [Куликов и др., 2017] 2100–1920 million years [Kulikov et al., 2017]	Формирование первично осадочных и осадочно-вулканогенных пород Formation of primary sedimentary and sedimentary-volcanic rocks	
1880–1870 млн лет [Балтыбаев, Левченков, 2005] 1880–1870 million years [Baltybaev, Levchenkov, 2005]	Региональный метаморфизм Свекофеннского этапа Regional metamorphism of the Svecofennian stage Ультраметаморфизм и мигматизация плагиоклазового или микроклинового состава Ultrametamorphism and migmatization of plagioclase or microcline composition Интрузивный магматизм с сопутствующим контактовым метаморфизмом и скарнированием Intrusive magmatism with associated contact metamorphism and skarnization Регрессивный этап метаморфизма с хлоритизацией и щелочным метасоматозом Regressive stage of metamorphism with chloritization and alkaline metasomatism	Формирование графитовых руд Formation of graphite ores Формирование лейкосом плагиоклаз-кварцевого и микроклин-кварцевого состава. В обрамлении жильных мигматитов (меланосомы) формируются зоны с повышенным содержанием графита Formation of leucosomes of plagioclase-quartz and microcline-quartz composition. Zones with elevated graphite content are formed within the selvage of vein migmatites (melanosomes) Перекристаллизация графита в узких каймах, в калиевых породах растворение графита вплоть до полного исчезновения Recrystallization of graphite in narrow rims, in potassium rocks dissolution of graphite up to complete disappearance Формирование хлорит-графитовых сростаний, кальцитовых прожилков с графитовым окаймлением Formation of chlorite-graphite intergrowths, calcite veinlets with graphite edging
Фанерозой Phanerozoic	Гипергенез Hypergenesis	Серицитизация, альбитизация, хлоритизация, приводящие к уменьшению крепости пород и их однородности Sericitization, albitization, chloritization, leading to a decrease in the strength of rocks and their homogeneity

Графит (1–5 %) содержится в виде окаймления жильных и метасоматических зон. Сланцеватость породы обусловлена ориентированным положением пластинок биотита и графита по одному направлению. Вторичные изменения связаны с серицитизацией и мусковитизацией по микроклину (интенсивная) и интенсивной хлоритизацией по биотиту и межзерновым каймам (часть парагенетических сростков биотита замещена на полнокристаллические хлориты полностью). Метасоматические изменения приводят к формированию моноклинного пироксена и титанита. Содержание титанита высокое (до 18 %), что соответствует содержанию порообразующего минерала.

Формирование хлоритизированных гнейсов связано с низкотемпературными процессами регрессивной стадии регионального метаморфизма. Часто наблюдается формирование хлорит-графитовых сростаний, в которых графит приобретает нехарактерные струйные и извилистые формы и тонкие пакетные сростания с различными минералами, что затрудняет их разделение.

Тесные структурные сростания со сложными извилистыми границами графитовых чешуек с сульфидами, хлоритом, биотитом являются фактором, осложняющим обогащение графитовой руды. Помимо этого, электронномикроскопическое изучение образцов показало присутствие в графите микроминеральных включений, вплоть до микронных размеров, пирита, пирротина, плагиоклаза, кварца, хлорита, что также может повлиять на качество графитового концентрата (по ГОСТ 17022-81).

В целом метаморфические преобразования на Ихальской площади охарактеризованы многими исследователями. Региональный метаморфизм пород отвечает условиям высокотемпературной амфиболитовой фации силлиманит-альмандин-калиево-полевошпатовой субфации, местами гранулитовой фации, что впервые было отмечено Ю. И. Нагайцевым [1974].

В серии работ сотрудников ИГГД РАН [Великославинский, 1972; Шульдинер и др., 1997; Балтыбаев, 2002] детально охарактеризованы метаморфические комплексы Южного домена данной территории, где преобладают первичные метапелиты и в которую вписывается Ихальское рудное поле. Гиперстенная зона пиковой стадии метаморфизма соответствует условиям T 800–900 °C и P 5–6 кбар, что определяет параметры гранулитовой фации. Время гранулитовой стадии метаморфизма глиноземистых гнейсов установлено как $1880,1 \pm 7,7$ млн лет по Pb-Pb-возрасту силлиманита [Балтыбаев, Левченков, 2005].

В дальнейшем условия метаморфизма смещаются в область амфиболитовой фации, что привело к новообразованным минеральным парагенезисам, флюидным включениям в поздних жильных телах, определяемых диапазоном их формирования – от 600–660 до 450–500 °C при давлении примерно 4 кбар, в наиболее поздних жилах – около 3–3,5 кбар, отмеченных в серии работ [Балтыбаев и др., 2000; Глебовицкий и др., 2001; Балтыбаев и др., 2009 и др.].

Руды оценены на обогатимость в границах Ихала III на стадии поисково-оценочных работ. Испытания выполнялись в «Уралмеханобр», ВНИИнеруд и ИГ КарНЦ РАН [Бискэ, 1987; Скамницкая, Бискэ, 2019]. При химическом дообогащении неизмененных биотитовых гнейсов месторождения Ихала III содержание углерода в графитовом концентрате достигает 99,9 % [Скамницкая, Бискэ, 2019].

Запасы определены в трех блоках в количестве 81,4 млн т руды до глубины 120 м при среднем содержании углерода 3,01 % (борт 2 %). Прогнозные ресурсы категории P_1 оценены в 124 млн тонн до глубины 170 м при среднем содержании углерода 3,07 % [Журавлев и др., 2003].

Промышленные запасы руды месторождения Ихала III обеспечат производство графитового концентрата в объеме 20 000 тонн на срок свыше 30 лет.

Шунгитовые породы – комплексное полезное ископаемое

Онежская палеопротерозойская структура Фенноскандинавского щита выделяется тем, что на площади около 9000 км² сформированы крупные залежи шунгитовых пород. Уникальность шунгитовых пород Карелии заключается в высоком содержании в них углеродистого вещества, накопление которого происходило в осадочных, осадочно-вулканогенных и вулканогенных образованиях верхней подсвиты заонежской свиты людиковийского надгоризонта палеопротерозоя в возрастном диапазоне 2,1–1,92 млрд лет. Мощность верхней подсвиты составляет около 850 м без учета распространенных здесь силлов габбродолеритов. Породы, включающие метаморфизованное шунгитовое вещество, отличаются по составу минеральных компонентов, содержанию, строению, свойствам и другим признакам. Природные типы шунгитовых пород характеризуются несколькими текстурно-структурными разновидностями, неоднородностью фазового состава углерода и геохимическими особенностями.

Все это надо отнести к факторам, негативно влияющим на промышленное использование высокоуглеродистых шунгитовых пород. Широкая изменчивость их химического состава, структурных параметров углерода и главных минералов фиксируется даже в пределах одного месторождения [Kovalevsky, Shchiptsov, 2019].

В верхней подсвите заонежской свиты в пределах северной части Онежской структуры выделено 9 горизонтов шунгитовых пород с высоким содержанием $C_{орг} > 20\%$, которые слагают Зажогинское рудное поле с десятками месторождений и проявлений высокоуглеродистых шунгитовых пород, в т. ч. два крупных разрабатываемых месторождения Максово и Зажогино (рис. 4 и 5) [Бискэ и др., 2006].

Шунгиты пригодны для использования в различных направлениях промышленного производства. Промышленные запасы высокоуглеродистых шунгитовых пород обнаружены в мире только в Заонежье на территории Карелии.

Карельские шунгитовые породы могут занять определенную нишу на российском и мировом рынках. Учитывая географию, необходимо планировать развитие горного бизнеса на основе многоцелевого использования шунгитовых пород в интересах подъема социально-экономической ситуации Заонежья, что должно быть положено в основу стержневой политики

экономического подъема и возрождения традиционных обычаев и культуры района. Именно такая взаимосвязь приводит к возможному интегрированному формированию минерального фонда развития Заонежья и созданию образцового центра горной промышленности.

Шунгитовые породы Карелии имеют более чем трехвековую историю исследований. В давние времена порода именовалась как аспидный камень. Так, например, еще Петр I приказывал каждому российскому солдату носить в своих походных ранцах кусочек «аспидного камня», который бы позволял бороться с дизентерией. Найденные местными крестьянами в середине девятнадцатого века черные камни около села Шуньга были приняты за каменный уголь – «олонецкий антрацит». Началась дискуссия о природе странного «антрацита», который не горел в топках. А. А. Иностранцев назвал эту породу шунгитом [Иностранцев, 1879]. Таким образом в той или иной мере разрешился вопрос природы «олонецкого антрацита».

Позже П. А. Борисов определяет, что шунгитовые породы относятся к ценным полезным ископаемым [Борисов, 1956]. Следует напомнить, что П. А. Борисов предложил первую классификацию, в которой шунгитовые породы разделяются на пять разновидностей по содержанию углерода как основной определяющей компоненты: шунгит I (более 98 % углерода),

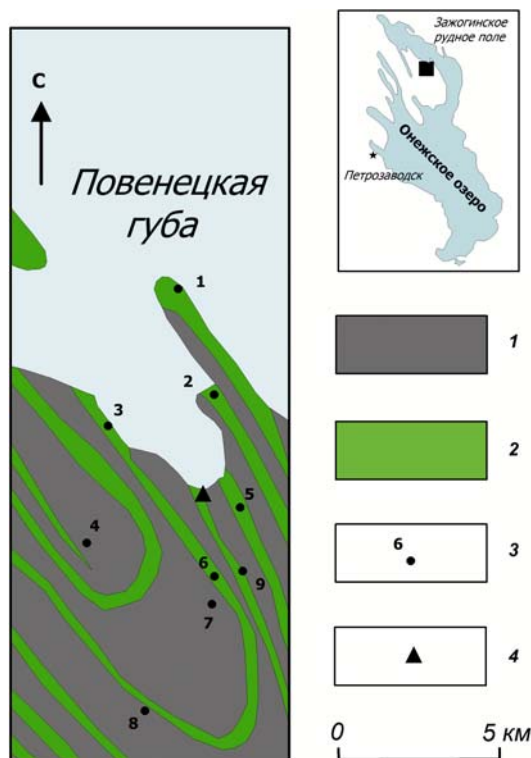


Рис. 4. Геологическая схема размещения основных залежей шунгитовых пород Зажогинского рудного поля в прибрежной зоне акватории Онежского озера [Kovalevsky et al., 2016]:

1 – заонежская свита людиковийского надгоризонта; 2 – палеопротерозойские интрузии и эффузивные породы заонежского интрузивного комплекса; 3 – основные шунгитовые залежи Зажогинского рудного поля (1 – Карнаволоок; 2 – Красная Горка; 3 – Подсосонье; 4 – Мироновская; 5 – Часовенская; 6 – Максово; 7 – Зажогино; 8 – Лебещина; 9 – Калейская); 4 – поселок Толвуя

Fig. 4. Geological scheme of the main deposits of the Zazhogino ore field in the coastal zone of Lake Onega [Kovalevsky et al., 2016]:

1 – Zaonezhskaya formation of the Ludicovian suprahorizon; 2 – Paleoproterozoic intrusions and effusive rocks of the Zaonezhskaya intrusive complex; 3 – major shungite deposits of the Zazhoginsky ore field (1 – Karnavolok; 2 – Krasnaya Gorka; 3 – Podsosonye; 4 – Mironovskaya; 5 – Chasovenskaya; 6 – Maksovo; 7 – Zazhogino; 8 – Lebeschchina; 9 – Kaleyskaya); 4 – Tolvua settlement

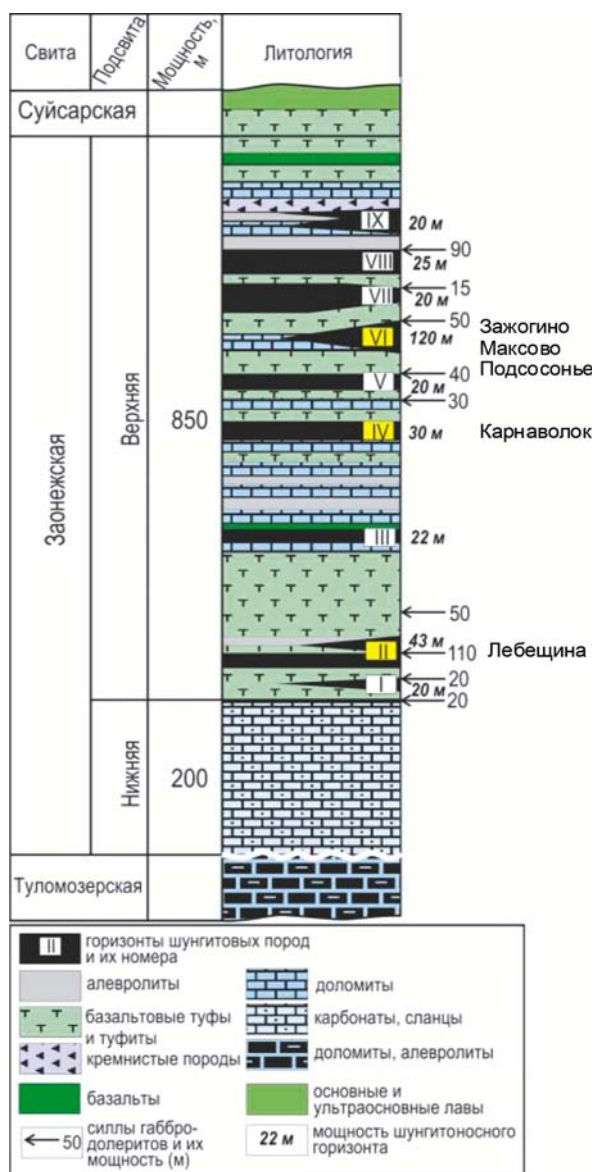


Рис. 5. Стратиграфическая колонка заонежской свиты людиковийского надгоризонта, положение шунгитоносных горизонтов и соответствующие им месторождения шунгитовых пород [Бискэ и др., 2006]

Fig. 5. Stratigraphic column of the Zaonezhskaya Formation of the Ludicovian suprahorizon, the position of shungite-bearing horizons and their corresponding shungite rock deposits [Biske et al., 2006]

шунгит II (35–75 %), шунгит III (20–35 %), шунгит IV (10–20 %) и шунгит V (менее 10 %). Уже в то время говорится о комплексном использовании шунгитовых пород и рассматриваются восемь направлений их практического применения (агрономические руды, для получения искусственного графита, строительный и облицовочный материал, для технологического топлива в металлургической промышленности,

пылевидное топливо, природный пробирный камень и абразивное сырье, природные краски) [Минерально-сырьевая..., 2006].

Интерес к шунгитовым породам возобновился в 1962 г. По предложению П. А. Борисова и К. О. Кратца было поручено проводить исследования в лаборатории технологии силикатов, позже переименованной в лабораторию шунгитов [Калинин, Ковалевский, 2011]. Впоследствии именно с Ю. К. Калининым (с 1964 по 1990 г. он был руководителем лаборатории шунгитов в ИГ КарНЦ РАН) связан вклад в научное изучение и производственное использование шунгитовых пород [Шунгиты..., 1975 и др.]. Нельзя не отметить постановление Совмина СССР от 04.01.1972 г., в котором указывалось на необходимость комплексного исследования углеродсодержащих нерудных полезных ископаемых Карелии.

На рис. 4 изображено расположение на современном поверхностном срезе крупных шунгитовых залежей Загогинского рудного поля [Kovalevsky et al., 2016].

Шунгитовое вещество определяется как уникальный природный углерод, некристаллический, неграфитируемый, фуллереноподобный, т. е. особая природная аллотропная модификация углерода – шунгит [Шунгиты..., 1984; Калинин, Ковалевский, 2011]. Уникальность шунгитового вещества проявляется на различных структурно-вещественных уровнях: надмолекулярном, молекулярном, электронном энергетическом, структурно-физическом и геолого-генетическом (парагенетическом).

Шунгитовые породы содержат шунгитовое вещество и широкий спектр микро- и наноминералов. Помимо шунгитового вещества к главным породообразующим минералам относятся кварц, слюда, альбит, пирит. Отмечается большое содержание второстепенных и акцессорных минералов, определенный спектр слоистых и кластерных примесей.

На протяжении десятилетий существенное внимание уделялось перспективам практического использования шунгитовых пород и решению экологических проблем. Результаты исследований представлены в многочисленных публикациях по данной тематике, которые обобщены в работах многих исследователей различных поколений [Борисов, 1956; Шунгиты..., 1975, 1984; Галдобина и др., 1986; Buseck et al., 1997; Филиппов, 2002; Melezhih et al., 2004; Шалимов и др., 2004; Бискэ и др., 2006; Калинин и др., 2008; Калинин, Ковалевский, 2011, 2013; Kovalevski, Shchiptsov, 2019; Кулешевич и др., 2019; Дейнес и др., 2020, 2021] и других работах.

Революционным шагом стало осмысленное понимание, что около 2,45 млрд лет назад свободный кислород начал накапливаться в атмосфере после завершения окисления в целом. Этот процесс в научной литературе назван Великим кислородным событием [Hazen, 2013; Lyons et al., 2014; Eguchi et al., 2019 и др.]. Важным в этом процессе стало то обстоятельство, что был зафиксирован резкий рост в карбонатных породах содержания изотопа ^{13}C в палеопротерозое. Данное явление зафиксировано под названием «событие Ломагунди» [Hodgskiss et al., 2023]. Событие Ломагунди-Ятулий объясняет фактор локализации шунгитовых пород. Оно стало самым продолжительным экскурсом изотопов углерода в истории Земли с возрастом примерно 2220–2060 млн лет.

Промышленные свойства шунгитовых пород контролируются метаморфизмом и наложенными процессами щелочного метасоматоза (в значительной степени K-Na). Проявленные метаморфические процессы протекали в условиях мусковит-хлорит-биотитовой субфации зеленосланцевого метаморфизма при температуре 325–450 °С и давлении 2–5 кбар [Bushmin, Glebovitsky, 2016]. Щелочно-железномagneзиальный метасоматизм способствовал образованию брекчированных текстур, биотитизации, хлоритизации, развитию альбит-карбонатных с апатитом и карбонат-кварцевых с сульфидами прожилков. В зонах изменения, например, отмечается повышение содержания Na, K, P, Ti, Mg, Fe и других рудогенных компонентов. Время формирования метасоматитов на месторождении Максово установлено с применением Re-Os-метода по сульфидам – 1558 ± 61 млн лет [Кулешевич и др., 2019].

Традиционно в литературе промышленные шунгитовые тела определяются как залежи. Вообще, залежью называется естественное локальное скопление нефти в одном или нескольких гидродинамически связанных пластах. В данном отношении можно рассматривать залежь как месторождение (Загогинская залежь – месторождение Загогино, Максовская залежь – месторождение Максово и др.) Эти залежи расположены на одной локальной площади, определяемой как Загогинское рудное поле, при этом на abiогенный углерод шунгитовых пород Онежской структуры указывали Л. П. Галдобина, Ю. К. Калинин, С. В. Купряков [Галдобина и др., 1986] и другие. J. Eguchi с коллегами [2019] и J. Craig с коллегами [2013] убедительно доказали, что abiогенный углерод не связан с биосферой.

При метаморфизме доля углерода увеличивается и падает доля водорода. Тектоника плит оказала влияние на перестройку гео-

химического цикла углерода, отражением которой явилось событие Ломагунди-Ятулий.

В настоящее время на практике установлена эффективность применения высокоуглеродистых шунгитовых пород во многих направлениях [Калинин и др., 2008; Калинин, Ковалевский, 2011, 2013; Kovalevski et al., 2016, 2020; Пономарев, 2019; Kovalevski, Shchiptsov, 2019; Дейнес и др., 2021 и др.].

Необычность шунгитовых пород состоит в структуре и свойствах шунгитового углерода и его взаимоотношениях с силикатными компонентами, проявлении активности в окислительно-восстановительных реакциях, что позволяет отнести данные образования к важнейшему минеральному потенциалу региона.

Эксплуатируемые месторождения Загогинского рудного поля

Загогинское месторождение шунгитовых пород (Загогинская залежь) (рис. 6) расположено на юго-востоке Карелии, в 4,5 км к юго-востоку от поселка Толвуя. Приурочено к VI горизонту шунгитовых пород. Шунгитовые породы охватывают кольцом куполовидную структуру, сложенную окремненными туфами и метасоматитами. Первые работы по добыче природного ресурса были проведены в 1990-х годах.

Максовское месторождение шунгитовых пород (Максовская залежь) располагается в 3 км на юго-восток от поселка Толвуя. Входит в состав VI горизонта шунгитовых пород. Подстилается карбонизированными туфами мощностью до 30 м, в северной части – карбонатно-биотитовыми метасоматитами и туфами. Перекрывается залежь некондиционными низкоуглеродистыми шунгитами, туфами, метадиабазами. Максимальная мощность вскрышных пород 100 м. Основные параметры двух разрабатываемых залежей приводятся в табл. 2.

Текстуры шунгитовых пород Загогино и Максово брекчиевая и массивная. На периферии встречаются слоистые шунгитовые породы. Интенсивность брекчирования возрастает к кровле.

Минералы шунгитовых пород – кварц (25–65 %), шунгитовое вещество (21–45 %), второстепенные – серицит, хлорит, пирит, карбонаты. Средняя плотность шунгитовых пород обратно пропорциональна содержанию свободного углерода и колеблется в пределах 2,21–2,57 г/см³, водопоглощение – от 0,1 до 3,6 %, пористость – от 0,9 до 10,8 %. Предел прочности брекчированных и массивных шунгитовых пород при одноосном сжатии в водопоглощенном состоянии колеблется от 58 до 257 МПа, слоистых шунгитовых пород – от 67 до 100 МПа.



Рис. 6. Зажогинский карьер
Fig. 6. Zazhogino Quarry

Таблица 2. Сравнительная характеристика параметров основных месторождений Зажогинского рудного поля
Table 2. Comparative description of the parameters of major deposits in the Zazhogino ore field

Морфология рудного тела Ore body shape	Размер / Size		Максимальная мощность, м Maximum thickness, m	Среднее содержание углерода, % Average free carbon content, %
	длина, м length, m	ширина, м width, m		
Максовская залежь / Maksovo deposit				
Листовидно-конусовидная Sheet-like-cone shaped	700	500	120	40
Зажогинская залежь / Zazhogino deposit				
Листовидно-конусовидная Sheet-like-cone shaped	400	300	60	27

Минерально-сырьевая база Тикшеозерско-Еletzозерского и Хизоваарского рудных районов (Лоухский район)

В понятие минерально-сырьевой базы включаются геологические территории, на которых выявлены дефицитные рудные комплексы с определенными промышленными запасами и ресурсами минерального сырья, отвечающие стандартам качества и включающие благоприятную транспортную и социальную

инфраструктуру. Особенности минерагении палеопротерозойских магматических щелочных пород Фенноскандинавского щита заключаются в том, что промышленные минералы – апатит, кальцит, нефелин, ильменит, титаномагнетит, оливин – определяют минерально-сырьевую базу. К такой минерально-сырьевой базе относятся и два рудных района – это Тикшеозерско-Еletzозерский и Хизоваарский опорные пункты (кластеры) [Щипцов, 2024].

Тикшеозерско-Елетьозерский кластер минерального сырья

Данные о минеральном потенциале Тикшеозерско-Елетьозерского ультраосновного щелочно-карбонатитового интрузивного комплекса, расположенного в Северной Карелии, получены в результате многолетних целевых геолого-петрологических, минералого-геохимических, геохронологических и минерагенических исследований среднепалеопротерозойского магматизма с многоступенчатой историей геологического изучения двух докембрийских массивов Фенноскандинавского щита [Богачев и др., 1975; Ключин, Сафронова, 1984; Сафронова, 1990 и др.]. Новые результаты получены путем датирования вышеуказанных комплексов по U-Pb-методу – метод SHRIMP-II для циркона из сиенитов и габброидов Елетьозера, бадделеита и циркона из карбонатитов Тикшеозера [Corfu et al., 2011; Sharkov et al., 2015]. Разработаны схемы обогащения (дробления, измельчения) и гранулометрического контроля обогащаемых ильменит-магнетитовых руд, нефелиновых и щелочных сиенитов, апатитовых карбонатитов [Щипцов и др., 2023б].

Образование материнских магм Тикшеозерско-Елетьозерского комплекса, как и других ультраосновного-щелочно-карбонатитовых комплексов, связано с двухстадийным плавлением головы мантийного плюма: 1) адиабатическое плавление его внутренних частей, приводящее к появлению щелочных ультраосновных магм (щелочных пикритов), фракционная кристаллизация которых дает щелочные магмы; 2) инконгруэнтное плавление верхней охлаждаемой кромки головы мантийного плюма под действием флюидов с высоким содержанием CO_2 , поступающих из зоны адиабатического плавления и приводящих к появлению карбонатитовых и нефелин-полевошпатовых магм. Этот комплекс является одним из древнейших подобных интрузивов с двухстадийным плавлением мантийного плюма [Sharkov et al., 2015, 2021; Шарков и др., 2019].

Елетьозерский массив сложен сиенит-габбровыми породами около 100 км^2 с возрастом $2086 \pm 30 \text{ Ma}$ [Sharkov et al., 2015], а Тикшеозерский массив – преимущественно клинопироксенитами при существенной роли карбонатитов и фойдолитов на территории площадью 24 км^2 с возрастом $1999 \pm 5 \text{ Ma}$ [Corfu et al., 2011] (рис. 7, А, Б).

Главной особенностью первой фазы Елетьозерского массива является широкое развитие

мафит-ультрамафитовых пород, содержащих значительные количества Fe-Ti-оксидов (магнетит, титаномагнетит, ильменит), достигающих уровня рудных концентраций. В целом комплекс имеет концентрически зональное строение, но западная его часть сорвана крупным разломом и первоначальные размеры и строение массива неизвестны.

Вторая фаза Елетьозерского массива представлена преимущественно микроклиновыми сиенитами, которые составляют 70–75 % по объему. Они образуют таблитчатые кристаллы, часто с микродвойниковой решеткой и пертитовой структурой. Нефелин распределен неравномерно, на Центральном участке доля нефелина увеличивается локально до 26 %, и он часто замещается канкринитом. Процентное содержание темноокрашенных минералов также колеблется от нескольких процентов до 15–20 %. Среди них преобладают щелочные амфиболы серии эгирина и арфведсонита, часто замещающие эгирин.

Первая интрузивная фаза Тикшеозерского массива, составляющая до 70 % современной площади, представляет собой низко-Ti и высоко-Mg породы (кумуляты) с варьирующими соотношениями кумулятивных клинопироксена (диопсида) и оливина при низких концентрациях Fe-Ti-оксидов (титаномагнетит, магнетит, ильменит). Изотопные данные свидетельствуют о том, что карбонатитовые расплавы произошли из того же мантийного источника, что и ассоциирующие с ними силикатные магмы. Геохимические данные по ультрамафит-щелочным породам комплекса свидетельствуют о том, что они произошли из общей исходной магмы (щелочного пикрита), тогда как карбонатиты и карбонат-силикатные породы формировались за счет инконгруэнтного плавления верхнего охлажденного края головы мантийного плюма, обогащенного флюидами CO_2 .

Вторая фаза Тикшеозерского комплекса образована преимущественно кальцитовыми низко-Mg и -Fe карбонатитами, а также варьирующими по составу карбонат-силикатными породами, обогащенными Na_2O и Al_2O_3 .

Минерагеническая особенность данного комплекса подчеркивается второй фазой развития, с которой связано формирование крупных месторождений промышленных минералов в щелочных сиенитах и карбонатитах.

На рудном участке Суриваара Елетьозерского массива выделены пять залежей – Северная, Западная, Центральная, Параллельная и Главная. По минеральному составу рудные минералы представлены магнетитом, титаномагнетитом и ильменитом. Из других

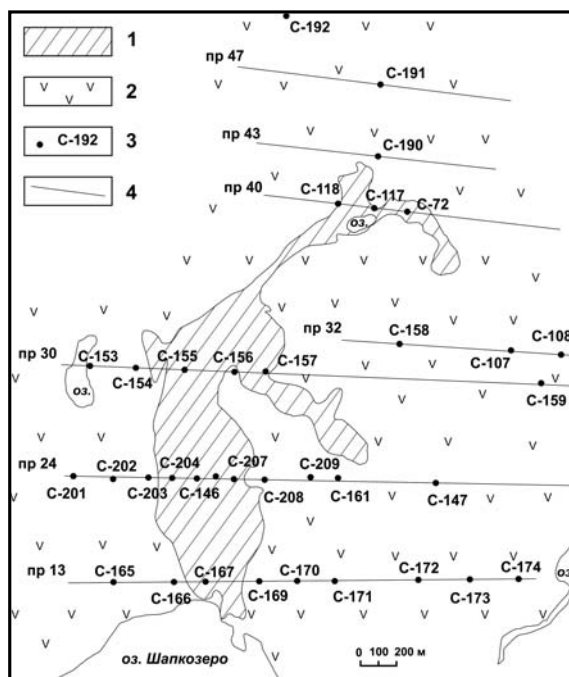
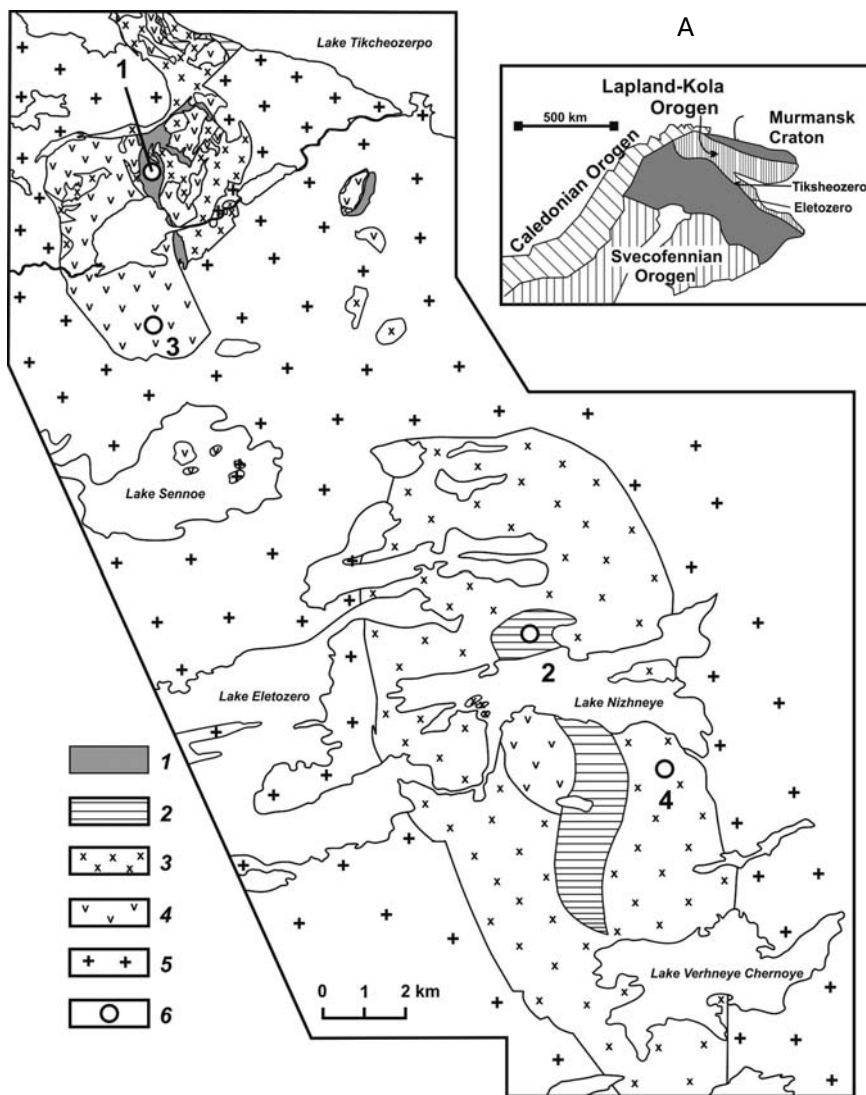


Рис. 7. А. Схема геологического строения Тикшеозерско-Елетьозерского ультрабазит-щелочно-карбонатитового комплекса. Сост. В. В. Щипцовым и Н. И. Щипцовой с использованием материалов [Богачев и др., 1963]: 1 – карбонатиты; 2 – нефелин и щелочные сиениты; 3 – породы основного состава; 4 – породы ультраосновного состава; 5 – гранитоиды; 6 – месторождения: 1 – Карбонатитовое; 2 – оз. Нижнее; 3 – Шапкозерское; 4 – Суриваара. Б. Участок «Карбонатитовый» и разрезы: 1 – карбонатиты; 2 – ультрабазиты и базиты; 3 – скважина; 4 – профиль. Скважины и их номера по профилям отмечены черными кружками. Сост. В. В. Щипцов

Fig. 7. A. Scheme of the geological structure of the Tiksheozero-Eletozersky ultramafic-alkaline-carbonatite complex. Compiled by V. V. Shchiptsov and N. I. Shchiptsova using the materials of [Bogachev et al., 1963]: 1 – carbonatites; 2 – nepheline and alkaline syenites; 3 – rocks of basic composition; 4 – rocks of ultramafic composition; 5 – granitoids; 6 – deposits: 1 – Karbonatitovoye; 2 – Lake Nizhneye; 3 – Shapkozerskoye; 4 – Surivaara. B. The 'Carbonatite' region and sections: 1 – carbonatites; 2 – ultrabasites and basites; 3 – borehole; 4 – profile. Boreholes and their numbers along the profiles are marked with black circles. Compiled by V. V. Shchiptsov

минералов главными являются полевой шпат, оливин, амфибол [Кулмала и др., 1994].

По содержанию диоксида титана руды подразделяются на три сорта: 1 сорт – выше 12 % TiO_2 , 2 сорт – 8–12 %, 3 сорт – 5–8 %.

Ильменит представлен тремя генерациями: таблитчатыми зернами неправильной формы, тонкими пластинами, эмульсионной вкрапленностью в зернах магнетита.

Основные геолого-технологические исследования сиенитов проводились на участке Северный (озеро Нижнее). Присутствие сиенитов на участке Южный, расположенном между Нятоваарой и Суриваарой, подтверждено бурением до глубины 100 м. Тела на участке Северный имеют длину от 750 до 1250 м и ширину от 225 до 500 м. Сиениты в основном контактируют с оливиновыми габбро [Пекки, Разеренова, 1977].

Первоначальный дефицит кислорода способствовал образованию недонасыщенного кислородом нефелина. Несмотря на нестабильный состав и структуру пород при обогащении методом многостадийной электромагнитной сепарации были выявлены минеральные включения микронного размера в высококачественных полевошпатовых концентратах, состоящих из микроклина на 50–60 %, альбита и нефелина на 40–45 %. По химическому составу нефелин-полевошпатовые концентраты сопоставимы с продукцией нефелиновых сиенитов крупнейшего в мире месторождения Stjernøy (Норвегия) [Пекки, Скамницкая, 1977; Кулмала и др., 1991].

Сиениты состоят главным образом из микроклина $Ab_{7.5-8.5}-Or_{91.5-92}$, на долю которого приходится около 70–75 % объема. Он образует таблитчатые кристаллы, часто с микродвойниковой решеткой и пертитовой структурой, обусловленной наличием тонких выделений альбита. Наряду с этим альбит состава $Ab_{99.6}An_{0.2}Or_{0.2}$ образует и более крупные самостоятельные зерна; в целом на долю альбита приходится 15–20 % объема. Нефелин в породах развит неравномерно – от практического отсутствия до 5–6 и более об. %, концентрируется локально. Содержание темноцветных минералов также варьирует от нескольких до 15–20 %. Среди них преобладают эгирин и щелочной амфибол ряда арфведсонита, который часто замещает эгирин; в подчиненном количестве встречены железистый Ti-биотитового ряда лепидомелан, магнетит и титанит. Сходный состав имеют и жилы щелочных пегматитов, развитых преимущественно среди габброидов и содержащих их ксенолитов.

Карбонатиты участка Карбонатитовый расположены в Лоухском районе на южном берегу оз. Тикшеозеро и охватывают площадь около 2 кв. км. Длина основного рудного тела по простиранию 5,4 км, ширина в раздувах до 600 м. Форма карбонатитового тела неправильная, в горизонтальном близповерхностном сечении серповидная с извилистыми контурами (рис. 7, А).

Для карбонатитов показательным критерием являются отрицательные локальные гравиметрические аномалии. Карбонатиты Тикшеозерского массива в существующей рисовке на геологической карте занимают практически секущее положение по отношению к внутренней структуре массива и имеют различную выраженность в рельефе.

На крупное карбонатитовое тело с апофизами указывают отрицательные локальные гравиметрические аномалии. Карбонатиты приурочены к впадинам и погребены под рыхлыми отложениями мощностью 5–15 м. Они резко контактируют с силикатными вмещающими породами. Вмещающие породы часто брекчированы и пропитаны карбонатами, развиты катафорит-карбонатные метасоматиты по пироксенитам.

В отличие от большинства ультрамафит-щелочно-карбонатитовых комплексов, имеющих штокообразное или концентрически-зональное строение, Тикшеозерский интрузив представляет лополит, интродуцированный крупным карбонатитовым телом. В целом ситуация напоминает взаимоотношения между феррогабброидами и сиенитами в сиенит-габбровых комплексах Елетьозерского массива.

С вмещающими силикатными породами карбонатиты имеют резкие контакты с выраженными экзоконтактовыми ореалами развития катофорито-карбонатных метасоматитов по пироксенитам, цеолитовых агрегатов с содалитом, альбитом, пренином и эгирином по щелочным породам, с альбитом и эгирином по гранитоидам. Нередко вмещающие породы брекчируются и цементируются карбонатным материалом.

Формирование апатита было двухстадийным – в основную интрузивную стадию и стадию метасоматоза (автометасоматоза). По окраске апатит светло-зеленоватый, розоватый с желтоватым оттенком. Показатели преломления апатита $n_o = 1,640$ и $n_e = 1,637$. Резко преобладают кальцитовые карбонатиты, подчиненное значение имеют доломит-(анкерит)-кальцитовые и существенно доломитовые карбонатиты. Они характерны для флангов карбонатитового тела и развиваются в виде

полос мощностью до 5 м среди кальцитовых карбонатитов или на контакте карбонатитовых тел с магнезиальными вмещающими породами [Клюнин, Сафронова, 1984]. Исследованные апатиты характеризуются небольшим содержанием радиоактивных элементов U и Th, а также малой радиогенной составляющей свинца [Щипцов и др., 1991].

Изотопные исследования кальцитов подтверждают эндогенный источник. Впервые такой вывод сделан Г. П. Сафроновой [Сафронова, Гаврилова, 1982]. Общие вариации изотопных значений не выходят за пределы вариаций, установленных для карбонатитов гипабиссальной глубины формирования [Самойлов, 1984].

Определено, что наиболее эффективным является метод обогащения путем обратной флотации кальцита [Технологические..., 1991]. В качестве собирателя флотации силикатов может быть использован реагент из группы аминацетатов.

Шапкоозерский блок площадью 15 кв. км состоит из оливинитов, оливиновых пироксенитов и оливиновых габбро. На востоке он отделен от Центрального блока меридиональной системой разломов. Вертикальная мощность меняется от 20–100 м в южной части до 200–250 м в центре и на севере блока (рис. 7, А).

Редкометалльная и РЗЭ минерализация выявлена в жилах щелочных пегматитов среди ильменит-магнетитовых руд Елетьозера, содержание редких металлов достигает (в %): Nb – 0,5, Ta – 0,015, Y – 0,5, La – 0,1, Ce – 0,3, Hf – 0,03, Zr – 1, Be – 0,3. В титаномагнетитовых рудах отмечается устойчиво повышенное содержание ниобия (~ 100 г/т), а во вмещающих их клинопироксенитах – скандия (30–40 г/т) [Щипцов, Иващенко, 2018]. Редкометалльная и редкоземельная минерализации Тикшеозерско-Елетьозерского комплекса коррелируются с завершающей фазой становления интрузива – щелочные и нефелиновые сиениты и связанные с ними дайки бостонитов, сиенит-порфиоров, жилы щелочных пегматитов, лампрофиоров и брекчии взрыва [Богачев и др., 1963].

Главными минералами всех разновидностей елетьозерских пегматитов являются щелочные полевые шпаты (в основном микроклин-пертит и альбит).

Комплексные исследования участков с развитием в них промышленно ценного минерального сырья, такого как ильменит, титаномагнетит, сиениты, апатиты, оливиниты, показали промышленную значимость этих объектов. Совершенствование технологических методов позволяет оценить доступность недр с позиций

современного взгляда на геологию, технологию, экономику и экологию, и как следствие – на формирование новых минерально-сырьевых потоков.

Тикшеозерский и Елетьозерский массивы могут стать основой для формирования масштабного экономически прибыльного горно-промышленного комплекса.

Хизоваарский кластер минерального сырья

Хизоваарская структура Северо-Карельского зеленокаменного пояса является, по мнению специалистов, важным репером геологических процессов. Здесь особое минерагеническое значение имеют породы, по коэффициенту глиноземистости относимые к разновидностям умеренно глиноземистых и высокоглиноземистых пород. Региональный метаморфизм и ультраметаморфизм неоархейских пород сопровождался формированием метаморфогенных рудообразующих систем [Shchiptsov, Nikiforov, 2016]. Выделены два сланцевых «горизонта». Продуктивные метасоматиты, развитые по породам как кислого, так и основного состава, представлены кианитовыми и мусковитовыми кварцитами. С ними связано образование определенных промышленных минералов (кианит, мусковит, кварц, гранат, графит, ставролит, пирит), что показано на карте-схеме (рис. 8). Установлена полигенность и полихронность докембрийских толщ и выделены метаморфогенный, метаморфогенно-метасоматический и метасоматический природные типы руд [Щипцов и др., 2020а]. В течение длительного периода закономерно менялся режим ведущих эндогенных процессов, включая метасоматические преобразования.

Экспериментальные данные по изучению устойчивости алюмосиликатов в условиях меняющейся кислотности-щелочности и при различных температурах и давлениях объясняют появление неоднотипных парагенезисов минералов.

Обосновывается важность изучения промышленных минералов в районах распространения докембрийских высокоглиноземистых образований, а Хизоваарский объект представляет собой эталонный полигон для исследований. В метаморфических породах данной структуры развиты кислые и основные метасоматиты. Они образованы при средних температурах (450–600 °С) и высоких давлениях (5–8 кбар) и определены В. А. Глебовицким и С. А. Бушминым [1983] как хизовариты – глубинные аналоги скелей.

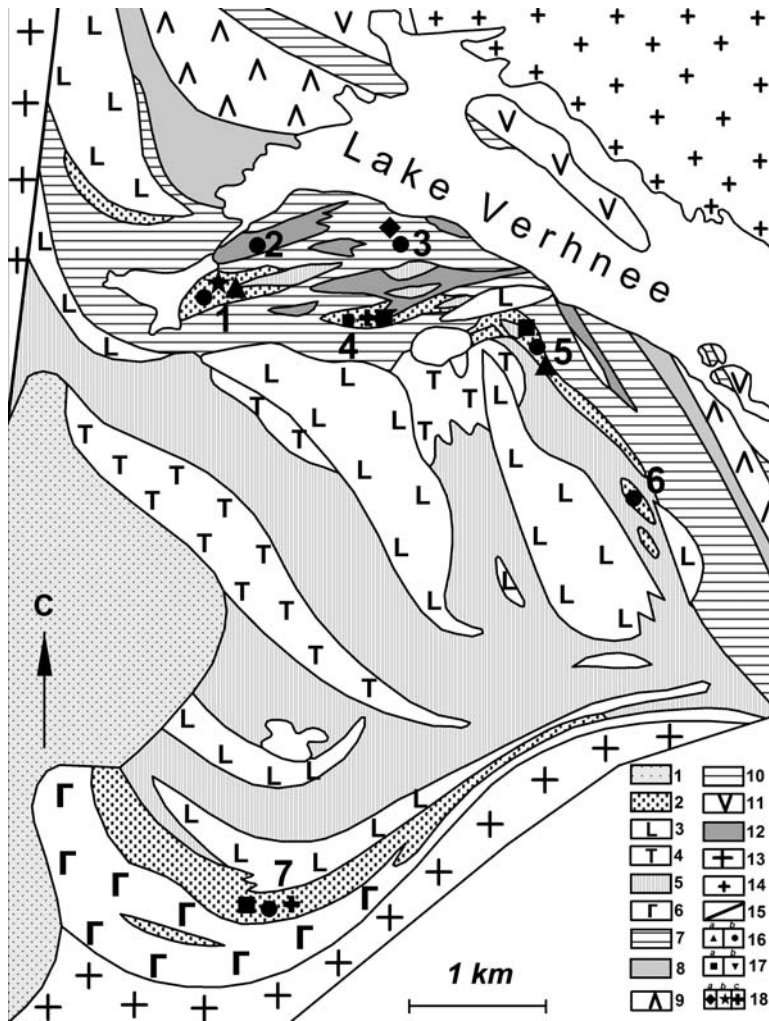


Рис. 8. Схема Хизоваарского рудного поля с главными месторождениями [Щипцов и др., 2023а]:

1 – четвертичные отложения; 2 – метасоматиты стадии кислотного выщелачивания; 3 – базальтовые лавы подушечного типа, силлы ультрабазитов; 4 – фельзитовые туфы, лавобрекчии; 5 – метадациты и метариолиты; 6 – силлы габбро; 7 – осадочно-вулканогенные и терригенные метасадки; 8 – метаандезиты, гипербазитовые бониниты и базальты; 9 – железистые metabasalts; 10 – бонинитовые серии метавулканитов; 11 – магниезальные базальты с телами перидотитовых кумулатов. Интрузивные и субвулканические породы: 12 – тела субвулкаников от мафитов до фельзитов; 13 – диориты и гранодиориты; 14 – микроклиновые граниты; 15 – тектонические дислокации; промышленные минералы: 16 – а) кварц, б) кианит; 17 – а) мусковит, б) гранат; 18 – а) графит, б) пирит, с) ставролит. Цифрами на рисунке обозначены рудопроявления: 1 – Южная линза (кианит, кварц, пирит), 2 – Северная линза (кианит), 3 – Восточная линза (кианит, графит), 4 – Фуksитовый (кианит, ставролит, мусковит), 5 – Межозерный (мусковит, кварц, кианит), 6 – Восточный (кианит), 7 – Высота-181 (гранат, кианит, ставролит)

Fig. 8. Scheme of the Khizovaara ore field with the major deposits [Shchiptsov et al., 2023a]:

1 – Quaternary sediments; 2 – acid leaching stage metasomatites; 3 – pillow-type basaltic lavas; sills of ultrabasites; 4 – felsite tuffs, lavobreccia; 5 – metadacites and metariolites; 6 – gabbro sills; 7 – sedimentary volcanogenic and terrigenous metasediments; 8 – metaandesites, hyperbasite boninites and basalts; 9 – ferruginous metabasalts; 10 – boninite series of metavolcanites; 11 – magnesian basalts with bodies of peridotite cumulates. Intrusive and subvolcanic rocks: 12 – bodies of subvolcanites from mafic to felsic; 13 – diorites and granodiorites; 14 – microcline granites; 15 – tectonic dislocations; industrial minerals: 16 – a) quartz, b) kyanite; 17 – a) muscovite, b) garnet; 18 – a) graphite; b) pyrite; c) staurolite. Numbers in Fig. indicate ore occurrences: 1 – Yuzhnaya Lens (kyanite, quartz, pyrite), 2 – Severnaya Lens (kyanite), 3 – Vostochnaya Lens (kyanite, graphite), 4 – Fuksitovy (kyanite, staurolite, muscovite), 5 – Mezhozerny (muscovite, quartz, kyanite), 6 – Vostochny (kyanite), 7 – Vysota-181 (garnet, kyanite, staurolite)

К хизоваритам относятся глубинные метасоматиты роговообманково-гранат-ставролит-кианит-кварцевого и роговообманково-ставролит-гранатового составов и кислотные метасоматиты, содержащие избыточный кремнезем с обогащенным алюминием. Среди пород Хизоваарского рудного поля локализованы природные руды (промышленные минералы) трех типов – метаморфогенного, метаморфогенно-метасоматического и метасоматического, каждый из которых имеет свои морфогенетические особенности [Щипцов и др., 2020а].

Они различаются по минеральному, гранулярному составу и характеру сростаний.

В тыловых зонах кислотного выщелачивания происходило формирование пирита, содержание которого в пирит-кианит-кварцевых и пирит-кварцевых комплексах достигает 15%. Данный процесс описан для метасоматитов и связанных с ними кианитовых руд северного крыла [Щипцов и др., 2020а]. В метаморфических и метасоматических комплексах также образуются в небольшом количестве ильменит, рутил, титаномагнетит.

Кислотные метасоматиты Хизоваарской структуры, как указано выше, формировались по всей площади в условиях кварц-кианитовой и кварц-мусковитовой фаций метасоматоза средних температур и повышенных давлений с высокой активностью летучих, что приводит к устойчивости других минералов. Метасоматиты являются следствием подвижности компонентов и изменения минеральной системы, где большую роль играли процессы природного обогащения. Промышленные минералы самоочищаются при проявленных метасоматических процессах. Надо отметить, что требования к суперчистоте концентратов промышленных минералов повышаются в связи с развитием высоких технологий.

Хизоваарская структура Северо-Карельской зеленокаменной области стала одним из полигонов для обобщения материалов по морфогенетическим типам и технологии обогащения кианитовых руд Карельского региона в рамках интеграционного проекта «Развитие минерально-сырьевой базы России: освоение новых источников высокоглиноземистого сырья (минералы группы силлиманита и пиррофиллита, каолины, золы и др.)», руководитель проекта академик РАН В. А. Коротеев [Проблемы..., 2010; Небокситовое..., 2011; Кианитовые..., 2012; Морфогенетические..., 2013]. Важным свойством кианита является его переход при обжиге в муллит. В табл. 3 приводятся основные сжатые данные.

Кианит как промышленный минерал – перспективное сырье для производства огнеупоров, противопожарных покрытий и керамических материалов. При сравнительных испытаниях в ВИАМ (Москва) установлено, что керамические формы из карельского кианита для литья турбинных лопаток самолетных и ракетных двигателей после обжига при температуре 1060° обладают достаточной прочностью, превосходя в три раза прочность подобных материалов, где использовался украинский кианит-силлиманит [Демонис и др., 1990]. В настоящее время российские потребители применяют дорогостоящие огнеупоры отечественного производства с использованием электрокорунда, карбида кремния и циркона. В то же время карельский кианит может обеспечить потребности огнеупорной промышленности страны. В настоящее время широкое применение находят оксинитридные соединения на основе системы «металл – кремний – алюминий – кислород – азот» (сиалоны).

Коренные месторождения кианитовых руд в России до сих пор не разрабатывались.

Кианит – это материал XXI века, и потенциальная сырьевая база кианита России связывается в определенной степени с Карельским регионом.

Маложелезистые мусковиты месторождения Восточная Хизоваара (Межозерное) – новый тип высокочистых промышленных минералов. Руды этого объекта, благодаря низкому содержанию примеси железа и высоким технологическим свойствам мусковита, являются уникальным видом сырья. В отличие от чупинского мелкозернистого мусковита маложелезистый мусковит имеет превосходные характеристики по железу – менее 1 %, мышьяку – не более 3 мг/кг, свинцу – не более 20 мг/кг, более 90 % свободных от минеральных примесей чешуек фракции 0,04–0,1 мм. Потребители молотой (порошковой) слюды-мусковит – страны с развитой экономикой.

Гранатовые руды месторождения Высота-181 представляют крупный потенциальный источник данного минерального сырья в России. Промышленное производство – ввод в эксплуатацию модульной обогатительной фабрики с наращиванием мощности до 50 тыс. т/год по руде. Отработка месторождения предлагается открытым способом. Для обогащения приемлема магнито-гравитационная схема.

Флюорит

Согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 г. № 2473-р, флюорит (плавиковый шпат) входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья. Распоряжением Правительства Российской Федерации № 939-р от 16.04.2024 г. он внесен в перечень дефицитных видов твердых полезных ископаемых.

Основные направления использования флюорита – в производстве HF, металлургии и керамике [Harben, 1995]. Главными странами, добывающими флюорит, являются Китай, Мексика, Монголия, ЮАР и Вьетнам. Наиболее интересными и многообещающими представляются проекты на флюорит, осуществляемые на европейском континенте британской компанией Tertiary Minerals Plc в Швеции (месторождение Сторуман) и Норвегии (месторождение Ласседален). Эти объекты находятся на территории Фенноскандинавского щита.

Перспективной территорией является и Приладожье (Ладожская протерозойская структура). В определенной степени перспективы связываются с Салминским батолитом габбро-анортозит-рапакивигранитной

Таблица 3. Основная характеристика кианитовых руд Хизоваарского месторождения (Южная линза) (рис. 9 и 10) [Щипцов и др., 1988; Минерально-сырьевая..., 2006]

Table 3. Main characteristics of kyanite ores from the Khizovaara deposit (Yuzhnaya Lens) (fig. 9 and 10) [Shchiptsov et al., 1988; Mikhailov, Aminov, 2006]

1	Название месторождения Name of deposit	Хизоваарское месторождение кианитовых руд (Лоухский район, Северная Карелия) Khizovaara kyanite ore deposit, Louhi District, North Karelia
2	Местоположение месторождения Location of deposit	Южная линза – в 12 км юго-восточнее ж/д станции Еловая, связано грунтовой дорогой Yuzhnaya Lens, 12 km south-east of Yelovaya Railway Station, connected by an earth road
3	Количество запасов промышленных категорий Amount of reserves, industrial categories	B+C, 2881 тыс. т (руда) B+C, 2881 thousand tons (ore)
4	Дата и место защиты ТЭО кондиций и запасов промышленных категорий Date and venue of reporting the results of a feasibility study on conditions and reserves of industrial categories	Протокол ВКЗ № 8578 от 14 декабря 1953 г. (Москва) VKZ Protocol # 8578 of 14 December, 1953, Moscow
5	Геологический тип месторождения Geological type of deposit	Метаморфогенно-метасоматический Metamorphogenetic-metasomatic
6	Рудные тела условия залегания форма размеры Ore bodies Mode of occurrence Shape Size	На участке Южная линза 6 залежей, глубина более 150 м. Мощность наносов от 1 до 6 м Линзообразные От 40 до 100 м, средняя 55 м, протяженность 950 м At the Yuzhnaya Lens site 6 bodies, depth is over 150 m. Detritus is 1-6 m thick Lenticular 40 to 100 m, average 55 m, length 950 m
7	Минеральный состав Mineral composition	Два типа руд: первый тип – кварц 70–85 %, кианит 10–25 % (главные); мусковит, плагиоклаз, биотит, графит, тальк (второстепенные); пирит 0–10 %, пирротин, магнетит (рудные); рутил, апатит, сфен, гранат (акцессорные); второй тип – кварц 50–60 %, кианит 10–40 % (главные); мусковит, графит (второстепенные); пирит 0–10 %, пирротин, арсенопирит (рудные); рутил (акцессорные) 2 types of ores: in type I quartz makes up 70–85 % and kyanite 10–25 % (major); muscovite, plagioclase, biotite, graphite, talc (minor); pyrite 0–10 %, pyrrhotite, magnetite (ore); rutile, apatite, sphene, garnet (accessory); in type II quartz makes up 50–60 % and kyanite 10–40 % (major); muscovite, graphite (minor); pyrite 0–10 %, pyrrhotite, arsenopyrite (ore); rutile (accessory)
8	Геолого-минералогические сорта руд Geologo-mineralogical ore grades	Светло-серые с игольчатым кианитом (91 % всего объема) и серые до стального-серых с лучистым (сноповидным радиально-лучистым) кианитом Light-grey with acicular kyanite (91 % of total volume) and grey to steel-coloured-grey with radiated (sheaf-like radiated) kyanite
9	Технологические сорта руд Technological ore grades	Светло-серые игольчатые кварц-кианитовые и серые лучистые кварц-кианитовые Light-grey acicular quartz-kyanite and grey radiated quartz-kyanitic
10	Способы отработки Quarrying method	Руда по крепости (шкала буримости) – VIII категория. Отработка целесообразна многоступенным карьером с оставлением целика на опасных участках Ore strength (drillability scale) – category VIII. Multi-bench quarrying with a pillar left in unreliable places is recommended. Relatively complex hydrogeological conditions
11	Способ обогащения Dressing method	Флотация Flotation
12	Коэффициент извлечения кианита по принятой для месторождения схеме обогащения Kyanite extraction coefficient consistent with the dressing scheme accepted for the deposit	Извлечение кианита в концентрат – 65–70 % Extraction of kyanite to concentrate – 65–70 %
13	Виды готовой продукции основной концентрат попутные концентраты Types of finished products Basic concentrate Associated concentrates	Кианитовый Кварцевый и пиритовый Kyanitic Quartz and pyritic

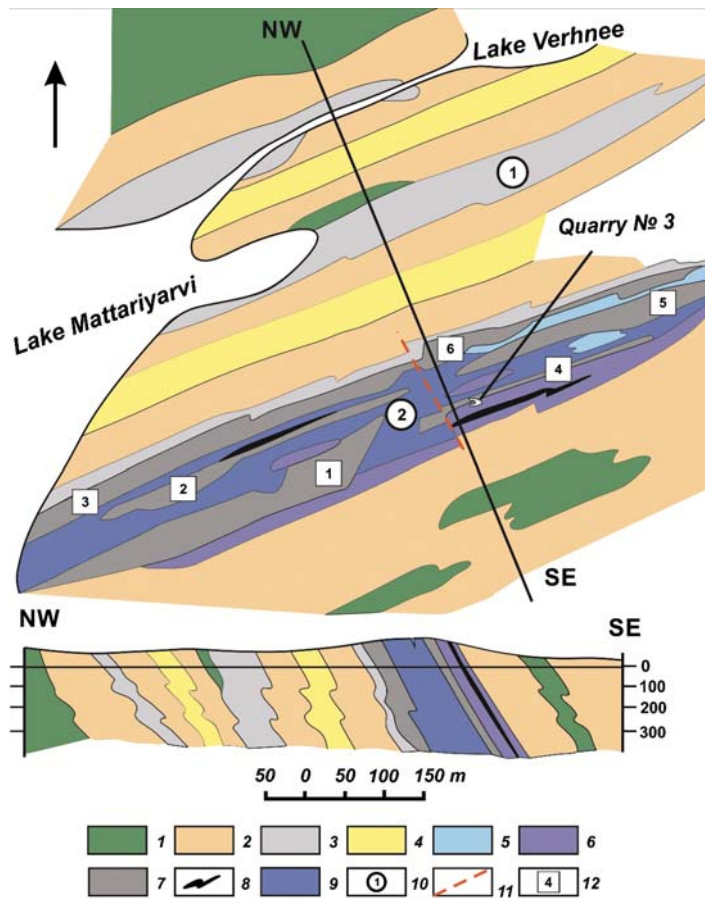


Рис. 9. Геологическая схема месторождения кyanитовых руд Южная линза Хизоваарского рудного поля. Сост. В. В. Щипцов:

1 – амфиболиты; 2 – амфибол-биотитовые сланцы; 3 – кyanит-биотитовые гнейсы (высокоглиноземистый горизонт I); 4 – слюдяные сланцы; 5 – кyanит-полевошпатовые кварциты; 6 – амфибол-кyanит-стауролитовые метасоматические породы; 7 – кyanитовые кварциты (высокоглиноземистый горизонт II); 8 – графит-кyanитовые кварциты; 9 – мусковитизированные кyanитовые кварциты; 10 – жила Северная (1); жила Южная (2); 11 – разломы; 12 – количество рудных тел

Fig. 9. Geological scheme of the Yuzhnaya Lens kyanite ore deposit of the Khizovaara ore field. Compiled by V. V. Shchiptsov:

1 – amphibolites; 2 – amphibole-biotite schists; 3 – kyanite-biotite gneisses (high-alumina horizon I); 4 – mica schists; 5 – kyanite-feldspar quartzites; 6 – amphibole-kyanite-staurolite metasomatic rocks; 7 – kyanite quartzites (high-alumina horizon II); 8 – graphite-kyanite quartzites; 9 – muscovitised kyanite quartzites; 10 – Severnaya Lens (1); Yuzhnaya Lens (2); 11 – faulting; 12 – number of ore body



Рис. 10. Опытный карьер на месторождении Южная линза, залежь № 4 (фото В. В.Щипцова)

Fig. 10. Pilot quarry at the Yuzhnaya Lens deposit, deposit No. 4 (photo by V. V. Shchiptsov)

формации (возраст 1650–1550 млн лет) [Ларин, 2011]. Основные запасы и прогнозные ресурсы флюорита связаны с оловорудными проявлениями – Уксинское, Хопунваара, Хопунлампи, Люпикко и Юго-Западное Люпикко в Кительско-Питкярантском рудном районе [Металлогения..., 1999; Ладожская..., 2020]. Комплексное оруденение приурочено к карбонатным породам питкярантской свиты, обрамляющей гнейсо-гранитные купола, и локализуется в скарнах, апоскарновых метасоматитах и грейзенах.

В обрамлении Люпиковской структуры грейзены локализуются как в нижнем, так и в верхнем горизонтах карбонатных пород, а в пределах Уксинского проявления они вскрыты

только в нижнем горизонте, где распространены слюдисто-флюоритовые, кварц-слюдисто-флюоритовые, кварц-топаз-флюорит-слюдистые грейзены. Оруденение установлено также в грейзенизированных и альбитизированных по тектоническим зонам гранитах рапакиви и гнейсо-гранитах [Хазов, 1982]. Флюорит окрашен зонально – от полного отсутствия окраски до сине-фиолетового цвета.

Апоскарновые метасоматиты и грейзены несут основной объем флюоритовой минерализации и имеют значительно больший размах по мощности, простирацию и падению. Общая характеристика трех флюоритовых проявлений Северного Приладожья приводится в табл. 4 по Р. А. Хазову [Металлогения..., 1999].

Таблица 4. Характеристика флюоритовых проявлений Северного Приладожья [Металлогения..., 1999]

Table 4. Characteristics of fluorite occurrences in the Northern Priladozhye [Rybakov, Golubev, 1999]

Проявления Occurrences	Геологическая характеристика Geological characteristics	Количество рудных тел, мощность, м Number of ore bodies, thickness, m	Содержание флюорита, % Fluorite content, %	Запасы, С ₂ тыс. т Reserves, С ₂ thousand tons	Ресурсы, Р ₁ +Р ₂ тыс. т. Resources, Р ₁ +Р ₂ thousand tons
Уксинское	Грейзены: в нижнем карбонатном горизонте – кварц-слюдисто-флюоритовые, кварц-топаз-флюорит-слюдистые, слюдисто-флюоритовые; в верхнем – шпинельсодержащие слюдисто-флюоритовые, везувиан-флюорит-слюдистые	13 0,26–13,0	2,65–16,69 ср. 5,5	206,0	312,3
Uksinsky	Greisens: in the lower carbonate horizon – quartz-mica-fluorite, quartz-topaz-fluorite-micaceous, mica-fluorite; in the upper – spinel-containing mica-fluorite, vesuvianite-fluorite-micaceous	4 1,44–4,47		273,1	146,2
Хопунваара	Апоскарновые грейзены в нижнем и верхнем карбонатных горизонтах вдоль контакта с гранитами рапакиви. Флюорит – кристаллы (до 1 см), их агрегаты, гнезда, прожилки, полосы в полевошпатовых, флюорит-везувиановых и флюорит-слюдисто-магнетитовых метасоматитах	17 0,6–7,0	1,0–70,0 ср. 19,3	363,9	251,9
Хопунваара	Aposkarn greisens in the lower and upper carbonate horizons along the contact with rapakivi granites. Fluorite – crystals (up to 1 cm), their aggregates, nests, veinlets, and bands in feldspar, fluorite-vesuvianite, and fluorite-mica-magnetite metasomatites				
Юго-Западное Люпикко	Апоскарновые грейзены (кварц-слюдисто-флюоритовые) и пропилиты в нижнем и верхнем карбонатных горизонтах	7 0,5–10,2	1,0–30,0 ср. 16,7	250,5	244,1
Southwest Lupikko	Aposkarn greisens (quartz-mica-fluorite) and propylites in the lower and upper carbonate horizons				

Традиционно для обогащения флюоритовых руд применяют ручную и автоматическую сортировку, обогащение в тяжелых средах, отсадку, флотацию и окомкование концентратов. Основным методом обогащения является флотация. На действующих фабриках используют как флотационные, так и комбинированные схемы обогащения. Концентраты содержат 96–97 % флюорита при его извлечении из руды 81–82 % [Справочник..., 1984].

Выявленный жильно-штокверковый тип флюоритового оруденения в литий-фтористых гранитах и зоне их обрамления (Юго-Западное Люпикко) представляется исключительно перспективным для Питкярантского рудного района. Для этого типа оруденения требуются более простые по сравнению с апоскарновыми грейзенами технологические схемы для получения высококачественного флюоритового концентрата. Флюорит выделяется в голове процесса из фракции с двумя перечистками без реагентов и двумя перечистками с жидким стеклом. Лабораторным способом получен кондиционный флюоритовый концентрат, выход которого из бериллиевой разновидности составил 3,9 %, содержание флюорита в концентрате 92,5 %, при извлечении 80,1 %.

По результатам технологических исследований комплексных флюоритсодержащих оловянных руд Питкярантского рудного района, проведенных в ИГ КарНЦ РАН, была установлена возможность получения из них по магнитно-флотационной схеме обогащения флюоритового концентрата марки Ф-92, содержащего до 92 % флюорита при извлечении 58–63 %. Концентрат такой марки может быть использован в черной металлургии, в производстве эмалей и специальных сортов стекла [Ладожская..., 2020].

Сравнение с флюоритовыми концентратами действующих предприятий показывает, что карельский флюорит по качеству им не уступает, но отличается в лучшую сторону по крупности. При доизучении и переоценке запасов и ресурсов, естественно, их потенциал возрастет в несколько раз. Таким образом, следует заключить, что в Северном Приладожье существует определенный потенциал флюоритовых руд страны.

Полевой шпат

Наиболее распространенными по использованию в качестве технологического компонента при производстве строительной и технической керамики являются промышленные минералы группы полевых шпатов. По химическому составу полевые шпаты представляют собой

алюмосиликаты К, Na, Ca, реже Ba. Натриево-кальциевые полевые шпаты (плаггиоклазы) дают непрерывный изоморфный ряд от альбита до анортита. Важное коммерческое значение придается калиевому полевому шпату (микроклину). Микроклин или ортоклаз содержат 10 % и более K_2O , натриевый полевой шпат – 7 % или более Na_2O . В керамической промышленности для производства тонкой керамики (хозяйственный, художественный и электротехнический фарфор, фаянс) и строительной керамики (санитарно-керамические изделия, облицовочные и отделочные плитки, низкотемпературный фарфор и т. д.) полевошпатовые и кварц-полевошпатовые материалы используют в качестве плавня (флюса), при этом необходимо выполнять требования по соблюдению качественных характеристик. В электрокерамическом производстве для изготовления высоковольтных фарфоровых изоляторов и других электрокерамических изделий применяют сырьевые материалы со строго лимитируемыми массовыми долями K_2O и Na_2O , что обусловлено различным поведением компонентов в электрическом поле [Brioché, 2025].

На территории европейской части востока и севера России сосредоточено более четырех пятых всех разведанных запасов высококачественного керамического сырья, связанного с гранитными пегматитами. Важнейшими объектами Беломорского подвижного пояса являются арктические районы Северной Карелии – Хетоламбинская площадь (рис. 11) с добавлением крупных участков, Блинковые Варакки и Климовский, а также Торлов Ручей и Слюдяной Бор в Беломорском районе.

В 1980-х годах ГОК «Карелслюда» имел 10 рудников слюдяного и керамического производства, расположенных в поселках Чкаловский, Плотина, Малиновая Варакка, Хетоламбина, Карельский и Тэдино. Население поселков составляло более 11 тысяч человек, и около трех тысяч из них работали в горнодобывающей промышленности. В настоящее время горная добыча приостановлена, можем лицезреть только руины Чупинской ПОФ. Вопрос об экономической целесообразности закрытия одного из действующих опорных горнодобывающих центров арктической зоны Республики Карелия остается в силе.

Полевошпатовое пегматитовое сырье Карелии в указанных областях было апробировано на практике при разработке традиционных керамических пегматитов северной Карелии (Хетоламбина, Чкаловское, Блинковые Варакки и др.) (рис. 11) [Гродницкий, Полин, 1975; Гродницкий, 1982; Минерально-сырьевая..., 2006].

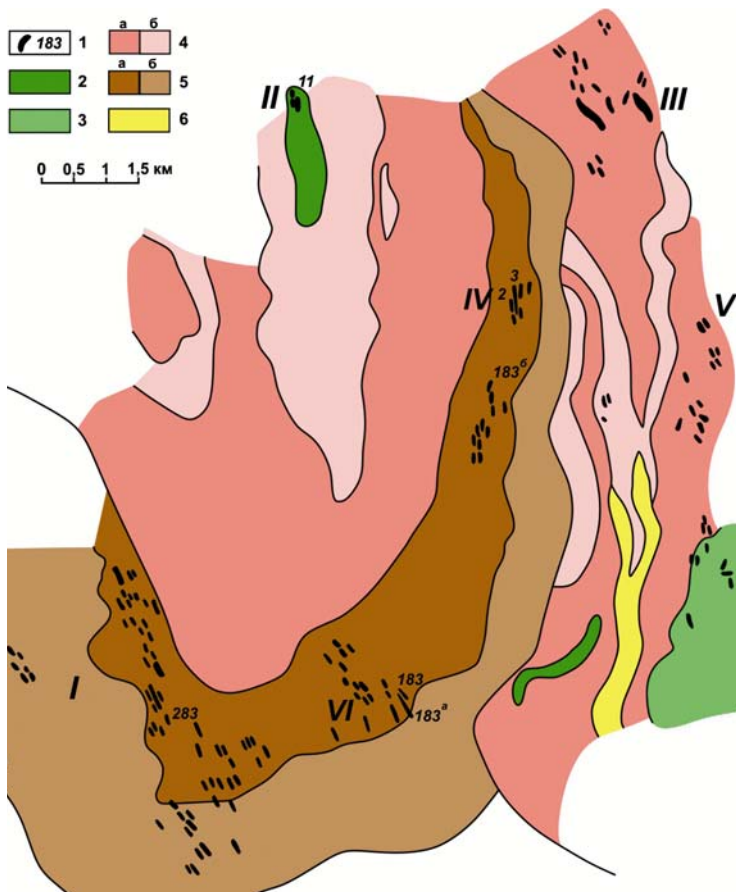


Рис. 11. Геологическая схематическая карта района Хетоламбинского месторождения пегматитов (по Е. К. Чуйкиной, Северная геологическая экспедиция):

1 – пегматитовые жилы и их количество; 2 – амфиболиты; 3 – амфиболовые, амфибол-биотитовые и биотитовые гнейсовидные диориты; 4 – микроклинсодержащие биотитовые гнейсы керетской свиты: а) гнейсовид мелкозернистый; б) сланцеват среднезернистый; 5 – биотитовые и амфибол-биотитовые гнейсы хетоламбинской свиты: а) гнейс тонкозернистый; б) сланец среднезернистый; 6 – биотитовые гнейсы светлосерые хетоламбинской свиты; 7 – границы горных комплексов. Районы: I – Хетоламбина; II – озеро Белое; III – озеро Воробьево; IV – озеро Уракка; V – Кивгуба; VI – Узкая Хетоламбина

Fig. 11. Geological schematic map of the Khetolambina pegmatite deposit area (by E. K. Chuikina, Northern geological expedition):

1 – pegmatite veins and their numbers; 2 – amphibolites; 3 – amphibole, amphibole-biotite and biotite gneissose diorites; 4 – microcline-bearing biotite gneiss of the Keret suite: а) fine-grained gneissoid; б) medium-grained schistose; 5 – biotite gneisses and amphibole-biotite gneisses of the Khetolambina suite: а) fine-grained gneissoid; б) medium-grained schistose; 6 – light-grey biotite gneisses of the Khetolambina suite; 7 – boundaries of rock complexes. Areas: I – Khetolambina; II – Lake Belaye; III – Lake Vorobyovo; IV – Lake Urakka; V – Kivguba; VI – Uzkiya Khetolambina

Вторая минерально-сырьевая база гранитных пегматитов находится в Приладожье (Люпикко, Якима, Улялегский пегматитовый куст – Кюрьяла, Брусничное и Большое).

На лабораторном и опытно-промышленном уровне исследовались нетрадиционные виды полевошпатовой продукции на основе обогащения кислых вулканогенных пород, например, геллефлинты, являющейся вскрышными породами на Костомукшском месторождении магнетитовых кварцитов [Вскрышные..., 1983], кварцевые порфиры месторождения Роза-Лампи [Белов и др., 1973], а также граниты рапакиви в пределах Салминского массива, в частности, проявление Юка-Коски [Пекки, Кулмала, 1965]. К нетрадиционным относятся нефелинсодержащие сиениты Ельтеозерского массива, подобные норвежским нефелиновым сиенитам эксплуатируемого месторождения Стьерноу [Пекки, Скамницкая, 1977], лейкократовые граниты (оз. Долгое, Лоухский район) [Бубнова и др., 2020]. Полевые шпаты из сиенитов массивов Райвомяки и Кайвомяки с формационно-возрастной принадлежностью к свекофеннскому постколлизийному шошонитовому магматизму [Eklund

et al., 1998 и др.] содержат барий, стронций и фосфор. Концентраты могут быть использованы для производства керамики специального назначения, например, тонколистовой конденсаторной, огнеупорной, электроизоляторов, термо- и химстойкого стекла. Анортозит – новый вид полевошпатового сырья в России (проявление Нижнее Котозеро) [Щипцов и др., 2004]. Лабораторные исследования анортозита показали возможность его использования после переработки для производства малощелочного термостойкого стекла, абразивов, наполнителей пластмасс и резин и др. Средний химический состав карельских полевых шпатов приводится в табл. 5 [Бубнова и др., 2020].

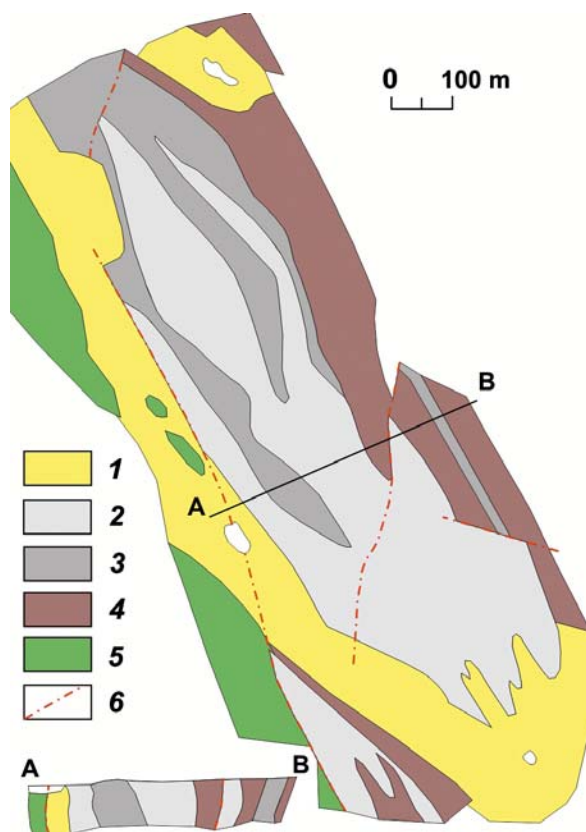
Месторождение кварцевых порфиров Роза-Лампи

В сумийско-сариолийском надгоризонте палеопротерозоя, залегающем в кислых вулканических породах структуры Лехта, выявлено и разведано месторождение кварцевых порфиров Роза-Лампи (рис. 12). Простирающееся на северо-запад штокообразное тело

Таблица 5. Средний химический состав карельских полевых шпатов (содержание, мас. %) [Бубнова и др., 2020]

Table 5. Average chemical composition of feldspars in Karelia (content, wt. %) [Bubnova et al., 2020]

Расположение Localities	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Потери при прокаливании Loss on ignition	Ba	Sr	Модуль K ₂ O/Na ₂ O modulus	
Гранитные пегматиты Granitic pegmatites	73,94	0,01	15,21	0,51	0,12	0,13	0,21	3,53	5,92	0,19	0,04			1,68	
Анортозиты Anorthosite	50,36	0,21	27,09	3,26	0,034	2,08	11,79	4,12	0,40	0,27	0,62	0,01	0,03	0,09	
Апограниты Apogranite	73,32	0,03	14,92	0,38	0,005	0,41	0,43	3,53	6,56	0,20	0,02			1,86	
Сиеениты Syenites	Щелочные Alkaline	57,72	0,68	17,92	6,21	0,186	0,73	2,87	6,2	6,16	0,28	1,12	0,20	0,03	0,99
	Барий-стронциевые Barium-strontium	63,04	0,03	20,81	0,15	0,007	0,142	1,00	5,67	7,07		0,38	1,25	1,02	1,25
Натровая геллефлинта Sodic halleflinta	76,52		14,02	0,10	-	0,10	2,44	5,75	0,20					0,03	
Калиевая геллефлинта Potassic halleflinta	71,18		15,80	0,18	-	-	0,38	0,84	12,00					14	
Кварцевые порфиры Quartz porphyry	76,80	0,21	12,44	0,40	0,01	0,64	0,28	0,68	7,60	0,04	0,97			11	



имеет длину около 1150 м, ширину от 50 до 400 м, среднюю мощность 24 м и глубину залегания до 70 м. Породы представлены лейкократовыми разностями кварцевых порфиров с вкрапленниками кварца диаметром 1–3 мм, массивной текстурой, местами рассланцованной. Цвет породы варьирует от светло-розового до зеленовато-серого. Матрица имеет следующий минеральный состав: кварц 35–50 %, калиевый полевой шпат 40–50 %, серицит 5–10 % и биотит 1–3 %. Средний состав породы (%): SiO₂ – 79,98; TiO₂ – 0,15; Al₂O₃ – 11,04; Fe_{общ} – 0,91; CaO – 0,16; MgO – 0,18; Na₂O – 0,40 и K₂O – 7,24.

Рис. 12. Геологическая карта месторождения Роза-Лампи [Белов и др., 1973]:

1 – четвертичные отложения; 2 – лейкократовый кварцевый порфир; 3 – темно-серый кварцевый порфир; 4 – туфогенный сланец; 5 – диабаз; 6 – тектонические дислокации

Fig. 12. Geological map of the Roza-Lampi deposit [Belov et al., 1973]:

1 – Quaternary sediments; 2 – leucocratic quartz porphyry; 3 – dark-grey quartz porphyry; 4 – tuffaceous slate; 5 – diabases; 6 – tectonic dislocations

Проведены технологические испытания по отработке схемы флотационного обогащения с доводкой полевошпатового концентрата электромагнитной сепарацией. Средний выход полевошпатового концентрата составил 45,1 %, кварцевого – 29,8 %. Содержание лимитирующих компонентов в кварц-полевошпатовом концентрате составляет: Fe_2O_3 – 0,15 %, сумма щелочных оксидов ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) – 8,5 %, калиевый модуль > 10. Обжиг керамической массы в промышленных туннельных печах показал, что фарфоровые изделия по белизне и физико-механическим свойствам не уступают фарфору с микроклином и кварцем гостированных промышленных объектов.

Высокоочищенный кварц

Согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 г. № 2473-р, высокоочищенный кварц входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья. Распоряжением Правительства Российской Федерации № 939-р от 16.04.2024 г. он внесен в перечень дефицитных видов твердых полезных ископаемых.

Кварцевое сырье (высокоочищенное кварцевое сырье, ВЧК) является одним из важнейших видов минеральных продуктов. На мировом рынке отмечается постоянно увеличивающийся спрос на высокоочищенные кварцевые концентраты. Кристаллическая решетка кварца допускает весьма ограниченный изоморфизм, вследствие чего содержание структурных примесей в кварце обычно невелико. К основным структурным примесям относятся Al^{3+} , Ga^{3+} , Fe^{3+} , Ge^{4+} , Ti^{4+} , P^{5+} [Weil, 1993], при этом содержание Al с близким к Si радиусом может достигать 1000 ppm. Ti и Fe могут быть ионами замещения или входить в состав минеральных микровключений, таких как рутил и окислы железа. Другие катионы H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ , Cu^+ и Ag^+ отмечаются в интерстициях как ионы-компенсаторы. Большинство элементов, отмечаемых в кварце (Na, K, Ca, Mg, Ba, Sr, Rb, REE, Mn, U, Th), связаны с флюидными и микроминеральными включениями, что необходимо принимать во внимание в процессах глубокого обогащения.

Наиболее низкое содержание микроэлементов характерно для низкотемпературного (480–530 °C) кварца [Blankenburg et al., 1994]. К ВЧК, используемому в высоких технологиях, в мировой практике относят продукт с содержанием SiO_2 более 99,997 % (примеси составляют менее 30 ppm).

Новым крупномасштабным рынком потребления ВЧК становится рынок производства

«солнечного» кремния – кремния для производства солнечных батарей. Кроме рынка кварцевых концентратов широко развит рынок кварцевых порошков. Основное применение кварцевых порошков – это производство эпоксидной пресс-массы для изготовления интегральных микросхем (70 %), огнеупоры (15 %) и точное литье (15 %) [The Economics..., 1992; Quartz..., 2012; Flook, 2013]. Основные области применения кварцевой крупки и продуктов ее технологического передела приведены на схеме (рис. 13).

На современном этапе рынок высокоочищенного кварца практически монополизирован компанией Unimin – ее доля составляет 80 %. Вторым по значимости игроком на данном рынке является норвежско-американская корпорация The Quartz Corporation Norway-USA – 8 %. Китайские и российские производители выпускают соответственно 7 и 5 % ВЧК [Quartz..., 2012].

Благодаря работам сотрудников ИГ КарНЦ РАН совместно с другими организациями страны (ВИМС, ИГЕМ РАН, ИГ КомиНЦ УрО РАН, ГИ КНЦ РАН, ЦНИИгеолнеруд, «Центркварц») внесен научный вклад в оценку кварцевого сырья Карело-Кольской кварценозной провинции России на современном уровне. Результаты многолетних исследований института могут быть определены в следующем обобщенном виде:

- для Карельского региона оценены основные виды кварцевого сырья [Assessment..., 1999; Щипцов и др., 2001, 2020б; Данилевская и др., 2004; Shchiptsov et al., 2015; Раков и др., 2016 и др.].

- разработан метод и запатентован способ очистки кварца от примесей на предварительной стадии исследований. Этот способ является более продуктивным за счет интенсификации процесса очистки кварца от примесей, снижения энергоемкости, длительности, упрощения технологии обогащения, обеспечения высокой экологичности, что позволяет отнести его к высокотехнологичным, экологически безопасным и энергосберегающим технологиям [Раков, Дубинчук, 2009; Скамницкая и др., 2013, 2014, 2018; Shchiptsov et al., 2015; Раков и др., 2016 и др.];

- полученные результаты являются фундаментальной основой расширения минерально-сырьевой базы кварцевого сырья и повышения коэффициента использования недр [Данилевская и др., 2004; Голованов и др., 2006; Данилевская, 2012; Раков и др., 2017; Щипцов и др., 2019, 2020б и др.] (табл. 6).

Проект ИГ КарНЦ РАН «Суперочищенный кварц: Карело-Кольская кварценозная провинция России» удостоен специального приза Петербургской международной технической ярмарки

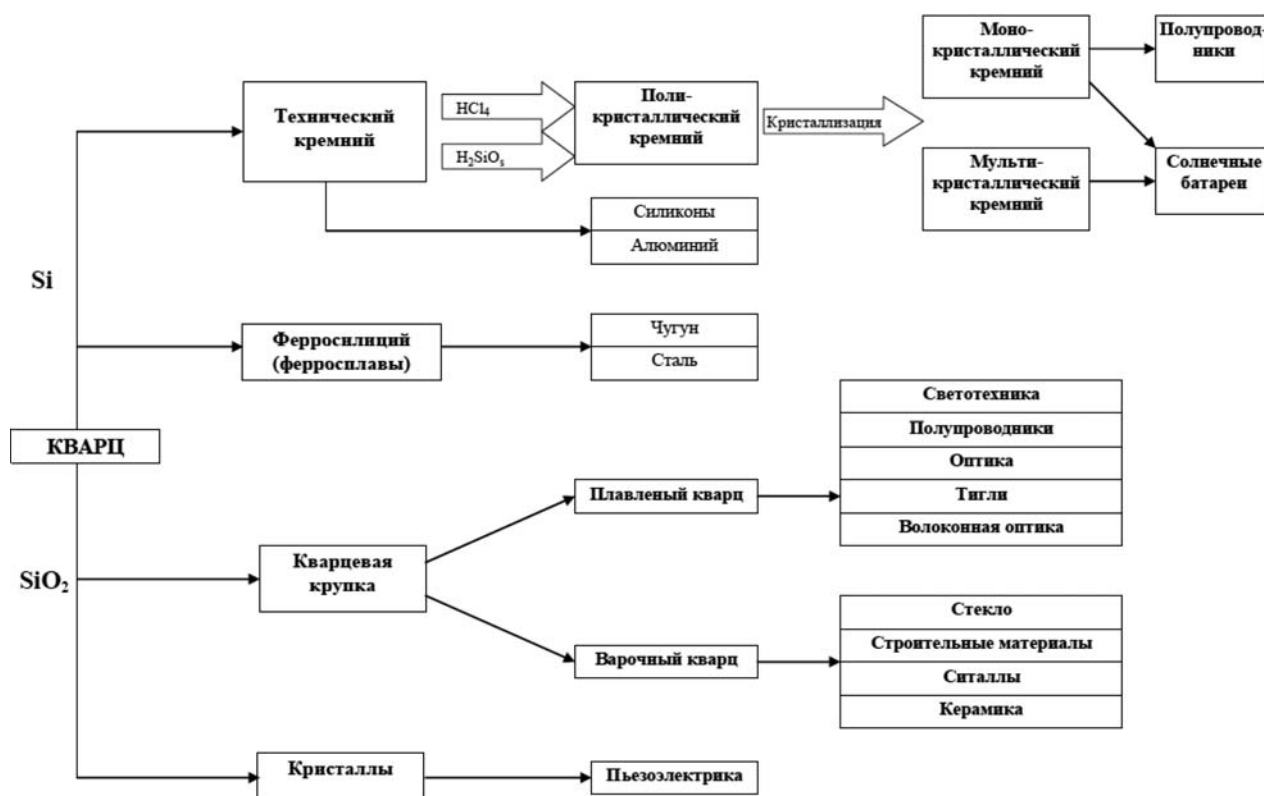


Рис. 13. Схема применения кварца и продуктов его технологического передела в промышленности [Щипцов и др., 2019]

Fig. 13. Scheme of application of quartz and products of its technological conversion in industry [Shchiptsov et al., 2019]

Таблица 6. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах глубокого обогащения из кварцевого сырья месторождений и проявлений Карелии (ppm) [Щипцов др., 2020б]

Table 6. Content of impurity elements in quartz concentrates of deep enrichment from quartz raw materials of deposits and occurrences in Karelia (ppm) [Shchiptsov et al., 2020б]

Объект Area	Fe	Ti	Al	Mn	Mg	Ca	K	Na	Zr	Sr
Рухнаволок / Rukhnavolok	0,64	2,9	13,0	-	0,01	0,002	0,1	3,6	-	0,1
Степаново Озеро / Stepanovo Lake	0,5	3,9	35,0	0,04	0,23	0,6	2,8	1	0,05	0,09
Меломайс / Melomais	0,8	4,9	17,0	0,01	0,36	1,5	3	2,6	0,63	0,13
Фенькина Лампи / Fenkina Lampi	0,74	0,15	20	0,25	0,49	11	14	47	0,04	0,2
Майское / Mayskoe	0,33	0,2	5,8	0,01	0,2	2,2	1,9	10	0,02	0,08
Кварц слюдяных отвалов Quartz of mica dumps	0,63	4,8	42	0,02	0,22	-	1,6	6,8	≤0,05	≤0,01

Продолжение табл. 3
Continued

Объект Area	Zn	B	Ba	Ni	Cr	Cu	Li	Ge	P	Co	Сумма Sum
Рухнаволок / Rukhnavolok	0,03	0,04	0,11	0,023	0	0	4,1	0,23	0,1	0,01	24,9
Степаново Озеро / Stepanovo Lake	0,04	0,21	0,02	0,01	0,03	0,06	4,1	0,7	0,2	0,01	49,5
Меломайс / Melomais	0,01	0,07	0,13	0,01	0,024	0,045	0,4	0,11	0,1	0,012	31,8
Фенькина Лампи / Fenkina Lampi	-	0,37	0,62	0,01	0,01	0,03	0/35	0,3	0,2	0,01	95,9
Майское / Mayskoe	-	0,15	0,13	<0,01	<0,01	0,013	0,14	0,18	<0,1	<0,01	21,0
Кварц слюдяных отвалов Quartz of mica dumps	-	0,9	-	≤0,01	≤0,01	1,1	0,9	-	≤0,2	≤0,01	42,3

и входящей в ее состав выставки «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Hi-Tech) (Санкт-Петербург, март 2017 г.).

Проведенные в 1999–2001 гг. совместно с Северной поисково-разведочной экспедицией исследования Института геологии КарНЦ РАН по проекту «Прогнозно-минералогическое изучение Республики Карелия в масштабе 1:1 000 000 с целью выявления объектов, перспективных на минеральное сырье для производства специальных кварцевых изделий» показали большой потенциал не только традиционно известной Беломорской мегаструктуры, но и всей территории Карелии, основную часть которой занимает Карельский кратон.

Научно обосновано практическое значение минерально-сырьевой базы высокочистого кварца Карелии, одного из перспективных регионов России.

Магнезиальное сырье

Высокомагнезиальные породы характеризуют определенную геохимическую специфику мезо- и неоархея. Эти комплексы стали преобладающими на ранней стадии формирования земной коры. К наиболее ранним продуктивным на высокомагнезиальные промышленные минералы относятся коматиит-базальтовая серия зеленокаменных поясов архея (высоко-Mg вулканы) и бонинитоподобные ассоциации в составе супракрустальных толщ тех же поясов, с которыми связаны новообразованные по высокомагнезиальным породам тальк, магнезит и серпентин двух этапов (мезо- и неоархей): 3,06–2,9 (Ведлозерско-Сегозерский, Сумозерско-Кенозерский и Южно-Выгозерский пояса) и 2,85–2,8 млрд лет (Костомукшская структура, где в коматиитовых лавах концентрации MgO составляют 24–31 %, достигая 33–39 %) [Богатиков и др., 2010].

В Карелии выделены два типа талькосодержащих пород [Щипцов, 2012]. Месторождения и проявления первого типа (апоультрамафитовый тип) распространены в ультрамафитах перидотит-пикритового или дунит-перидотитового состава, а также в коматиитах, обычно серпентинизированных, в архейских гранит-зеленокаменных областях. К ним относятся тальковый камень, реже тальк (железистый). Проявления второго типа (апокарбонатный тип) приурочены исключительно к доломитам ятулийского надгоризонта протерозоя. С этими комплексами связаны проявления маложелезистого талька до тальцитов.

К наиболее изученным месторождениям и проявлениям талька первого типа относятся Светлоозерское, Повенчанка, Рыбозерское и Игнойльское месторождения. Общими чертами всех этих месторождений являются интрузии серпентинизированных дунитов и гарцбургитов покровного типа, в которых обнаруживаются крутопадающие обогащенные тальком рудные тела мощностью до 200 м. Вмещающими породами в большинстве случаев выступают серпентиниты и хлоритовые сланцы. К настоящему времени выявлено около 20 проявлений и месторождений талькового камня в центральных районах Карелии и на территории административного подчинения г. Костомукши.

Апокарбонатный тип установлен, но для определения его перспектив требуется постановка поисково-оценочных работ.

В определенных магматических комплексах Карелии присутствуют оливиниты и дуниты. Отдельно выделяются мощные проявления оливинитов, дунитов и оливинового габбро в субщелочных пироксенит-габбровых с карбонатами и нефелиновыми сиенитами Тикшеозерском и Елетьозерском массивах на севере Карелии. Содержание MgO в некоторых оливинитосодержащих породах достигает 45 % [Богачев и др., 1963]. Необходимо решить целый комплекс задач от выбора наиболее перспективных участков и определения показателей их технологической переработки до разработки рациональной экономически приемлемой технологической схемы обогащения с учетом современных требований промышленности и экологии среды.

Доломиты первого класса государственного резерва представлены разведанными запасами около 12 млн тонн на Райгубско-Пялозерском месторождении в Кондопожском районе. Помимо этого указывается еще на четыре месторождения (Пялозеро (участок Киви-Шурья), Оленеостровское, Кузарандовское, Виданское) и шесть проявлений доломитов.

Территория Карелии представляет на Фенноскандинавском щите перспективную область на высокомагнезиальное сырье по той причине, что здесь нижний срез земной коры является существенно магнезиальным по составу.

Светлоозерское месторождение тальковых руд

Руды Светлоозерского карбонат-талькового месторождения сформированы в Западно-Светлоозерском массиве гипербазитов Каменозерского рудного узла. Выделены три крутопадающие пластообразные залежи (рис. 14):

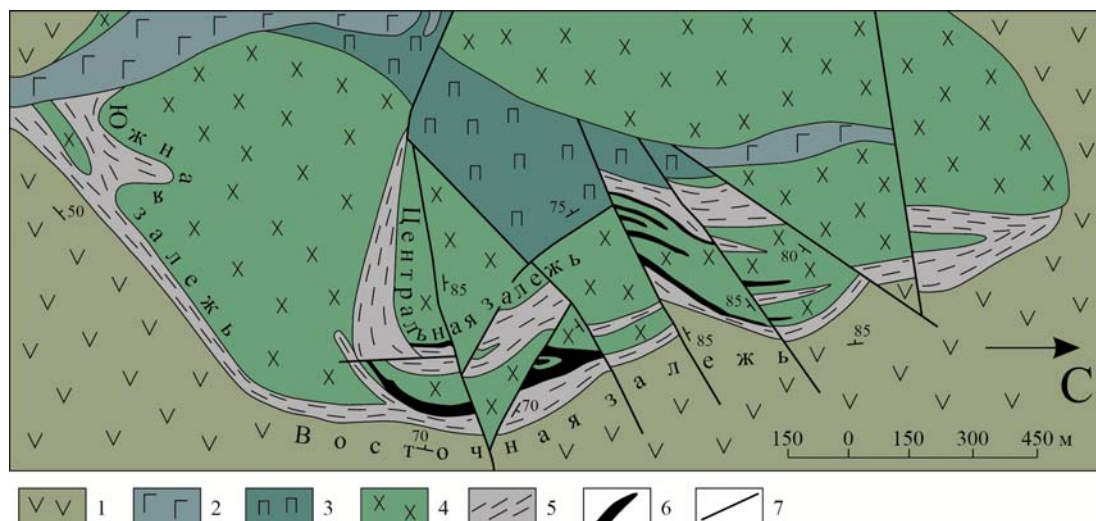


Рис. 14. Схематическая геологическая карта Западно-Светлоозерского массива (составлена с использованием материалов Каменноборской геологической партии КГЭ):

1 – metabasalts, metatuffs and matatuffites of basic and intermediate-acid composition (Vozhminskaya suite of the Kumbuksinskaya series), 2 – gabbro (dikes), 3 – pyroxenites (dikes), 4 – serpentinites, 5 – deposits of carbonate-talc ores, 6 – deposits of copper-nickel ores, 7 – faults

Fig. 14. Geological schematic map of the Zapadno-Svetloozersky massive (compiled using the materials from the Kamennoborsk geological party of the KGE):

1 – metabasalts, metatuffs and matatuffites of basic and intermediate-acid composition (Vozhminskaya suite of the Kumbuksinskaya series), 2 – gabbro (dikes), 3 – pyroxenites (dikes), 4 – serpentinites, 5 – deposits of carbonate-talc ores, 6 – deposits of copper-nickel ores, 7 – faults

Южная – мощность 30–150 м, длина до 800 м, Восточная – мощность 5–150 м, длина до 2 км, Центральная – мощность 40–120 м, длина до 1 км [Журавлев и др., 2003; Фролов, Фурман, 2003]. Центральная залежь дугообразной формы прослежена до глубины более 300 м и имеет простое строение, выдержанную мощность, высокое качество и благоприятные техниче-ские условия.

Минеральный состав карбонат-тальковых залежей представлен тальком – 45–60 %, магнезитом (брейнеритом) – 20–30 %, основные примеси – это хлорит, амфибол, серпентин, магнетит, сульфиды.

По качеству тальковых руд В. Н. Фурманом и С. Н. Бобылевой выделены четыре природных типа [Фролов, Фурман, 2003]:

I тип – карбонат-тальковые, крупнозернистые, порфиробластовые. Порфиробласты карбоната размером от 3–5 до 10–15 мм представлены темно-серым магнезитом;

II тип – карбонат-тальковые, мелкозернистые с наложенной порфиробластовой и гранолепидобластовой структурой. Более мелкие зерна карбонатов представлены в основном брейнеритом и относятся к метасоматическим образованиям;

III тип – хлорит-карбонат-тальковые, разнозернистые;

IV тип – карбонат-хлорит-тальковые, мелкозернистые.

Белизна относится к одному из важнейших показателей качества тальковых руд. Технологические испытания светлоозерских тальковых руд, проведенные в процессе оценки в институте ВНИИнеруд (г. Тольятти) в 1995 г., показали возможность получения из них концентратов микроталька с высокой белизной до 86 %. Обогащение осуществлялось по комбинированной магнито-флотационной схеме по безреагентной и реагентной флотации в голове процесса на материале лабораторных проб. Конечный этап извлечения продукта – это микронизация. В табл. 7 приводится химсостав руды и продуктов обогащения карбонатно-талькового Светлоозерского месторождения [Фролов, Фурман, 2003].

Таким образом, запасы и прогнозные ресурсы карбонат-тальковых пород на Светлоозерском месторождении составляют 23 млн тонн [Журавлев и др., 2003]. Рекомендуется обрабатывать открытым способом. Коэффициент вскрыши составит около 2 тыс. тонн. Таким образом, добыча железистого талька может быть отнесена к перспективному экономическому направлению для Республики Карелия. Руды Светлоозерского месторождения и других подобных проявлений не уступают по качеству лучшим мировым аналогам.

Таблица 7. Химический состав руды и продуктов обогащения Светлоозерского месторождения, вес. % [Фролов, Фурман, 2003]

Table 7. Chemical composition of ore and enrichment products of the Svetloozerskoye deposit, wt. % [Frolov, Furman, 2003]

	Руда Ore	Тальковый концентрат Talc concentrate	Магнезитовый концентрат Magnesite concentrate
SiO ₂	28,06	60,66	10,33
TiO ₂	0,06	0,01	0,01
Al ₂ O ₃	0,75	20,01	0,58
Fe ₂ O ₃	2,43	0,36	0,54
FeO	4,02	1,51	5,13
MnO	0,35	0,04	0,20
MgO	33,16	30,30	35,41
CaO	3,51	1,59	35,41
Na ₂ O	0,01	0,01	0,04
K ₂ O	0,01	0,01	0,06
H ₂ O	0,05	0,03	0,08
ППП	27,13	5,08	41,35
Co		0,01	
Cr		0,015	0,32
Ni		0,1	0,068
Общее Total	99,67	99,58	99,57

Заключение

Республика Карелия располагает значительными минерально-сырьевыми ресурсами. Интенсификация деятельности по добыче и переработке минерального сырья может стать потенциалом для экономического роста республики. Для повышения интенсификации деятельности в этом направлении необходимо создать условия, которые позволят в полной мере использовать возможности научного потенциала республики в производственной деятельности горных предприятий. Для того чтобы решать указанные задачи, необходимо в рамках единого организационно-правового и финансового пространства обеспечить широкое привлечение Института геологии КарНЦ РАН и Института лесных, горных и строительных наук ПетрГУ для систематического внедрения в производство инновационных технологий и передовых решений в области менеджмента и управления горнодобывающей отраслью.

С этой целью целесообразно повысить роль органов государственного управления в области разработки специальных целевых программ, обеспечивающих увеличение мас-

штабов геологоразведки, добычи и глубокой переработки минерального сырья силами республиканских горных предприятий. В роли государственного заказчика при разработке и реализации указанных специальных целевых программ для обеспечения эффективного планирования и контроля за ходом выполнения работ должна выступать государственная организация, действующая исходя из долгосрочных интересов РК. Кроме этого, указанная организация будет в оперативном порядке осуществлять взаимодействие с органами государственного управления федерального и регионального уровня.

Такой организационный подход позволит последовательно и в короткие сроки сформировать платформу для эффективного развития производственного горного сектора экономики республики и может обеспечить быстрый переход на новый технологический уклад. В конечном итоге все это дает возможности открыть новые рабочие места и расширить налогооблагаемую базу.

Сегодня минерально-сырьевые ресурсы республики используются далеко не в полном объеме. Существует множество месторождений, которые недостаточно хорошо исследованы.

Добыча минерального сырья в основном осуществляется с целью вывоза за пределы региона для дальнейшей переработки. Глубокая переработка минерально-сырьевых ресурсов в республике развита слабо. В значительной степени Карелия является сырьевым придатком для других регионов. Поэтому главной задачей деятельности, направленной на организацию полномасштабного освоения стратегических минерально-сырьевых ресурсов республики, должно стать дальнейшее развитие горной промышленности, позволяющей осуществлять глубокую переработку минерального сырья непосредственно на территории Карелии.

С целью обеспечения динамичного развития горнодобывающей промышленности республики необходимо в кратчайшие сроки разработать комплекс мер, направленных на создание развитой инфраструктуры, поддерживающей эффективное освоение и переработку минерально-сырьевых ресурсов. Важным элементом этой инфраструктуры должен стать экспериментально-технологический комплекс, в котором будут осуществляться опытно-конструкторские работы с целью адаптации результатов научно-исследовательской деятельности к условиям промышленного производства.

Таким образом, промышленные минералы Карелии имеют потенциальное значение в экономике страны. К ним относятся такие минеральные ресурсы, как чешуйчатый графит, высокоуглеродистые шунгиты, высокочистый кварц, чешуйчатый мусковит, флюорит, полевой шпат, керамический и огнеупорный кианит. 38 процентов территории всей Карелии – это арктическая зона России.

Литература

Балтыбаев Ш. К. Флюидные включения и РТ-режим формирования лейкосом мигматитов натрового ряда в гранулитовой части Приладожья (Ю. Карелия) // Записки ВМО. 2002. Ч. СХХХI, № 5. С. 22–39.

Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В., Конопелько Д. Л., Левченков О. А., Седова И. С., Шульдинер В. И. Геология и петрология свекофеннид Приладожья. СПб.: СПбГУ, 2000. 200 с.

Балтыбаев Ш. К., Левский Л. К., Левченков О. А. Свекофеннский пояс Фенноскандии: пространственно-временная корреляция раннепротерозойских эндогенных процессов. М.: Наука, 2009. 276 с.

Балтыбаев Ш. К., Левченков О. А. Вулканыты в свекофеннидах Приладожья и результаты U-Pb, Pb-Pb датирования пород разного генезиса как основа для корреляции свекофеннских событий // Геологическая корреляция. 2005. Т. 13, № 2. С. 3–18.

Бархатов А. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. и др. Технологические исследования карбонатитов Тикшезерского массива // Минеральное сырье Лоухского района. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1991. С. 20–35.

Белов Ю. И., Бреслер С. М., Пекки А. С., Кулма-ла Т. К. Кварцевые порфиры Карелии – новый источник полевошпатового сырья // Разведка и охрана недр. 1973. № 6. С. 7–10.

Бискэ Н. С. Графитовое оруденение Сев. Приладожья (геологические и генетические особенности). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1987. 172 с.

Бискэ Н. С., Медведев П. В., Мележик В. А., Ромашкин А. Е., Рычанчик Д. В., Филиппов М. М. Атлас текстур и структур шунгитоносных пород Онежского синклиория. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 80 с.

Богатиков О. А., Коваленко В. И., Шарков Е. В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли: связь во времени и в пространстве. М.: Наука, 2010. 606 с.

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

Богачев А. И., Слюсарев В. Д., Кравченко А. Н. и др. Новый тип щелочного протерозойского магматизма в Карелии // ДАН СССР. 1975. Т. 230, № 5. С. 1169–1172.

Борисов П. А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: Госиздат КФССР, 1956. 267 с.

Бубнова Т. П., Скамницкая Л. С., Ильина В. П. Полевошпатовое сырье Республики Карелия и его технологическая оценка // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 6. С. 58–73. doi: 10.17076/them1253

Великославинский Д. А. Сравнительная характеристика регионального метаморфизма умеренных и низких давлений. Л.: Наука, 1972. 192 с.

Вскрышные породы Костомукшского железорудного месторождения и пути их использования в народном хозяйстве / Ред. В. А. Соколов. Петрозаводск: Карелия, 1983. 142 с.

Галдобина Л. П., Калинин Ю. К., Купряков С. В. Эндогенное происхождение шунгитовых пород протерозоя Карелии // 2-е Всесоюз. совещание по геохимии углерода. М., 1986. С. 79–81.

Глебовицкий В. А., Балтыбаев Ш. К., Левченков О. А., Бережная Н. Г., Левский Л. К. Время, длительность и РТ-параметры полистадийного метаморфизма свекофеннид Приладожья: результаты определения изотопного возраста // ДАН. 2001. Т. 377, № 5. С. 667–671.

Глебовицкий В. А., Бушмин С. А. Послемигматитовый метасоматоз. Л.: Наука, 1983. 216 с.

Голованов Ю. Б., Михайлов В. П., Щипцов В. В., Родионов В. С. Кварцевое сырье // Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2006. Кн. 2. С. 55–69.

Гродницкий Л. Л. Гранитные пегматиты Балтийского щита. Л.: Наука, 1982. 296 с.

Гродницкий Л. Л., Полин А. К. Пегматиты Северной Карелии и их ореолы. Петрозаводск: Карелия, 1975. 227 с.

Данилевская Л. А. Потенциал Республики Карелия в освоении ресурсов кварцевого сырья // Горный журнал. 2012. № 5. С. 22–25.

Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. 226 с.

Дейнес Ю. Е., Ковалевский В. В., Кочнева И. В., Мошников И. А., Рожкова В. С. Физико-химические свойства шунгитовых пород различных стратиграфических уровней заонежской свиты // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 2. С. 84–89. doi: 10.17076/geo1187

Дейнес Ю. Е., Ковалевский В. В., Первунина А. В., Ромашкин А. Е., Рычанчик Д. В., Иешко Е. П. Шунгитовые породы Карелии: от геологических исследований к перспективам использования в инновационных технологиях // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 7. С. 72–88. doi: 10.17076/them1426

Демонис И. М., Карпович Ю. Ф., Озерова Г. П., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Кианитовые руды месторождения Хизоваара – перспективный вид огнеупорного сырья // Достижение науки – народному хозяйству. М.: Наука, 1990. С. 692–694.

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

Журавлев В. А., Ключникова Г. Н., Коровкин В. А., Руденко Д. Г., Турылева Л. В. Недрa Северо-Запада Российской Федерации. СПб.: ВСЕГЕИ, 2003. 520 с.

Иностранцев А. А. Новый крайний член в рядах аморфного углерода // Горный журнал. 1879. № 5-6. С. 24–36.

Калинин Ю. К., Калинин А. И., Скоробогатов Г. А. Шунгиты Карелии – для новых строительных материалов, в химическом синтезе, газоочистке, водоподготовке и медицине. СПб.: УНЦХ СПбГУ, ВВМ, 2008. 219 с.

Калинин Ю., Ковалевский В. Шунгитовые породы: горизонты научного поиска // Наука в России. 2013. № 6. С. 66–72.

Калинин Ю. К., Ковалевский В. В. Шунгитовые породы – 50 лет научно-технологических исследований в Институте геологии // Геология Карелии от архея до наших дней. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 172–179.

Клюнин С. Ф., Сафронова Г. П. О карбонатитах Тикшеозерского массива: опер.-информ. мат-лы ИГ Карел. фил. АН СССР за 1984 г. Петрозаводск, 1984. С. 8–13.

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

Коротеев В. А., Огородников В. Н., Войтеховский Ю. Л., Поленов Ю. А., Савичев А. Н., Щипцов В. В., Сазонов В. Н., Коротеев Д. В. Небокситовое алюминиевое сырье России. Екатеринбург: ИГГ УРО РАН, 2011. 228 с.

Кулешевич Л. В., Филиппов М. М., Гольцин Н. А. и др. Метасоматиты по шунгитоносным породам Максовского месторождения (Онежская структура, Карелия) // Литология и полезные иско-

паемые. 2019. № 2. С. 149–164. doi: 10.31857/S0024-497X20192149-164

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

Кулмала Т. К., Савицкий А. И., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Новый геолого-технологический этап изучения ильменитовых руд участка Суриваара (Елетьозерский массив) // Вопросы геологии, магматизма и метаморфизма докембрия Карелии. Петрозаводск, 1994. С. 70–73.

Кулмала Т. К., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В., Марьина С. П., Патковская Н. А. Петрохимия, геохимия и обогащение щелочных сиенитов Елетьозерского массива // Минеральное сырье Лоухского района. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1991. С. 35–54.

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

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

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

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

Нагайцев Ю. В. Петрология метаморфических пород ладожского и беломорского комплексов. Л.: Наука, 1974. 180 с.

Огородников В. Н., Коротеев В. А., Войтеховский Ю. Л., Щипцов В. В. Кианитовые руды России. Екатеринбург: ИГГ УРО РАН, 2012. 334 с.

Огородников В. Н., Коротеев В. А., Войтеховский Ю. Л., Щипцов В. В., Поленов Ю. А., Савичев А. Н., Нерадовский Ю. Н., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Гришин Н. Н., Белогурова О. А., Гершенков А. Ш., Коротеев Д. В. Морфогенетические типы и технология обогащения кианитовых руд. Екатеринбург: РИО УРО РАН, 2013. 310 с.

Пекки А. С., Кулмала Т. К. Граниты рапакиви – новое полевошпатовое сырье // Новые пути использования минерального сырья Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1965. С. 5–12.

Пекки А. С., Разоренова В. И. Месторождения полевошпатового сырья Карелии. Л.: Наука, 1977. 152 с.

Пекки А. С., Скамницкая Л. С. Нефелиновые сиениты Елетьозера – перспективный источник полевошпатового сырья // Минеральное сырье Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1977. С. 39–47.

Пономарев А. П. Шунгитовые породы как источник редкоземельных ультрамикрэлементов – лантаноидов // Микроэлементы в медицине. 2019. Т. 20(2). С. 3–9. doi: 10.19112/2413-617-2019-20-2-3-9

Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала // Мат-лы Всерос. совещания, посв. 80-летию КНЦ

РАН / Под ред. Ю. Л. Войтеховского. Апатиты: K&M, 2010. 186 с.

Раков Л. Т., Дубинчук В. Т. Новые подходы к проведению оценки качества кварцевого сырья // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 78–82.

Раков Л. Т., Дубинчук В. Т., Щипцов В. В., Скамницкая Л. С. Подвижные примеси в кварце // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 10. С. 100–118. doi: 10.17076/geo377

Раков Л. Т., Скамницкая Л. С., Дубинчук В. Т., Ружицкий В. В. Технологические свойства кварца Карело-Кольского региона сырья // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии: Сб. статей по мат-лам докладов Рос. семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 96–104.

Самойлов В. С. Геохимия карбонатитов. М.: Наука, 1984. 191 с.

Сафронова Г. П. Породообразующие карбонаты и апатит Тикшеозерского массива // Новое в минералогии Карело-Кольского региона. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1990. С. 25–39.

Сафронова Г. П., Гаврилова М. М. О карбонатитах Тикшеозерского массива (данные изотопного анализа кислорода карбонатитов) // Металлогения Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1982. С. 161–167.

Скамницкая Л. С., Бискэ Н. С. Графитовые руды Ихальского месторождения: основные природные типы и их технологическая оценка // Горный журнал. 2019. № 3(2260). С. 55–60. doi: 10.17500/gzh2010.03.11

Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т. Патент РФ № 2483024.2013. Способ обогащения природного кварцевого сырья.

Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А., Щипцов В. В., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т. Патент № 2525681.2014. Способ оценки качества кварцевого сырья.

Скамницкая Л. С., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т., Бубнова Т. П. Метод опережающей диагностики обогащения кварца // Разведка и охрана недр. 2018. № 10. С. 62–66.

Справочник по обогащению руд / Отв. ред. Ю. Ф. Ненарокомов. М.: Недра, 1984. Т. 3. 297 с.

Устинов В. Н., Загайный А. К., Смит К. Б., Ушков В. В., Лазько Е. Е., Лукьянова Л. И., Лобкова Л. П. Раннепротерозойские алмазоносные кимберлиты Карелии и особенности их формирования // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 9. С. 963–977.

Ушков В. В. Кимозерское проявление кимберлитов в Онежской структуре // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2001. С. 94–98.

Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2002. 282 с.

Фролов П. В., Фурман В. Н. Светлоозерское проявление руд железистого талька – эталонный объект комплексных месторождений зеленокаменных

поясов Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 6. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2003. С. 58–66.

Хазов Р. А. Металлогения Ладожско-Ботнического геоблока Балтийского щита. Л.: Наука, 1982. 192 с.

Щипцов В. В., Гаранжа А. В., Сыстра Ю. Й., Щипцова Н. И., Кулмала Т. К., Бородулин Ю. Д., Скамницкая Л. С., Захарова И. Б., Морозов Г. Г., Каненкова Е. А., Байбусинов Ш. Ш. Хизоваарское кианитовое поле (северная Карелия). Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1988. 104 с.

Шалимов А. С., Ковалевский В. В., Обрезков О. Н., Ярославцев А. Б. Сорбционные свойства шунгита // Неорганические материалы. 2004. Т. 40, № 4. С. 430–434.

Шарков Е. В., Чистяков А. В., Богина М. М., Богатиков О. А., Щипцов В. В., Беляцкий Б. В., Фролов П. В. Ультрабазит-щелочно-карбонатитовые комплексы как результат двухстадийного плавления мантийного плюма: по данным среднепалеопротерозойского Тикшеозерского интрузива, Северная Карелия, Россия // ДАН. 2019. Т. 486. С. 638–643. doi: 10.31857/S0869-56524864460-465

Шульдинер В. И., Балтыбаев Ш. К., Козырева И. В. Тектоно-метаморфическое районирование Приладожья // Вестник СПбГУ. 1997. Вып. 3, сер. 7. С. 63–70.

Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования / Ред. В. А. Соколов, Ю. К. Калинин. Петрозаводск: Карелия, 1975. 240 с.

Шунгиты – новое углеродистое сырье / Под ред. В. А. Соколова, Ю. К. Калинина, Е. Ф. Дюккиева. Петрозаводск: Карелия, 1984. 184 с.

Щипцов В. В. Графитоносные рудные районы Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 2. С. 33–49. doi: 10.17076/geo1551

Щипцов В. В. Магнезиальное сырье: история, мировой потенциал и ресурсы Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 15. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 45–61.

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

Щипцов В. В. Промышленные минералы Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 16–20. doi: 10.17580/gzh.2019.03.03

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Ильина В. П., Климовская Е. Е., Никифоров А. Г., Ручьев А. М., Светова Е. Н., Фролов П. В. Современный взгляд на оценку минерально-сырьевого потенциала промышленных минералов Республики Карелия // Актуальные проблемы поисковой геологии: Мат-лы науч.-практ. конф. М.: ВИМС, 2023а. С. 361–372.

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Заверткин А. С., Никифоров А. Г., Скамницкая Л. С., Фролов П. В. Кианитовые руды Хизоваарского рудного поля (Северная Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020а. № 6. С. 75–97. doi: 10.17076/them1252

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Никифоров А. Г., Фролов П. В. Минералого-технологические особенности графитовых руд Фенноскандинавского щита // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. С. 16–23. doi: 10.17076/tm14_32

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Светова Е. Н., Скамницкая Л. С. Кварцевое сырье Карело-Кольского региона: основные итоги исследований // Труды Карельского научного центра РАН. 2020б. № 10. С. 5–25. doi: 10.17076/geo1231

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Фролов П. В. Минеральный потенциал палеопротерозойского ультрамафит-щелочно-карбонатитового Тикшеозерско-Елетьозерского комплекса (Северная Карелия, Россия) // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023б. С. 18–26.

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

Щипцов В. В., Данилевская Л. А., Гаранжа А. В., Родионов В. С. Прогнозно-минерагеническая оценка кварценоности Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 4. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 71–78.

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

Щипцов В. В., Раков Л. Т., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Минералого-технологические критерии оценки перспективности кварцевого сырья Карело-Кольской кварценозной провинции // Геология и минерагения Северо-Востока России: Мат-лы XVII Геологического съезда Республики Коми. Т. 3. Сыктывкар, 2019. С. 269–272.

Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Гаранжа А. В., Данилевская Л. А., Савицкий А. И., Букчина О. В. Геолого-технологическая характеристика крупного проявления анортозитов Котозерского участка (Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. С. 151–162.

Щипцов В. В., Цюнь О. В., Желдаков Ю. А. Распределение U-Th-Pb и редкометалльных элементов в апатитах Карелии // Минералогический журнал. 1991. Т. 13, № 4. С. 92–98.

Beyssac O., Rumble D. Graphitic carbon: a ubiquitous, diverse and useful geomaterial // Elements. 2014. No. 10. P. 415–420. doi: 10.2113/gselements.10.6.415

Blankenburg H.-J., Götz J., Schultz H. Quarzrohstoffe. Deutscher Verlag für Grundstoff-industrie. Leipzig-Stuttgart, 1994. 296 p.

Brioche A. Feldspar and nepheline syenite // 2019 Mineral Yearbook (advanced release). New York: US Geological Survey, 2025. P. 241–249.

Buseck P. P., Galdobina L. P., Kovalevski V. V., Rozhkova N. N., Zaidenberg A. Z., Valley J. W. Shun-

gites: the C-rich rocks of Karelia, Russia // The Canadian Mineralogist. 1997. Vol. 35(6). P. 1363–1378.

Bushmin S. A., Glebovitsky V. A. Scheme of mineral facies of metamorphic rocks and its application to the Fennoscandian shield with representative sites of orogenic gold mineralization // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 2. С. 3–27. doi: 10.170176/geo265

Corfu F., Bayanova T., Schchiptsov V., Frantz N. U-Pb ID-TIMS age of the Tikshozero carbonatite: expression of the 2.0 Ga alkaline magmatism in Karelia, Russia // Centr. Eur. J. Geosc. 2011. Vol. 3. P. 302–308. doi: 10.2478/s13533-011-0029-z

Craig J., Biffi U., Galimberti R. F., Ghori K. A. R., Gorter J. D., Hakhoon N., Le Heron D. P., Thurow J., Vecoli M. The palaeobiology and geochemistry of Precambrian hydrocarbon source rocks // Mar. Pet. Geol. 2013. No. 40. P. 1–47. doi: 10.1016/j.marpegeo.2021.09.011

Eguchi J., Seales J., Dasgupta R. Great Oxidation and Lomagundi events linked by deep cycling and enhanced degassing of carbon // Nat. Geosci. 2019. doi: 10.1038/s41561-019-0492-6

Eklund O., Konopelko D., Rutanen H., Fröjdö S., Shebanov A. D. 1.8 Ga Svecofennian post-collisional shoshonitic magmatism in the Fennoscandian shield // Lithos. 1998. Vol. 45. P. 87–108. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00027-9

Engvik A. K., Gautneb H., Knezevic Solberg J., Ronning J. S., Austrheim H. High-grade formation of graphite in Vesteralen, northern Norway and consequences for petrophysical properties of the lower continental crust // NDF Abstracts and Proceedings of 14th Nordic Geological Winter Meeting. Oslo, 2020. P. 56.

European Commission Study on the review of the list of critical raw materials. Executive summary / Written by Deloitte Sustainability British Geological Survey, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Netherlands Organization for Applied Scientific Research. 2017. 9 p.

Flook R. Silica & High purity quartz // Industrial Minerals. 2013. 25 p.

Gautneb H., Tveten E. The geology, exploration and characterization of graphite deposits in the Jennestad area, Vesterålen area northern Norway // Norges geologiske undersøkelse Bulletin. 2000. Vol. 436. P. 67–74.

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

Gautneb H., Wanvik J. E. The graphite schists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway // Report NGU. 2016.

Harben P. W. The industrial minerals handy book. 2nd ed. // Industrial Minerals Metal Bulletin PLC: A guide to markets, specifications, and prices. London, 1995. 253 p.

Harben P. W., Bates R. L. Industrial minerals. Geology and world deposits. London, 1990. 312 p.

Hazen R. The Story of Earth. The first 4.5 billion years stardust to living planet. Penguin Publ. Group, 2013. 320 p.

Hodgskiss M., Crockford P. W., Turchyn A. V. Deconstructing the Lomagundi-Jatuli Carbon Isotope Excursion // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2023. Vol. 51. P. 301–330. doi: 10.1146/annurev-earth-031621-071250

Industrial minerals: deposits and new developments in Fennoscandia: Мат-лы междунар. конф. / Ред. В. В. Щипцов, Л. С. Скамницкая, Л. А. Данилевская. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. 162 с.

Industrial minerals: Papers presented at the 11th International Congress / Ed. J. B. Griffiths. New York: Unwin Brothers Ltd, The Gresham Press, Old Working, Surrey, 1994. 163 p.

Kovalevski V., Shchiptsov V., Sadovnichy R. Unique natural carbon deposits of shungite rocks of Zazhogino ore field, Republic of Karelia, Russia // 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2016. Vol. I. Science and technologies in geology, exploration and mining. Sofia, 2016. P. 673–680. doi: 10.5593/SGEM2016/B11/S01.085

Kovalevski V., Shchiptsov V. Shungites and their industrial potential // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019): Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Belgorod, 2019. P. 201–204. doi: 10.1007/978-3-030-22974-0_47

Leading Edge Materials. Wohna graphite. 2018. URL: <https://leadingedgematerials.com/wozna-graphite> (дата обращения: 27.10.2019).

Lyons T. W., Reinhard C. T., Planavsky N. J. The rise of oxygen in Earth's early ocean 1192 and atmosphere // *Nature*. 2014. Vol. 506. P. 307–315. doi: 10.1038/nature13068

Melezhik V. A., Filippov M. M., Romashkin A. E. A giant Palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: genesis and practical applications // *Ore Geol. Rev.* 2004. Vol. 24(1–2). P. 135–154. doi: 10.1016/j.oregeorev.2003.08.003

Palosaari J., Latonen R.-M., Smått J.-H., Raunio S., Eklund O. High-quality flake graphite occurrences in a high-grade metamorphic region in Sortland, Vesterålen, northern Norway // *Nor. J. Geol.* 2016. No. 96. P. 19–26.

Precambrian industrial minerals of Karelia / Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: Poliprint Ltd, 1993. 84 p.

Putintseva E. V., Spiridonov E. M. Features of the mineral composition of the oldest Russia's kimberlites and metakimberlites of Kimozero (Karelia) and the reasons for their // *Геология, магматизм и металлогения Центра Азии: Мат-лы I Всерос. полевой конф. с междунар. участием. Сангилен: ТувИКОПР СО РАН, 2018. С. 94–99.*

Quartz: deposits, mineralogy and analytics / Eds. J. Götze, R. Möckel. Springer Geology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 355 p. doi: 10.1007/978-3-642-22161-3_4

Rønning J. S. Gautneb H., Larsen B. E., Knežević J., Baranwal V.C., Elvebakk H., Gellein J., Ofstad F., Brønner M. Geophysical and geological investigations of graphite occurrences in Vesterålen and Lofoten, Northern Norway 2017 // NGU report 2018.011. Geological Survey of Norway. 2018.

Sharkov E. V., Bogina M. M., Chistyakov A. V., Belyatsky B. V., Antonov A. V., Lepekhina E. N., Shchiptsov V. V. Genesis and age of zircon from alkali

and mafic rocks of the Elet'ozero complex, North Karelia // *Petrology*. 2015. Vol. 23. P. 259–280. doi: 10.1134/S0869591115030066

Sharkov E. V., Chistyakov A. V., Bogina M. M., Shchiptsov V. V., Belyatsky B. V., Frolov P. V. Petrology of the Mid-Paleoproterozoic Tikshezero Ultra-mafic-Alkaline-Carbonatite Complex (Northern Karelia) // *Petrology*. 2021. Vol. 29, no. 5. P. 475–501.

Shchiptsov V. V., Nikiforov A. G. Contribution of metasomatic processes to the formation of industrial minerals in Khizovaara ore field, Republic of Karelia, Russia // 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2016. Vol. I. Science and technologies in geology, exploration and mining. Sofia, 2016. P. 125–132. doi: 10.5593/SGEM2016/B11/S01.017

Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S., Garanzha A. V., Danilevskaya L. A., Rodionov V. S., Astala J., Iwasaki H., Iwasaki F. Assessment of quartz occurrences the Republic of Karelia and their potential for pure quartz product // *Industrial minerals: deposits & new developments in Fennoscandia: Proceedings of the International Conference. Petrozavodsk, 1999. P. 63–67.*

Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Genetic value and the technological importance of structural not uniformity of submicroscopic level in quartz // SGEM 2015 Conference Proceedings. STEP 92 Technology Ltd, 1 "Andrey Lyapchev" Blvd, 1797 Sofia Bulgaria 2015, Book 1, vol. 1, Section Geology. P. 395–402. doi: 10.5593/SGEM2015/B11/S1.050

Shchiptsov V., Shekov V. Russian Karelia's industrial mineral potential: new ways of development // *Proceedings of SGEM*. 2020. Vol. 20. P. 16–25. doi: 10.5593/sgem2020/1.1/s01.035

The Economics of quartz // Roscill Information Services Ltd. London, 1992. 56 p.

Virta R., Lorenz W., Reguero M. Industrial minerals and rocks. Classification of end uses // *Industrial Minerals*. 1994. No. 319. P. 133–139.

Weil J. A. A review of the EPR spectroscopy of the point defects in σ -quartz the decade 1982–1992 // Helms C. R., Deal B. E. (eds.). *Physics and Chemistry of SiO₂ and the Si-SiO interface 2*. Plenum Press. New York, 1993. P. 131–144. doi: 10.5593/SGEM2015/B11/S4.071

References

Baltybaev Sh. K. Fluid inclusions and PT-mode of formation of leucosomes of migmatites of the soda series in the granulite part of the Lake Ladoga region (South Karelia). *Zapiski VMO = Proceedings of the Russian Mineralogical Society*. 2002;131(5):22–39. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K., Glebovitskii V. A., Kozyreva I. V., Konopel'ko D. L., Levchenkov O. A., Sedova I. S., Shul'diner V. I. Geology and petrology of the Svecofennides of the Lake Ladoga region. St. Petersburg: SPBGU; 2000. 200 p. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A. Volcanics in the Svecofennides of the Ladoga region and the results of U-Pb, Pb-Pb dating of rocks of different genesis as a basis for the correlation of Svecofennian events. *Geologicheskaya korrelyatsiya = Geological Correlation*. 2005;13(2):3–18. (In Russ.)

- Baltybaev Sh. K., Levskii L. K., Levchenkov O. A. Svecofennian Belt of Fennoscandia: spatio-temporal correlation of early Proterozoic endogenous processes. Moscow: Nauka; 2009. 276 p. (In Russ.)
- Barkhatov A. V., Skamnitckaya L. S., Bubnova T. P. et al. Technological studies of carbonatites of the Tikshezersky massif. *Mineral'noe syr'e Loukhskogo raiona = Mineral raw materials of the Loukhi District*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1991. P. 20–35. (In Russ.)
- Belov Yu. I., Bresler S. M., Pekki A. S., Kulmala T. K. Quartz porphyries of Karelia – a new source of feldspar raw materials. *Razvedka i okhrana nedr = Exploration and Protection of Mineral Resources*. 1973;6:7–10. (In Russ.)
- Beysac O., Rumble D. Graphitic carbon: a ubiquitous, diverse and useful geomaterial. *Elements*. 2014;10:415–420. doi: 10.2113/gselements.10.6.415
- Biske N. S. Graphite mineralization of the Northern Ladoga region (geological and genetic features). Petrozavodsk: KarRC RAS; 1987. 172 p. (In Russ.)
- Biske N. S., Medvedev P. V., Melezhik V. A., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Filippov M. M. Atlas of textures and structures of shungite-bearing rocks of the Onega synclinorium. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. 80 p. (In Russ.)
- Blankenburg H.-J., Götz J., Schultz H. Quarzrohstoffe. Deutscher Verlag für Grundstoff-industrie. Leipzig-Stuttgart; 1994. 296 p.
- Bogachev A. I., Zak S. I., Safronova G. P., Inina K. A. Geology and petrology of the Elet'ozero massif of gabbroic rocks of Karelia: geology, petrography, petrology, metallogeny. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1963. 160 p. (In Russ.)
- Bogachev A. I., Slyusarev V. D., Kravchenko A. N. et al. A new type of alkaline Proterozoic magmatism in Karelia. *DAN SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1975;230(5):1169–1172. (In Russ.)
- Bogatikov O. A., Kovalenko V. I., Sharkov E. V. Magmatism, tectonics, and geodynamics of the Earth: connection in time and space. Moscow: Nauka; 2010. 606 p. (In Russ.)
- Borisov P. A. Karelian shungites. Petrozavodsk: Gosizdat KFSSR; 1956. 267 p. (In Russ.)
- Brioche A. Feldspar and nepheline syenite. 2019 *Mineral Yearbook (advanced release)*. New York: US Geological Survey; 2025. P. 241–249.
- Bubnova T. P., Skamnitckaya L. S., Ilyina V. P. Feldspar raw material in the Republic of Karelia and its technological assessment. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;6:58–73. (In Russ.). doi: 10.17076/them1253
- Buseck P. P., Galdobina L. P., Kovalevski V. V., Rozhkova N. N., Zaidenberg A. Z., Valley J. W. Shungites: the C-rich rocks of Karelia, Russia. *The Canadian Mineralogist*. 1997;35(6):1363–1378.
- Bushmin S. A., Glebovitsky V. A. Scheme of mineral facies of metamorphic rocks and its application to the Fennoscandian shield with representative sites of orogenic gold mineralization. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;2:3–27. (In Russ.). doi: 10.17076/geo265
- Corfu F., Bayanova T., Shchiptsov V., Frantz N. U-Pb ID-TIMS age of the Tikshozero carbonatite: expression of the 2.0 Ga alkaline magmatism in Karelia, Russia. *Centr. Eur. J. Geosc.* 2011;3:302–308. doi: 10.2478/s13533-011-0029-z
- Craig J., Biffi U., Galimberti R. F., Ghori K. A. R., Gorter J. D., Hakho N., Le Heron D. P., Thurow J., Vecoli M. The palaeobiology and geochemistry of Precambrian hydrocarbon source rocks. *Mar. Pet. Geol.* 2013;40:1–47. doi: 10.1016/j.marpegeo.2021.09.011
- Danilevskaya L. A. Potential of the Republic of Karelia in the development of quartz raw materials. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2012;5:22–25. (In Russ.)
- Danilevskaya L. A., Skamnitckaya L. S., Shchiptsov V. V. Quartz raw materials of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. 226 p. (In Russ.)
- Deines Yu. E., Kovalevski V. V., Kochneva I. V., Moshnikov I. A., Rozhkova V. S. Physical and chemical properties of shungite rocks from different stratigraphic levels of the Zaonega formation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;2:84–89. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1187
- Deines Yu. E., Kovalevski V. V., Pervunina A. V., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Ieshko E. P. Shungite rocks of Karelia: from geological research to prospects for use in innovative technologies. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2021;7:72–88. (In Russ.). doi: 10.17076/them1426
- Demonis I. M., Karpovich Yu. F., Ozerova G. P., Skamnitckaya L. S., Shchiptsov V. V. Kyanite ores of the Khizovaara deposit are a promising type of refractory raw material. *Dostizhenie nauki – narodnomu khozyaistvu = Achievements of science – to the national economy*. Moscow: Nauka; 1990. P. 692–694. (In Russ.)
- Eguchi J., Seales J., Dasgupta R. Great Oxidation and Lomagundi events linked by deep cycling and enhanced degassing of carbon. *Nat. Geosci.* 2019. doi: 10.1038/s41561-019-0492-6
- Eklund O., Konopelko D., Rutanen H., Fröjdö S., Shebanov A. D. 1.8 Ga Svecofennian post-collisional shoshonitic magmatism in the Fennoscandian shield. *Lithos*. 1998;45:87–108. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00027-9
- Engvik A. K., Gautneb H., Knezevic Solberg J., Ronning J. S., Austrheim H. High-grade formation of graphite in Vesteralen, northern Norway and consequences for petrophysical properties of the lower continental crust. *NDF Abstracts and Proceedings of 14th Nordic Geological Winter Meeting*. Oslo; 2020. P. 56.
- European Commission Study on the review of the list of critical raw materials. Executive summary. Written by Deloitte Sustainability British Geological Survey, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Netherlands Organization for Applied Scientific Research. 2017. 9 p.
- Filippov M. M. Shungite-bearing rocks of the Onega structure. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2002. 282 p. (In Russ.)
- Flook R. Silica & High purity quartz. *Industrial Minerals*. 2013. 25 p.

Frolov P. V., Furman V. N. Svetlozero occurrence of ferrous talc ores – a reference object of complex deposits of greenstone belts of Karelia. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and useful minerals of Karelia*. Iss. 6. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2003. P. 58–66. (In Russ.)

Galdobina L. P., Kalinin Yu. K., Kupryakov S. V. Endogenous origin of shungite rocks of the Proterozoic of Karelia. *2-e Vsesoyuzn. soveshchanie po geokhimii ugleroda = 2nd All-Union conference on carbon geochemistry*. Moscow; 1986. P. 79–81. (In Russ.)

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

Gautneb H., Tveten E. The geology, exploration and characterization of graphite deposits in the Jennestad area, Vesterålen area northern Norway. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin*. 2000;436:67–74.

Gautneb H., Wanvik J. E. The graphite schists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway. Report NGU. 2016.

Glebovitsky V. A., Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A., Berezhnaya N. G., Levskii L. K. Time and duration and PT-parameters of polystage metamorphism of the Svecofennides of the Ladoga region: results of isotope age determination. *DAN = Doklady Earth Sciences*. 2001;377(5):667–671. (In Russ.)

Glebovitsky V. A., Bushmin S. A. Post-migmatite metasomatism. Leningrad: Nauka; 1983. 216 p. (In Russ.)

Golovanov Yu. B., Mikhailov V. P., Shchiptsov V. V., Rodionov V. S. Quartz raw materials. *Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya = Mineral resource base of the Republic of Karelia*. Book 2. Petrozavodsk: Karelia; 2006. P. 55–69. (In Russ.)

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

Götze J., Möckel R. (eds.). Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Springer Geology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2012. 355 p. doi: 10.1007/978-3-642-22161-3_4

Griffiths J. B. (ed.). Industrial minerals: Papers presented at the 11th International Congress. New York: Unwin Brothers Ltd, The Gresham Press, Old Working, Surrey; 1994. 163 p.

Grodnitsky L. L. Granite pegmatites of the Baltic Shield. Leningrad: Nauka; 1982. 296 p. (In Russ.)

Grodnitsky L. L., Polin A. K. Pegmatites of Northern Karelia and their halos. Petrozavodsk: Karelia; 1975. 227 p. (In Russ.)

Harben P. W. The industrial minerals handy book. 2nd edition. *Industrial Minerals Metal Bulletin PLC: A guide to markets, specifications, and prices*. London; 1995. 253 p.

Harben P. W., Bates R. L. Industrial minerals. Geology and world deposits. London; 1990. 312 p.

Hazen R. The Story of Earth. The first 4.5 billion years stardust to living planet. Penguin Publ. Group; 2013. 320 p.

Hodgskiss M., Crockford P. W., Turchyn A. V. Deconstructing the Lomagundi-Jatuli Carbon Isotope Excursion. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2023;51:301–330. doi: 10.1146/annurev-earth-031621-071250

Inostrantsev A. A. New extreme member in the series of amorphous carbon. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 1879;5-6:24–36. (In Russ.)

Kalinin Yu. K., Kalinin A. I., Skorobogatov G. A. Shungites of Karelia – for new building materials, in chemical synthesis, gas purification, water treatment and medicine. St. Petersburg: UNTSKH SPBGU, VVM; 2008. 219 p. (In Russ.)

Kalinin Yu., Kovalevsky V. Shungite rocks: horizons of scientific research. *Nauka v Rossii = Science in Russia*. 2013;6:66–72. (In Russ.)

Kalinin Yu. K., Kovalevsky V. V. Shungite rocks – 50 years of scientific and technological research at the Institute of Geology. *Geologiya Karelii ot arkheya do nashikh dnei = Geology of Karelia from the Archean to the present day*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. P. 172–179. (In Russ.)

Khazov R. A. Metallogeny of the Ladoga-Bothnian geoblock of the Baltic Shield. Leningrad: Nauka; 1982. 192 p. (In Russ.)

Klyunin S. F., Safronova G. P. On carbonatites of the Tiksheozersky massif: operational information materials of the Institute of Geology of the Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences for 1984. Petrozavodsk; 1984. P. 8–13. (In Russ.)

Koroteev V. A., Ogorodnikov V. N., Voitekhovskii Yu. L., Polenov Yu. A., Savichev A. N., Shchiptsov V. V., Sazonov V. N., Koroteev D. V. Non-bauxite aluminum raw materials of Russia. Ekaterinburg: IGG URO RAN; 2011. 228 p. (In Russ.)

Kovalevski V., Shchiptsov V., Sadovnichy R. Unique natural carbon deposits of shungite rocks of Zazhogino ore field, Republic of Karelia, Russia. *16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2016*. Vol. I. Science and technologies in geology, exploration and mining. Sofia; 2016. P. 673–680. doi: 10.5593/SGEM2016/B11/S01.085

Kovalevski V., Shchiptsov V. Shungites and their industrial potential. *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019): Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Belgorod; 2019. P. 201–204. doi: 10.1007/978-3-030-22974-0_47

Kuleshevich L. V., Filippov M. M., Gol'tsin N. A. et al. Metasomatites after shungite-bearing rocks of the Maksovskoye deposit (Onega structure, Karelia). *Litologiya i poleznye iskopaemye = Lithology and Useful Minerals*. 2019;2:149–164. (In Russ.). doi: 10.31857/S0024-497X20192149-164

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

Kulmala T. K., Savitsky A. I., Skamnitskaya L. S., Shchiptsov V. V. New geological and technological stage in the study of ilmenite ores of the Surivaara site

(Eletozersky massif). *Voprosy geologii, magmatizma i metamorfizma dokembriya Karelii = Issues of geology, magmatism and metamorphism of the Precambrian of Karelia*. Petrozavodsk; 1994. P. 70–73. (In Russ.)

Kulmala T. K., Skamnitskaya L. S., Shchiptsov V. V., Mar'ina S. P., Patkovskaya N. A. Petrochemistry, geochemistry and enrichment of alkaline syenites of the Eletozersky massif. *Mineral'noe syr'e Loukhskogo raiona = Mineral raw materials of the Loukhi District*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1991. P. 35–54. (In Russ.)

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

Leading Edge Materials. Wohna graphite. 2018. URL: <https://leadingedgematerialscom/wozna-graphite> (accessed: 27.10.2019).

Lyons T. W., Reinhard C. T., Planavsky N. J. The rise of oxygen in Earth's early ocean 1192 and atmosphere. *Nature*. 2014;506:307–315. doi: 10.1038/nature13068

Melezhik V. A., Filippov M. M., Romashkin A. E. A giant Palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: genesis and practical applications. *Ore Geol. Rev.* 2004;24(1–2):135–154. doi: 10.1016/j.oregeorev.2003.08.003

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

Nagaitsev Yu. V. Petrology of metamorphic rocks of the Ladoga and Belomorian complexes. Leningrad: Nauka; 1974. 180 p. (In Russ.)

Nenarokomov Yu. F. (ed.). Handbook of ore enrichment. Vol. 3. Moscow: Nedra; 1984. 297 p. (In Russ.)

Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Voitekhovskii Yu. L., Shchiptsov V. V. (ed.). Kyanite ores of Russia. Ekaterinburg: IGG UB RAS; 2012. 334 p. (In Russ.)

Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Voitekhovskii Yu. L., Shchiptsov V. V., Polenov Yu. A., Savichev A. N., Neradovskii Yu. N., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Grishin N. N., Belogurova O. A., Gershenkop A. Sh., Koroteev D. V. Morphogenetic types and technology of enrichment of kyanite ores. Ekaterinburg: RIO UB RAS; 2013. 310 p.

Palosaari J., Latonen R.-M., Smått J.-H., Raunio S., Eklund O. High-quality flake graphite occurrences in a high-grade metamorphic region in Sortland, Vesterålen, northern Norway. *Nor. J. Geol.* 2016;96:19–26.

Pekki A. S., Kulmala T. K. Rapakivi granites – new feldspar raw materials. *Novye puti ispol'zovaniya mineral'nogo syr'ya Karelii = New ways of using mineral raw materials of Karelia*. Petrozavodsk: Kareliya; 1965. P. 5–12. (In Russ.)

Pekki A. S., Razorenova V. I. Feldspar raw material deposits in Karelia. Leningrad: Nauka; 1977. 152 p. (In Russ.)

Pekki A. S., Skamnitskaya L. S. Nepheline syenites of Eletozero – a promising source of feldspar raw materials. *Mineral'noe syr'e Karelii = Mineral raw materials of Karelia*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1977. P. 39–47. (In Russ.)

Ponomarev A. P. Shungite rocks as a source of rare earth ultramicroelements – lanthanides. *Mikroehlementy v meditsine = Microelements in Medicine*. 2019;20(2): 3–9. (In Russ.). doi: 10.19112/2413-617-2019-20-2-3-9

Putintseva E. V., Spiridonov E. M. Features of the mineral composition of the oldest Russia's kimberlites and metakimberlites of Kimozero (Karelia) and the reasons for their. *Geologiya, magmatizm i metallogeniya Tsentra Azii: Mat-ly I Vseros. polevoi konf. s mezhdunar. uchastiem = Geology, magmatism and metallogeny of Central Asia: Proceed. of the I All-Russian field conference with int. part*. Sangilen: TuvIKOPR SO RAN; 2018. P. 94–99.

Rakov L. T., Dubinchuk V. T. New approaches to assessing the quality of quartz raw materials. *Novye metody tekhnologicheskoi mineralogii pri otsenke rud metallov i promyshlennykh mineralov = New methods of technological mineralogy in assessing metal ores and industrial minerals*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2009. P. 78–82. (In Russ.)

Rakov L. T., Dubinchuk V. T., Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S. Mobile mixtures in quartz from the Karelian-Kola Region. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;10:100–118. (In Russ.). doi: 10.17076/geo377

Rakov L. T., Skamnitskaya L. S., Dubinchuk V. T., Ruzhitsky V. V. Technological properties of quartz of the Karelian-Kola region of raw materials. *Rezul'taty mezhdistsiplinarnykh issledovaniy v tekhnologicheskoi mineralogii: Sb. statei po mat-lam dokladov Ros. seminarov po tekhnologicheskoi mineralogii = Results of interdisciplinary research in technological mineralogy: proceedings of the Russian seminar on technological mineralogy*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2017. P. 96–104. (In Russ.)

Rønning J. S., Gautneb H., Larsen B. E., Knežević J., Baranwal V. C., Elvebakk H., Gellein J., Ofstad F., Brønner M. Geophysical and geological investigations of graphite occurrences in Vesterålen and Lofoten, Northern Norway 2017. *NGU report 2018.011. Geological Survey of Norway*. 2018.

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

Safronova G. P. Rock-forming carbonates and apatite of the Tiksheozersky massif. *Novoe v mineralogii Karelo-Kol'skogo regiona = New in the mineralogy of the Karelian-Kola region*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1990. P. 25–39. (In Russ.)

Safronova G. P., Gavrilova M. M. On carbonatites of the Tiksheozersky massif (data of oxygen isotope analysis of carbonatites). *Metallogeniya Karelii = Metallogeny of Karelia*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1982. P. 161–167. (In Russ.)

Samoilov V. S. Geochemistry of carbonatites. Moscow: Nauka; 1984. 191 p. (In Russ.)

Shalimov A. S., Kovalevsky V. V., Obrezkov O. N., Yaroslavtsev A. B. Sorption properties of shungite. *Neorganicheskie materialy = Inorganic Materials*. 2004;40(4):430–434. (In Russ.)

Sharkov E. V., Bogina M. M., Chistyakov A. V., Belyatsky B. V., Antonov A. V., Lepekhina E. N., Shchiptsov V. V. Genesis and age of zircon from alkali and mafic rocks of the Eletozero complex, North Karelia. *Petrology*. 2015;23:259–280. doi: 10.1134/S0869591115030066

Sharkov E. V., Chistyakov A. V., Bogina M. M., Bogatnikov O. A., Shchiptsov V. V., Frolov P. V., Belyatsky B. V. Ultramafic–alkaline–carbonatite complexes as a result of two-stage melting of a mantle plume: evidence from the mid-paleoproterozoic Tiksheozero intrusion, Northern Karelia, Russia. *Doklady Earth Sciences*. 2019;486(2):638–643. (In Russ.). doi: 10.1134/S1028334X19060084

Sharkov E. V., Chistyakov A. V., Bogina M. M., Shchiptsov V. V., Belyatsky B. V., Frolov P. V. Petrology of the Mid-Paleoproterozoic Tiksheozero Ultramafic–Alkaline–Carbonatite Complex (Northern Karelia). *Petrology*. 2021;29(5):475–501.

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

Shchiptsov V. V. Graphite-bearing ore regions of the Fennoscandian Shield. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;2:–49. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1551

Shchiptsov V. V. Industrial minerals of Karelia. *Gornyy zhurnal = Mining Journal*. 2019;3:16–20. (In Russ.). doi: 10.17580/gzh.2019.03.03

Shchiptsov V. V. Magnesian raw materials: history, world potential and resources of Karelia. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 15. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. P. 45–61. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. (ed.). Precambrian industrial minerals of Karelia. Petrozavodsk: Poliprint Ltd; 1993. 84 p.

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

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Frolov P. V. Mineral potential of the Paleoproterozoic Tiksheozersky-Eletozersky Ultramafic–Alkaline–Carbonatite Complex (Northern Karelia, Russia). *Tekhnologicheskaya mineralogiya v otsenke kachestva mineral'nogo syr'ya prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya = Technological mineralogy in assessing the quality of mineral raw materials of natural and technogenic origin*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2023. P. 18–26. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Il'ina V. P., Klimovskaya E. E., Nikiforov A. G., Ruch'ev A. M., Svetova E. N., Frolov P. V. Modern view on the assessment of mineral resource potential of industrial minerals of the Republic of Karelia. *Aktual'nye problemy poiskovoi geologii: Mat-ly nauch.-prakt. konf. = Topical issues of prospecting geology: proceeding of the scientific and practical conf. Moscow: VIMS; 2023. P. 361–372. (In Russ.)*

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Nikiforov A. G., Frolov P. V. Mineralogical and technological features of graphite ores of the Fennoscandian Shield. *Tekhnologicheskaya mineralogiya v otsenke kachestva mineral'nogo syr'ya prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya = Technological mineralogy in assessing the quality of mineral raw materials of natural and technogenic origin*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2022. P. 16–23. (In Russ.). doi: 10.17076/tm14_32

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Svetova E. N., Skamnitskaya L. S. Quartz raw materials of the Karelian-Kola region: main results of the research. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;10:5–25. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1231

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Zaverkin A. S., Nikiforov A. G., Skamnitskaya L. S., Frolov P. V. Kyanite ores of the Khizovaara ore field, Northern Karelia. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;6:75–97. (In Russ.). doi: 10.17076/them1252

Shchiptsov V. V., Burtsev I. N., Zhiron D. V., Voloshin A. V., Mashin D. O. Industrial minerals of North European Russia. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;6:7–35. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1276

Shchiptsov V. V., Danilevskaya L. A., Garanzha A. V., Rodionov V. S. Forecast and mineragenic assessment of quartz content in Karelia. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 4. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. P. 71–78. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Garanzha A. V., Systra Yu. I., Shchiptsova N. I., Kulmala T. K., Borodulin Yu. D., Skamnitskaya L. S., Zakharova I. B., Morozov G. G., Kanenkova E. A., Baibusinov Sh. Sh. Khizovaara kyanite field (northern Karelia). Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1988. 104 p. (In Russ.)

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

Shchiptsov V. V., Nikiforov A. G. Contribution of metasomatic processes to the formation of industrial minerals in Khizovaara ore field, Republic of Karelia, Russia. *16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2016*. Vol. I. Science and technologies in geology, exploration and mining. Sofia; 2016. P. 125–132. doi: 10.5593/SGEM2016/B11/S01.017

Shchiptsov V. V., Rakov L. T., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Mineralogical and technological criteria for assessing the prospects of quartz raw materials of the Karelian-Kola quartz-bearing province. *Geologiya i minerageniya Severo-Vostoka Rossii: Mat-ly XVII Geologicheskogo s'ezda Respubliki Komi = Geology and minerageny of the North-East of Russia: proceedings of the XVII geological congress of the Komi Republic*. Vol. 3. Syktyvkar; 2019. P. 269–272. (In Russ.)

Shchiptsov V., Shekov V. Russian Karelia's industrial mineral potential: new ways of development. *Proceedings of SGEM*. 2020;20:16–25. doi: 10.5593/sgem2020/1.1/s01.035

Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Garanzha A. V., Danilevskaya L. A., Savitsky A. I., Bukchina O. V. Geological and technological characteristics of a large anorthosite occurrence of the Kotozersky area (Karelia). *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia*. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. P. 151–162. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S., Garanzha A. V., Danilevskaya L. A., Rodionov V. S., Astala J., Iwasaki H., Iwasaki F. Assessment of quartz occurrences the

Republic of Karelia and their potential for pure quartz product. *Industrial minerals: deposits & new developments in Fennoscandia: Proceedings of the international conf.* Petrozavodsk; 1999. P. 63–67. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Skamnitckaya L. S., Danilevskaya L. A. (eds.). *Industrial minerals: deposits and new developments in Fennoscandia: Proceedings of the international conf.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. 162 p.

Shchiptsov V. V., Skamnitckaya L. S., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Genetic value and the technological importance of structural not uniformity of submicroscopic level in quartz. *SGEM 2015 Conference Proceedings. STEP 92 Technology Ltd, 1 "Andrey Lyapchev" Blvd, 1797 Sofia Bulgaria.* Book 1, vol. 1. Section Geology. Sofia; 2015. P. 395–402. doi: 10.5593/SGEM2015/B11/S1.050

Shchiptsov V. V., Tson O. V., Zheldakov Yu. A. Distribution of U-Th-Pb and rare metal elements in apatites of Karelia. *Mineralogicheskii zhurnal = Mineralogical Journal.* 1991;13(4):92–98. (In Russ.)

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

Shuldiner V. I., Baltybaev Sh. K., Kozyreva I. V. Tectonic-metamorphic zoning of the Ladoga region. *Vestnik SPBGU = Bulletin of St. Petersburg State University.* 1997;3(7):63–70. (In Russ.)

Skamnitckaya L. S., Biske N. S. Graphite ores of the Ikhali deposit: main natural types and their technological assessment. *Gornyi zhurnal = Mining Journal.* 2019;3(2260):55–60. (In Russ.). doi: 10.17500/gzh2010.03.11

Skamnitckaya L. S., Danilevskaya L. A., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Patent of the Russian Federation No. 2483024.2013. Method for enriching natural quartz raw materials (In Russ.)

Skamnitckaya L. S., Danilevskaya L. A., Shchiptsov V. V., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Patent No. 2525681. 2014. Method for assessing the quality of quartz raw materials (In Russ.)

Skamnitckaya L. S., Rakov L. T., Dubinchuk V. T., Bubnova T. P. Diagnostic method of quartz enrichment. *Razvedka i okhrana nedr = Exploration and Protection of Mineral Resources.* 2018;10:62–66. (In Russ.)

Sokolov V. A. (ed.). *Overburden rocks of the Kostomuksha iron ore deposit and ways of their use in the national economy.* Petrozavodsk: Karelia; 1983. 142 p. (In Russ.)

Sokolov V. A., Kalinin Yu. K., Dyukkiev E. F. (eds.). *Shungites – new carbonaceous raw material.* Petrozavodsk: Karelia; 1984. 184 p. (In Russ.)

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

The Economics of quartz. Roscill Information Services Ltd. London; 1992. 56 p.

Ushkov V. V. Kimozero kimberlite occurrence in the Onega structure. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Useful Minerals of Karelia.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. P. 94–98. (In Russ.)

Ustinov V. N., Zagainyi A. K., Smit K. B., Ushkov V. V., Laz'ko E. E., Luk'yanova L. I., Lobkova L. P. Early Proterozoic diamond-bearing kimberlites of Karelia and features of their formation. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics.* 2009;50(9):963–977. (In Russ.)

Velikoslavinsky D. A. Comparative characteristics of regional metamorphism of moderate and low pressures. Leningrad: Nauka; 1972. 192 p. (In Russ.)

Virta R., Lorenz W., Reguero M. Industrial minerals and rocks. Classification of end uses. *Industrial Minerals.* 1994;319:133–139.

Voitekhovskiy Yu. L. (ed.). Problems of development of kyanite deposits of the Kola Peninsula, Karelia and the Urals. *Mat-ly Vseros. soveshchaniya, posv. 80-letiyu KNTs RAN = Proceedings of the All-Russian meeting dedicated to the 80th anniversary of the Kola Scientific Center of RAS.* Apatity: K&M; 2010. 186 p. (In Russ.)

Weil J. A. A review of the EPR spectroscopy of the point defects in σ -quartz the decade 1982–1992. *Physics and Chemistry of SiO₂ and the Si-SiO interface 2. Plenum Press.* New York; 1993. P. 131–144. doi: 10.5593/SGEM2015/B11/S4.071

Zhuravlev V. A., Klyuchnikova G. N., Korovkin V. A., Rudenko D. G., Turyleva L. V. Subsoil of the North-West of the Russian Federation. St. Petersburg: VSEGEI; 2003. 520 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 24.07.2025; принята к публикации / accepted: 15.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Щипцов Владимир Владимирович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник лаборатории рудообразующих систем и минеральных ресурсов ИГ КарНЦ РАН, профессор ПетрГУ

e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com

Светов Сергей Анатольевич

д-р геол.-мин. наук, директор, руководитель лаборатории литологии и геохимии

e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Shchiptsov, Vladimir

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

Svetov, Sergey

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