

УДК 553.6

ГРАФИТОНОСНЫЕ РУДНЫЕ РАЙОНЫ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

В. В. Щипцов

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

Благодаря высокой электропроводности, поляризуемости и пониженной теплопроводности графит является универсальным материалом для использования в высоких технологиях XXI века (в частности, как ключевой компонент высокоэффективной огнеупорной футеровки для производства стали, анодов с высокой емкостью заряда для литий-ионных батарей, источник графена и т. д.). Этим обусловлены спрос на природный графит в мировой экономике минерального сырья и актуальность месторождений с суперчистым графитом. В статье приводится обзор рудных графитоносных районов Фенноскандинавского щита. Показано, что в Норвегии, Швеции и Финляндии осуществляется комплекс поисково-оценочных и разведочных работ с применением геофизических, преимущественно электроразведочных методов естественных и вызванных поляризацией электрических полей различных модификаций, электрического каротажа с ограниченным привлечением других видов геофизических исследований. Отмечается, что в исследованиях чешуйчатого графита использовались электронная микроскопия SEM, рентгеновская дифрактометрия XRD и рамановская спектроскопия. Месторождения графита Норвегии сосредоточены в четырех провинциях: Senja, Lofoten-Vesterålen, Holandsfjord и Vample. Месторождения Rendalsvik и Jennestad отработаны, рудник Skaland действует. В Швеции выделяется перспективное рудное графитовое поле Woxna, в котором находятся четыре месторождения графита – Kringel, Gropabo, Mattsmyra и Mansberg. Наиболее изучено месторождение Kringel. Woxna Graphite AB, дочерняя компания международной Leading Edge Material Corp, реанимирует развитие проекта «Woxna» на принципах циркулярной экономики с первоочередным вовлечением в эксплуатацию месторождения графита Kringel. Графит распространен в сланцевых толщах Свекофеннской провинции на территории Финляндии. Важным объектом графитового сырья является рудное поле Piirpimäki. Показан эффект использования метода рамановской спектроскопии на примере графитсодержащих сланцев проявлений Rautalampi и Käypsuo в поясе Саво (Центр. Финляндия). Даны сведения о графитовых проявлениях Карело-Кольского региона. Приведены характеристики Ихальского графитоносного поля Ладожской подвижной области и Сальнетундровской графитоносной зоны Кольского п-ова.

Ключевые слова: чешуйчатый графит; Фенноскандинавский щит; критический минерал; рудный район; электромагнитные аномалии; рамановская спектроскопия; литий-ионные батареи; обогатительная фабрика; суперчистый концентрат

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

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР 210 Института геологии КарНЦ РАН (121040600173-1).

V. V. Shchiptsov. GRAPHITE-BEARING ORE AREAS OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD

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

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

The article highlights the demand for natural graphite in the global mineral economy and the relevance of super pure graphite deposits. Due to its high electrical conductivity, polarizability and reduced thermal conductivity, graphite is a versatile material for use in high technologies in the 21st century (a key component of highly efficient refractory lining for steel production, anodes with high charge capacity for lithium-ion batteries, source of graphene, etc.). An overview of the graphite-bearing ore areas of the Fennoscandian Shield is given. It is shown that in Norway, Sweden and Finland the complex of prospecting, evaluation and exploration activities is carried out using geophysical techniques, mainly electric exploration methods of natural and induced polarization electric fields of different modifications, and electric logging, with limited use of other types of geophysical research. It is remarked that SEM electron microscopy, XRD and Raman spectroscopy have been used in studies of flake graphite. Graphite deposits in Norway are concentrated in four provinces: Senja, Lofoten-Vesterålen, Holandsfjord, and Bample. Two are depleted (Rendalsvik mine and Jennestad mine) and one is in operation (Skaland mine). In Sweden, a promising graphite ore field, Woxna, stands out. It contains four graphite deposits – Kringel, Gropabo, Mattsmyra, and Mansberg. The Kringel deposit is one of the best explored sites. Woxna Graphite AB, a subsidiary of the international Leading Edge Material Corp, is reviving the development of the Woxna project on the principles of circular economy, with the Kringel graphite deposit as a priority. Graphite is a common mineral in the shale formations of the Svekofennian province in Finland. The Piippumäki ore field is an important graphite deposit. The effect of Raman spectroscopy on the graphite-bearing Rautalampi and Käypsuo shales in the Savo belt (central Finland) is demonstrated. Information is given on graphite occurrences in the Karelian-Kola region. Characteristics of the Ihala graphite-bearing field of the Ladoga mobile region and the Salnetundra graphite-bearing zone of the Kola Peninsula are reported.

Keywords: flake graphite; Fennoscandian Shield; critical mineral; ore district; electromagnetic anomalies; Raman spectroscopy; lithium-ion batteries; concentrator; super-pure concentrate

For citation: Shchiptsov V. V. Graphite-bearing ore areas of the Fennoscandian Shield. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;2:33–49. doi: 10.17076/geo1551

Funding. The study was financed within research area 210 of the Institute of Geology KarRC RAS (121040600173-1).

Обобщенные сведения о свойствах и минерально-сырьевом потенциале графита

Графит является промышленным минералом с большой экономической доминирующей значимостью за счет высокого спроса на мировом рынке. Поскольку спрос на природный графит в мировой экономике минерального сырья растет, весьма актуальным становится вопрос,

связанный с выявлением перспективных месторождений высококачественного графита. До настоящего времени Китай удерживает пальму первенства как крупнейший производитель природного графита в мире. По данным Benchmark Mineral Intelligence Limited, спрос на чешуйчатый графит составил по направлениям использования: огнеупоры и литейное производство – 52 %, литий-ионные батареи – 27 %, вспененный графит – 8 %, карбюризация

сталей – 4 %, фрикционные изделия – 3 %, смазочные материалы – 2 %, графитовые формы – 2 %, углеродные щетки – 1 %, другое использование 1 %. С 2011 г. Европейский союз включил природный графит в список критически важных сырьевых материалов [European..., 2017].

Графитовый углерод имеет широкий диапазон структур и химических составов. В природе встречаются три морфотипа графита: а) чешуйчатый графит – кристаллические мелкие 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 %. Сингония гексагональная, цвет от стального до черного, блеск металлический, матовый, излом неровный, спайность весьма совершенная, мягкий. Плотность 2,1–2,3 т/м³ (при увеличении в руде зольности увеличивается плотность), твердость по шкале Мооса 1–2, температура плавления 3650 °С и кипения – 5100 °С, превосходный проводник тепла и электричества, кислотоустойчивый, низкий коэффициент абсорбции для рентгеновских лучей и нейтронов, хорошая смачиваемость, удельная магнитная восприимчивость $6,3 \times 10^{-9}$ м³/кг. Графит характеризуется низкими значения-

ми удельного электрического сопротивления ρ ($0,5 \times 10^{-4}$ – 10^{-1} Ом мм²/м), а отдельные разновидности графита заметно различаются по ρ , что обусловлено структурными особенностями, вариациями зольности и содержания углерода [Бареев, Пинягина, 1984; Кирюков, 1985 и др.]. Например, руды чешуйчатого кристаллического графита, полосчатые и вкрапленные, обладают резко выраженной анизотропностью электрического сопротивления.

В целом графиты отражают геологическую обстановку и условия, в которых они формировались. Чешуйчатый графит связан в основном с метаморфическими породами условий высокого давления, где органический углерод, отложенный в осадочных породах, преобразуется в графит под воздействием давления, обычно превышающего 5 кбар, и температуры около 650–700 °С [Keeling, 2017].

Благодаря высокой электропроводности, поляризуемости и пониженной теплопроводности [Beyssac, Rumble, 2014] графит является универсальным материалом для использования в высоких технологиях XXI века (ключевой компонент высокоэффективной огнеупорной футеровки для производства стали, анодов с высокой емкостью заряда для литий-ионных батарей, источник графена и т. д.). На рис. 1 иллюстрируется прогноз спроса на шаровидный графит и природные аноды (в тоннах) на период 2015–2040 гг.

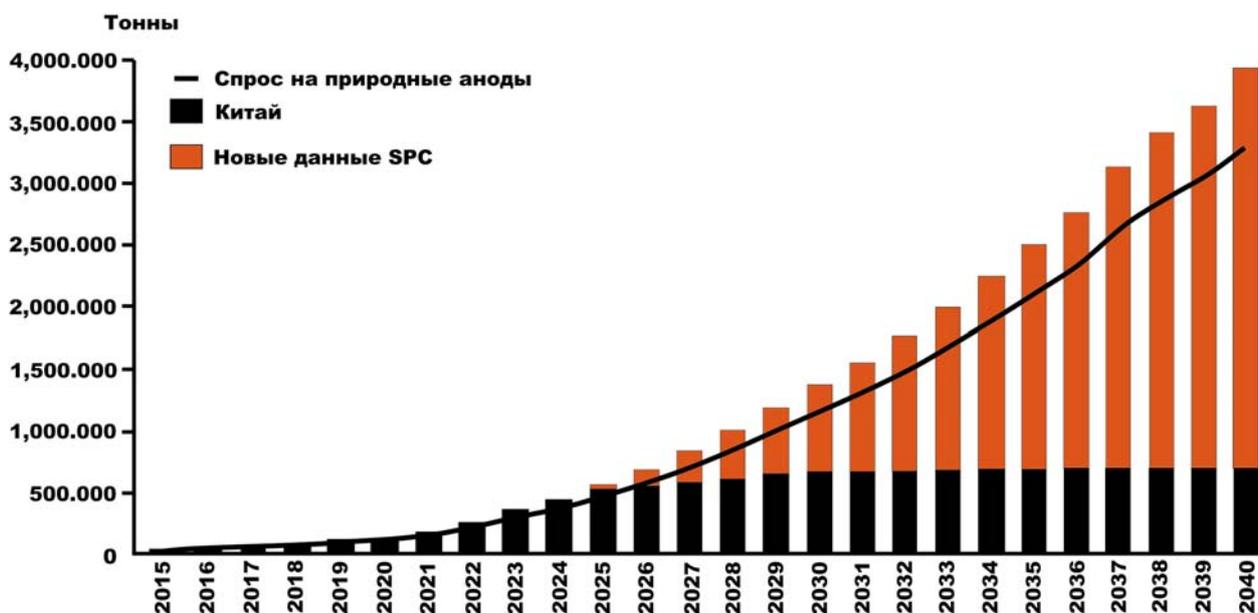


Рис. 1. Прогноз спроса на шаровидный графит (SPC) и природные аноды (т) на период 2015–2040 гг.:

1 – кривая линия прогнозируемого спроса на природные аноды; 2 – выпуск природных анодов в Китае; 3 – прогноз новых SPC (по данным Benchmark Mineral Intelligence Ltd)

Fig. 1. Spherical Production Capacity (SPC) & Natural Anode Demand Forecast (tonnes) for the period 2015–2040: 1 – curved line of predicted demand for natural anodes; 2 – production of natural anodes in China; 3 – new SPC forecast (after Benchmark Mineral Intelligence Ltd)

Наиболее крупными продуцентами являются Китай (около 40–45 % всего производимого в мире графитового концентрата), далее следуют Индия, КНДР, Бразилия, Мексика, Канада, Норвегия, Украина. Преобладающая часть запасов чешуйчатого графита сосредоточена в Китае, на Мадагаскаре, в Зимбабве, Бразилии, Норвегии, Украине, России. Свыше 90 % запасов аморфного графита приходится на Мексику, Китай, Россию и КНДР. Мировое производство синтетического графита осуществляется в ряде промышленно развитых стран: в США, Канаде, Японии.

На Европейском континенте месторождения графита встречаются в докембрийских породах Украинского и Фенноскандинавского щитов. Действующие рудники расположены в Украине, Австрии и Норвегии. По ряду критериев территория Фенноскандинавского щита определяет основную потенциальность ЕС на графит. Кроме того, несколько месторождений аморфного графита обнаружено в фанерозойских породах в Австрии.

Действующее Завальевское месторождение графита является типичным представителем Украинской графитоносной провинции метаморфогенной серии. Мощность продуктивной толщи графитоносных биотит-хлоритовых, полевошпат-гранатовых гнейсов – от 15 до 250 м. Толща состоит из 1–5 графитосодержащих горизонтов мощностью от 3,5 до 70 м. Содержание графита составляет 6–10 %. Графит представлен вкрапленными чешуйками от долей до нескольких мм и отдельными скоплениями в виде агрегатов [Еремин, 2007].

Графитовые месторождения и проявления Фенноскандинавского щита

Метаморфические реакции, в результате которых образуется графит, приводят к высокой электропроводности [Engvik et al., 2020]. В настоящее время в Норвегии, Финляндии и Швеции осуществляется комплекс поисково-оценочных и разведочных работ с применением геофизических, преимущественно электроразведочных, методов естественных и вызванных поляризацией электрических полей различных модификаций, электрического каротажа с ограниченным привлечением других видов геофизических исследований. На рис. 2 показано размещение основных графитоносных районов Фенноскандинавского щита.

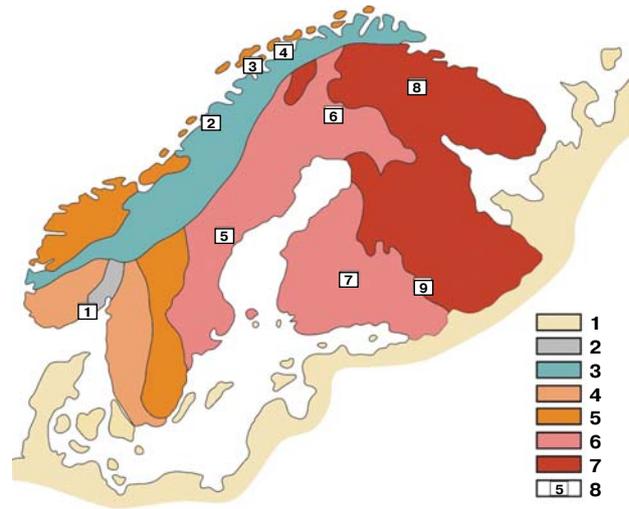


Рис. 2. Размещение графитовых рудных районов на Фенноскандинавском щите:

- 1 – фанерозой, < 550 млн лет; 2 – Осло рифт, 250–300 млн лет; 3 – Скандинавские каледониды, 400–700 млн лет; 4 – Юго-Западная гнейсовая провинция, 900–1700 млн лет; 5 – Трансскандинавский магматический пояс, 1650–1800 млн лет; 6 – Свекофеннская провинция; 7 – Архейские породы; 8 – графитовые рудные районы (1 – Vample; 2 – Holandsfjord; 3 – Lofoten-Vesterålen; 4 – Senja; 5 – Woxna; 6 – Nunasvarra; 7 – Piipumäki; 8 – Сальнотундра; 9 – Ихала

Fig. 2. Location areas with graphite ore (Fennoscandian Shield):

- 1 – Phanerozoic, < 550 Ma; 2 – Oslo rift, 250–300 Ma; 3 – Scandinavian Caledonides, 400–700 Ma; 4 – South-Western gneiss province, 900–1700 Ma; 5 – Transscandinavian igneous belt, 1650–1800 Ma; 6 – Svecofennian province, 1750–1900 Ma; 7 – Archean rocks, 2500–3100 Ma; 8 – graphite ore areas (1 – Vample; 2 – Holandsfjord; 3 – Lofoten-Vesterålen; 4 – Senja; 5 – Woxna; 6 – Nunasvarra; 7 – Piipumäki; 8 – Salmotundra; 9 – Ikhalala)

Норвегия

В Норвегии с давних пор известны графитовые сланцы и графитоносные породы. Первый графитовый рудник существовал на юге страны в период с 1768 по 1775 г. Примерно в 300 м к северо-востоку от восточного конца о. Бьёрносванн находятся остатки первой шахты по добыче графита (Энглидальский карандашный завод) [Gautneb, Wanvik, 2016] в рудном графитовом районе (№ 1 Vample на рис. 2). Сейчас в Норвегии зарегистрированы 75 месторождений и проявлений графитовых руд, два из них отработаны (Rendalsvik и Jennesstad), рудник Skaland действует.

Месторождения графита в Сев. Норвегии сосредоточены в трех провинциях: Senja, Lofoten-Vesterålen и Holandsfjord (№ 4, 3 и 2 на рис. 2). Во всех этих районах в прошлом велась добыча графита, а единственным действующим предприятием сегодня является графитовый рудник Skaland на о. Senja. Графитовая

минерализация залегает в докембрийском фундаменте, состоящем из интенсивно складчатых магматических и метаседиментационных пород (доломитовый мрамор, железистые кварциты, графитовый сланец, кислые и основные метавулканы). Метаморфизм соответствует РТ-параметрам гранулитовой фации, что благоприятствует образованию высококачественного чешуйчатого графита [Engvik et al., 2000; Corfu, 2007; Palosaari et al., 2016].

Геологическая служба Норвегии (NGU) провела электромагнитные измерения с вертолета в районах, где потенциально могут находиться графитовые руды. Там были выявлены многочисленные электромагнитные аномалии как на участках с известной графитовой минерализацией, так и на новых участках. При финансовой поддержке администраций округов Нордланд и Тромс на них проведены наземные геофизические съемки [Rodionov et al., 2013].

Потенциальные графитоносные зоны оценены на основе полученной геофизической и геологической информации по каждому участку. Большая роль в оценке площадей принадлежит детальным геофизическим работам и поисковому бурению. Тоннаж графитовой руды рассчитан с использованием средней плотности графитового гнейса $2,6 \text{ т/м}^3$ и тоннажа графита путем умножения на среднее содержание Cgr в месторождениях и проявлениях [Gautneb et al., 2017; Rønning et al., 2018].

Важность месторождений оценивалась по показателю запасов графита в руде:

- класс А – более 1,0 млн т;
- класс В – от 0,5 до 1,0 млн т;
- класс С – от 0,2 до 0,5 млн т;
- класс D – от 0,1 до 0,2 млн т;
- класс Е – менее 0,1 млн т.

Отдельные графитовые линзы в графитовой провинции Lofoten-Vesterålen кажутся меньше, чем на Senja, но качество графита хорошее [Gautneb, Tveten, 2000]. Графитовая руда может быть обогащена до концентратов, которые не уступают тем, что производятся сегодня на других рудниках в Европе. Предварительные результаты по обогащению графитоносных линзообразных тел провинции Lofoten-Vesterålen показали, что из этой руды методом флотации с двумя стадиями очистки могут быть получены концентраты фракции +150 с содержанием 98,1 % Cgr при извлечении 90 % [Palosaari et al., 2016].

Чешуйчатый графит в породе отмечается в большом диапазоне количественных значений, от < 1 до 40 %. Обычные размеры чешуек составляют 200–300 мкм, максимальный размер – 3200 мкм. Исследования включали вопросы обогащения, направленные на получение высококачественного графитового сырья. Дальнейшая оптимизация обработки может повысить качество концентрата. В табл. 1 указываются для 16 объектов показатели по среднему содержанию углерода в породе, массы графитовой руды и графита в руде [Gautneb, 2017].

Таблица 1. Оценка тоннажа графита

Table 1. Graphite tonnage estimation

Проявление Occurrence	Провинция Province	Среднее % C Average % C	Руда (млн т) (a) Ore (Mt)	Графит (млн т) Graphite (Mt)
Vardfjellet Hesten	Senja	7,95	162,00	12,88
Møklund	Vesterålen	9,04	67,50	6,10
Raudhamaren	Vesterålen	16,52	33,75	5,58
Kvern fjord-Haugnes	Vesterålen	14,4	32,40	4,67
Bukkenmoen	Senja	5,03	81,00	4,07
Skogsøya	Vesterålen	21,14	16,20	3,42
Smies	Vesterålen	9,56	31,05	2,97
Sommarland	Vesterålen	7,74	20,25	1,57
Grunnvåg	Senja	8,86	13,50	1,20
Romsetfjorden	Vesterålen	16,55	6,75	1,12
Grøn jorda	Vesterålen	7,46	13,50	1,01
Nordvænes	Holandsfjord	7,07	8,10	0,57
Morfjord	Vesterålen	18,45	1,62	0,30
Jennestad (b)	Vesterålen	8	3,80	0,30
Skaland (Trælen) (c)	Senja	31	1,8	0,55

Примечание. (a) – на основе оценки ширины и длины минерализованной зоны до 100 м, плотность $2,7 \text{ т/м}^3$; (b) – данные по норвежскому графиту; (c) – официальные данные рудника.

Note. (a) – based on estimation of width and length of mineralized zone down to 100 m, density 2.7 t/m^3 ; (b) – Norwegian graphite data; (c) – official mine data.

Месторождение Trælen (провинция Skaland) – самое богатое в мире, со средним содержанием графита в руде 31 % [Gautneb et al., 2020]. Планы NGU включают дальнейшие работы по изучению новых графитовых местонахождений, которые могут быть обнаружены или по которым отсутствуют важные данные.

Швеция

В Королевстве Швеция графитовые проявления были известны много столетий назад, практически с начала добычи железных руд на севере страны.

К перспективным объектам относится рудное графитовое поле Nunasvaara (на рис. 2 обозначено цифрой 6). Палеопротерозойская зеленокаменная толща в Nunasvaara включает в верхней части стратиформные горизонты черных сланцев, содержащие значительную графитовую минерализацию [Lunch et al., 2018]. Сообщается, что это одно из самых высокосортных месторождений метаморфического графита в мире [Scogings et al., 2015]. В настоящее время LKAB, владелец железорудных шахт в Кируне, Сев. Швеция, обратила внимание на рост рынка графита в связи с добычей графита для производства аккумуляторов. Меморандум между компаниями LKAB, Talga Group Ltd и Mitsui & Co., Ltd. основан на намерении продвигать потенциальную совместную разработку анодного проекта Vittangi Anode Project в Швеции на основе освоения месторождения Nunasvaara через совместное предприятие с целью осуществления маркетинга, продаж и партнерства по всему портфелю продукции Talga для литий-ионных батарей [LKAB..., 2021].

Геологическая служба Швеции провела работы в округе Гевлеборг (Центр. Швеция) в соответствии с региональной программой картирования, направленной на обнаружение

урана с помощью аэrorадиометрических исследований. В 1983 г. попутно были выявлены графитовые проявления. После обнаружения перспективных графитовых проявлений в начале 1980-х годов разведка продолжалась под руководством предшественников SGU, а именно Sveriges Geologiska AB (SGAB) и Nämnden för statens gruvegendom (NSG). Так зародился исторический документ «Графитовый проект «Воксна», который исследовался и разрабатывался различными владельцами. Основным результатом явилось открытие нового рудного графитового поля Woxna площадью 146,71 га (на рис. 2 показано знаком под номером 5), в котором находятся четыре месторождения графита – Kringel (Kringelgruvan), Gropabo, Mattsmyra и Mansberg [Leading..., 2018]. Наиболее изученным объектом считается месторождение Kringel. Графитовые тела залегают в основном в туффитах. На месторождении выявлены 6 рудных залежей. Среднее содержание графита в руде составляет 11,6 % графита. Бурение осуществлялось до глубины 80 метров. Запасы крупночешуйчатого графита 1,6 млн тонн и тонкого и среднечешуйчатого графита 2,9 млн тонн. Предполагается, что оруденение проявляется до глубины 500 метров. В течение 1998 года компания Woxna Graphite AB на этом месторождении увеличила годовой выпуск продукции от 2 500 до 12 000 тонн, но в конце 2001 года была приостановлена добыча в результате падения цен на графит и обогатительная фабрика недалеко от города Эдсбюна закрыта.

В табл. 2 приводятся сведения об оценке месторождений графита Швеции [Halberg, Reginiussen, 2019].

Наиболее достоверная информация о содержании графита, представляющего экономический интерес, поступает от горнодобывающих и геологоразведочных компаний, сообщающих о своих ресурсах и запасах в

Таблица 2. Оценка природной графитовой руды

Table 2. Ore estimates of natural graphite

Месторождение Deposit	Запасы графита Graphite resource	Вид сообщения Reporting std	Тоннаж (млн т) Tonnage (Mt)	Графит (%) Graphite (%)
Kringel	выявленные / indicated	NI43-101	1,86	10,63
Kringel	измеренные / measured	NI43-101	0,99	10,68
Gropabo	предполагаемые / inferred	NI43-101	0,70	8,65
Gropabo	выявленные / indicated	NI43-101	1,50	8,83
Mattsmyra	предполагаемые / inferred	NI43-101	1,18	8,35
Mattsmyra	выявленные / indicated	NI43-101	3,43	8,37
Månsberg	предполагаемые / inferred	исторический historic	1,35	9,44
Nunasvaara	предполагаемые / inferred	JORC-код JORC-code	1,60	23,9
Nunasvaara	выявленные / indicated	JORC-код JORC-code	10,70	25,7

соответствии с принятыми международными стандартами отчетности (кодекс JORC, NI 43–101). Один объект в табл. 2 относится к периоду до появления международных систем [Halberg, Reginiussen, 2019]. Он требует дополнительных разведочных работ, чтобы быть классифицированным в соответствии с современными стандартами.

В настоящее время Woxna Graphite AB, дочерняя компания международной Leading Edge Material Corp (LEM), реанимирует развитие проекта «Woxna» на принципах циркулярной экономики. Во-первых, проведены укрупненные лабораторные испытания по переработке графитовых руд по отобраным пробам на месторождении Kringel. Технологические испытания включали флотацию графита с замкнутым циклом, обезвоживание, обогащение флотационных концентратов путем сферонизации. Далее получены результаты по гидрометаллургической и пирометаллургической обработке [Stinton et al., 2021]. Проектом предусматривается, что срок службы обогатительной фабрики составит 19 лет, при этом в первые годы на обогатительную фабрику Woxna минеральное сырье будет поставляться из запасов складированной руды ранней добычи. Плановое среднее содержание графита в руде составит 9,2 %. К плановым показателям относятся следующие данные: производство концентрата на обогатительной фабрике 15 692 т/год при извлечении 93,8 %. Выход очищенного шаровидного графита (термическое производство) при извлечении частиц с размером d50 15 мкм составит 629 т/год. Температура термической обработки очищенного шаровидного графита марки 2 600°. Производство микронизированного (струйный помол) графита с размером частиц d50 4 мкм планируется в объеме 7479 т/год [Stinton et al., 2021].

Продукт пройдет несколько этапов обогащения: микронизацию для проклейки, сферонизацию для получения «скрученных» чешуек графита с последующей термической очисткой; покрытие очищенных сферонизированных чешуек дополнительным углеродом для получения графита, подходящего для использования в анодах аккумуляторов.

Предлагаемые изменения на действующей обогатительной фабрике Woxna должны обеспечить требуемую производительность и ввод новых технологических линий. В схему измельчения графита включается стержневая мельница, склад дробленого материала и классификатор стержневой мельницы. Флотационная схема основана на последних испытаниях, проведенных компанией BGRIMM.

Схемы обезвоживания и упаковки в мешки остаются прежними; добавлены обезвоживающие циклоны во флотационном контуре для повышения плотности суспензии и сепаратор для очистки перелива циклонов. Исключены классификационные грохоты для сухого графита. VAP спроектирован с включением измельчения и сферонизации графитового флотационного концентрата с последующей термической очисткой. Мелкие частицы после сферонизации снова измельчаются для получения сверхтонкого графита [Stinton et al., 2021]. Упрощенная блоковая диаграмма процессов, планируемая на обогатительной фабрике Woxna, дана на рис. 3 [Stinton et al., 2021].

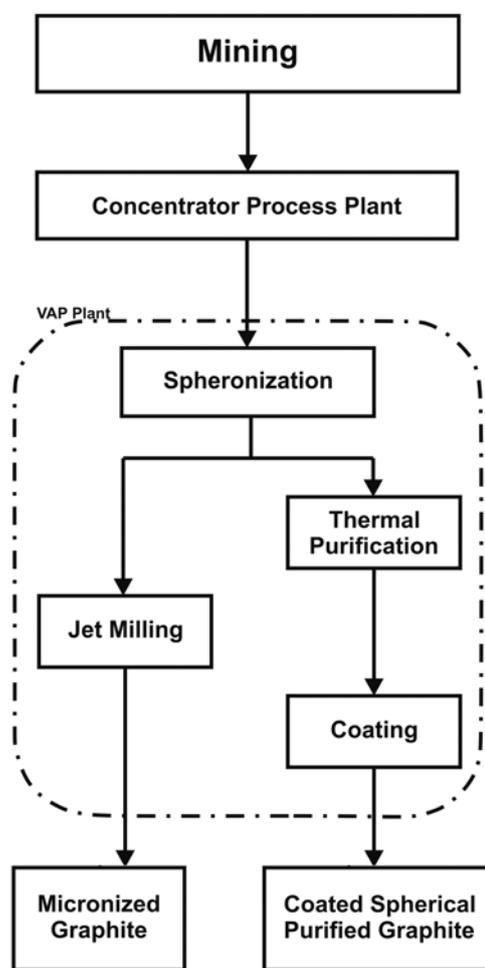


Рис. 3. Упрощенная блоковая диаграмма процессов: Mining – добыча, Concentrator Process Plant – обогатительная фабрика, Value-add Production (VAP) Plant – производство добавленной стоимости (VAP) фабрики, Spheronization – сферонизатор, Jet Milling – струйная мельница, Micronized Graphite – микронизированный графит, Thermal Purification – термическая очистка, Coating – оболочковое покрытие, Coated Spherical Purified Graphite – покрытый сферический очищенный графит

Fig. 3. Simplified Process Block Diagram

Графитовый проект «Woxna» содержит в себе перспективный план освоения четырех месторождений графита (Kringel, Gropabo, Mattsmyra и Mansberg). Пока только графиты месторождения Kringel включены в проект как эксплуатационный объект.

Финляндия

В период с 1760 по 1947 г. эксплуатировалось около 30 месторождений графита. 20 из них расположены у современных границ Финляндии. Общая суммарная добыча здесь составляла около 14 000 т. Сведения об этом периоде изложены в статьях К. О. Н. Frauenfelder, А. Laitakari, О. Sarapää, Е. Aurola [Mineral..., 2015]. Графит является распространенным минералом в сланцевых толщах Свекофеннской провинции на территории Финляндии. Потенциал новых месторождений оценивается как благоприятный.

Одним из важных участков на графитовое сырье является рудное поле Piirpimäki, названное автором по одноименному месторождению (рис. 2), включающее месторождения Piirpimäki, Kärpälä, Viistola, Нарамäki. Крупное месторождение Kärpälä разрабатывалось до 1947 г. в промышленных целях [Nurmela, 1989; Puustinen, 2003].

Месторождение чешуйчатого графита в Piirpimäki было обнаружено во время полевых работ с использованием электромагнитного метода измерений с помощью прибора Slingram. Несколько горнодобывающих компаний исследовали находки чешуйчатого графита в рудном поле Piirpimäki. Размер аномалии составляет приблизительно 0,1–1 км. Чешуйчатый графит до 1 мм связан своим образованием с кварц-полевошпатовыми гнейсами и амфиболитами и встречается в графитоносных слоях в гнейсах, в амфиболитах в незначительной степени в виде небольших вкраплений. Среднее содержание общей серы составляет 0,33 %, общего углерода – 6,49 %, а среднее содержание графитированного углерода (Cg) – 6,41 %. Для анализа чешуйчатого графита использовались электронная микроскопия SEM, рентгеновская дифрактометрия XRD и рамановская спектроскопия, которые показали, что графит практически без дефектов, высокого качества и не был затронут ретроградным метаморфизмом. Пиковая метаморфическая температура 737 °С была определена с помощью рамановского термометра, при этом температуры зеленосланцевой фации не зафиксированы [Palosaari et al., 2020].

При изучении месторождений графитовых руд большое внимание уделено метаморфическому фактору. Так, например, месторождение Piirpimäki идеально подходит для изучения графита, поскольку он находится в коренных выходах. Региональный метаморфизм происходил в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций в интервале 1,88–1,79 Ga [Arkimaa et al., 2000; Hölttä, Neilimo, 2017; Palosaari et al., 2020].

В Финляндии широким фронтом проводятся исследования по проекту «Аккумуляторные минералы» (2019–2022), в рамках которого выполнена оценка минерального потенциала с акцентом на чешуйчатый графит, кобальт и литий. По результатам проекта можно судить, что перспективной на графит определяется площадь в поясе сланцев Саво в Центральной Финляндии. Здесь выявлено значительное содержание графитовой минерализации в слюдяных сланцах и полевошпатовых биотитовых гнейсах [Al-Ani et al., 2018, 2020]. Минералогические исследования показали, что наиболее распространенной морфологией графита в сланцах проявлений Rautalampi и Käypsuu является чешуйчатая разновидность графита. Размер графитовых чешуек варьирует от 50 до 1600 мкм, при этом длина большинства из них составляет от 200 до 500 мкм. Соотношение между длинной и короткой осями большинства чешуек находилось в диапазоне от 2 до 5. Среднее содержание графита составляло 12,5 % углерода при общем содержании серы < 3,0 %. Результаты флотации показали, что графитовый концентрат содержит некоторые минеральные примеси, что затрудняет его очистку с использованием стандартного метода флотации. Кварц и сульфиды относятся к главным минералам-примесям в исследуемой графитовой руде. Для получения графита высокой чистоты из мелкозернистого графитового концентрата использовались технологии щелочного обжига и кислотного выщелачивания. Таким образом, качество графита в рудах Rautalampi и Käypsuu (Центр. Финляндия) может быть увеличено до графита сверхвысокой чистоты (99,95 %) в результате измельчения до очень маленького размера частиц, < 30 мкм, что соответствует требованиям для производства литий-ионных батарей.

Большой эффект был достигнут за счет использования метода рамановской спектроскопии. Этот метод является быстрым и неразрушающим. Благодаря методу структурного исследования углеродных наноматериалов можно определить дефекты упорядоченной структуры графена. Отношение интенсивности

D-полосы к G-полосе (ID/IG) принято считать показателем дефектной (неупорядоченной) структуры углерода [Beysac et al., 2002; Ferrari et al., 2006]. Рамановский спектр (возбуждение лазером 633 нм) графита показывает наличие D1-полосы (мода беспорядка) при 1337 см^{-1} и небольшой полосы плеча D2 при 1620 см^{-1} , связанной с беспорядком в краевых углеродах (рис. 4). G-полоса при 1580 см^{-1} является дважды вырожденной фононной модой (E_{2g} симметрия), связанной с упорядоченными в плоскости Sp^2 атомами углерода. Рамановские измерения исследуемых образцов показали небольшое смещение всех полос (D-полосы при 1350 см^{-1} и D2-полосы при 1620 см^{-1} , G-полосы при 1581 см^{-1}).

С использованием рамановской спектроскопии, как указано выше, получены данные по степени кристалличности и пиковой метаморфической температуры графита на

исследованных образцах месторождения Piirpimäki. Лазерные рамановские измерения графита были проведены компанией GTK-Mintec с использованием стандартных тонких срезов и полированных срезов отдельных графитовых чешуек из рудных толщ. Использовались геотермометры Рамана с калибровкой [Beysac et al., 2002; Rahl et al., 2005] для получения оценок метаморфических температур. Согласно этим калибровкам, температура образования упорядоченных графитовых чешуек в Rautalampi и Käyrsuo варьировала в пределах $470\text{--}600\text{ °C}$, по сравнению с $400\text{--}440\text{ °C}$ для неупорядоченного графита [Al-Ani et al., 2020]. Соответственно, графиты из проявления Rautalampi и Käyrsuo могли образоваться в результате трансформации органического вещества во время метаморфизма, скорее всего, без осаждения из углеродсодержащих флюидов.

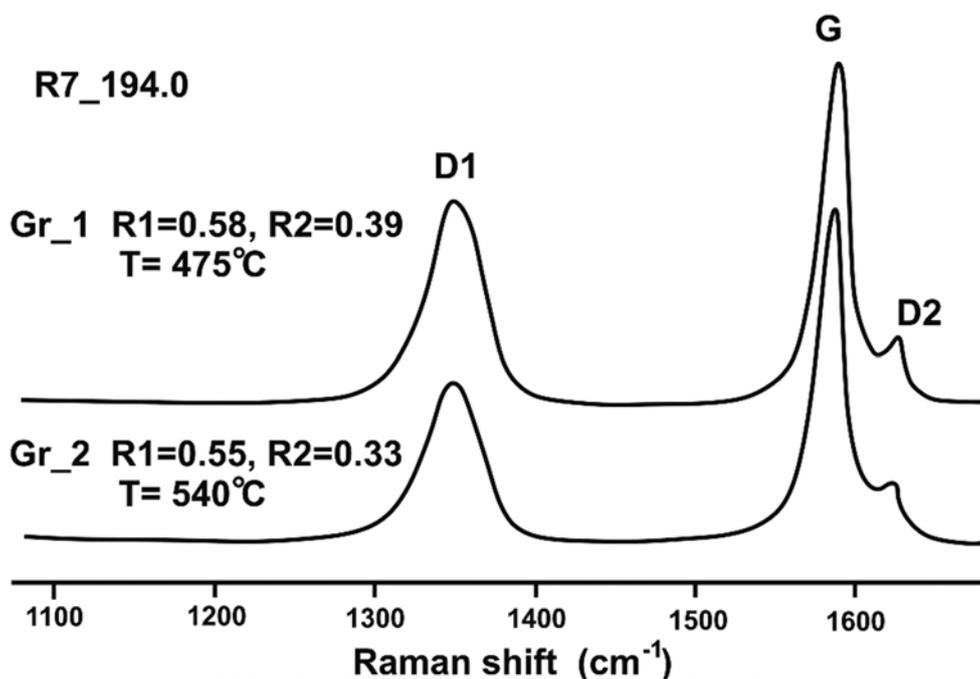


Рис. 4. Рамановские спектры графитовых руд Rautalampi и Käyrsuo (Центр. Финляндия) (пример):

Raman shift (cm^{-1}) – Рамановский сдвиг (cm^{-1})

Fig. 4. Raman spectra of Rautalampi and Käyrsuo graphite ores (Central Finland) (example)

Промышленный графит – относительно дорогой промышленный минерал. Для получения концентрата природного графита высокого качества необходимо обогащение, чтобы получить оптимальные цены на готовую продукцию. Чешуйчатый графит легко очищается флотацией благодаря его высокой природной гидрофобности. Среднее содержание исходных образцов для флотационных

процессов Лаборатории GTK-Mintec составляло 12,5 % С. Обогащение с использованием многоступенчатого измельчения и флотационных процессов повысило содержание графита с 55 до 90 % фиксированного углерода (FC), с диапазоном извлечения от 67 до 83 %. Результаты флотации показали, что графитовый концентрат все еще содержит некоторые минеральные примеси, и это затрудняет его

очистку с использованием только типичного метода флотации. Кварц и сульфиды составляли большинство минералов-примесей в исследованной графитовой руде. Для получения графита высокой чистоты из мелкозернистого графитового концентрата использовались процессы щелочного обжига и кислотного выщелачивания. Результаты показали, что содержание графита в рудах Rautalampi и Käyräsuo может быть увеличено до графита сверхвысокой чистоты (99,95 % FC) при измельчении до очень маленького размера частиц, < 30 мкм, что соответствует требованиям для производства литий-ионных батарей. Кроме того, продукт из графита высокой чистоты был протестирован в Консорциуме Университета Коккола, входящего в состав Университета Оулу.

Карело-Кольский регион (Россия)

Мелкие проявления кристаллического графита в Приладожье известны с давних пор. В 1787 г. Самуил Алопеус на берегах Ладожского озера встретил обломки «карандаша» – графита. Для истории горного промысла интерес представляет проявление графита Кимамяки, расположенное в 13 км от г. Сортавала. В отдельные годы в Кимамяки добывали до 20–30 т (всего 450 т) графитсодержащих сланцев, которые золотых дел мастера охотно покупали в Санкт-Петербурге для изготовления плавленых горшков, фабриканты – для покрытия кровельного толя, а также финляндские заводчики – для производства огнестойкого кирпича. Графитовые каменоломни были также сосредоточены в окрестностях г. Сортавала и Питкяранта. В 1830-х началась добыча графитсодержащих сланцев на о. Пусунсаари. 188 т графитовой породы пошло на изготовление огнестойких тиглей на Питкярантских заводах. Добыча графита 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 [Борисов, 2009].

В последующие годы графитовые проявления обнаружены в Ладожской подвижной зоне и Северо-Карельской структуре. При этом в первой открыто более 30 проявлений различных типов графита. Но все они имеют небольшие размеры [Леонтьев и др., 2006]. Отмечены различные типы графита – крипто- и плотнокристаллический, мелко- и крупночешуйчатый [Бискэ, 1987].

Геологическое строение Северного Приладожья благодаря пространственной неоднородности характеризуется двумя обособленными доменами – Северным и Южным, эволюция которых существенно различна в палеопротерозое. Сочленение доменов произошло по тектоническому шву, названному зоной Мейрского надвига [Балтыбаев и др., 1996]. Она протягивается в субширотном направлении и играет важную роль в распределении комплексов по метаморфизму.

В Западном Приладожье открыты графитовые руды метаморфогенного типа (Ихальское рудное поле, рис. 2). Метаморфогенные месторождения графита имеют основное значение в мировом балансе графитового сырья. Ихальское рудное поле включает Ихальское месторождение (Ихала III) и несколько проявлений легкообогатимых руд с чешуйчатым графитом (Ихальское I, Ихальское II, Ихальское IV, Ихальское V, Ихальское VI, Терваярвинское, Ликолампинское и Кайвомякское), слагающих стратиформную графитовую формацию в гнейсах [Ладожская..., 2020].

Ихала III (рис. 5) открыто в 1971 г. геологами Карельской комплексной геологоразведочной экспедиции. На этом основании проведены поисковые и поисково-оценочные работы на графит в 1983–1986 и 1989–1993 гг. С 2005 по 2019 г. с длительными перерывами продолжались работы по разведке месторождения и подготовке ТЭО постоянных разведочных кондиций, но по разным причинам остались незавершенными.

Установлен графитовый горизонт с несколькими графитоносными пачками мощностью от 8 до 350 м при длине до 1500 м.

По структурно-текстурным особенностям среди графитсодержащих биотитовых гнейсов выделены две разновидности:

1) однородные мелкозернистые графитсодержащие гнейсы с тонкими, редкими, согласными (реже секущими) кварцевыми и кварц-полевошпатовыми прожилками и выделениями;

2) полосчатые, линзовидно-полосчатые, пятнисто-полосчатые среднезернистые графитсодержащие гнейсы, с прожилками и линзами кварц-полевошпатового состава и порфиробластическими выделениями микроклина. Структурные разновидности графитоносных гнейсов связаны взаимными переходами и обычно перемежаются друг с другом [Бискэ, Скамницкая, 1981, 1990].

Региональный метаморфизм пород отвечает условиям высокотемпературной амфиболитовой фации силлиманит-альмандин-калиево-

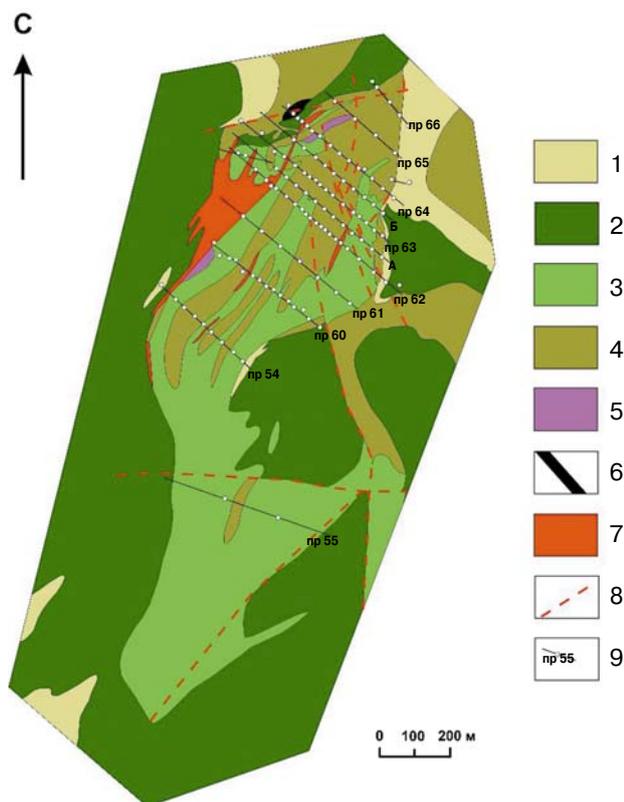


Рис. 5. Схематическая геологическая карта Ихальского месторождения графитов (участок III). Сост. В. В. Щипцов [Ладожская..., 2020] с использованием материалов К. И. Степанова [Карельская..., 1995].

Условные обозначения: 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 чем 7 %; 7 – микроклиновые и плагио-микроклиновые граниты; 8 – предполагаемые тектонические нарушения; 9 – скважины и линии профилей

Fig. 5. Schematic geological map of the Ikhala graphite deposit (section III). Compiled by V. V. Shchiptsov [Ladogskaya..., 2020] using materials of K. I. Stepanov [Karelian..., 1995].

Legend: 1 – garnet-biotite schists, biotite and pyroxene gneisses and migmatites; 2 – amphibolite; 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

полевошпатовой субфации, местами гранулитовой фации.

Локальный метаморфизм пород Ихальского рудного поля связан с особенностями Южного домена, рассматриваемыми в серии работ сотрудников ИГГД РАН [Великославинский, 1972; Шульдинер и др., 1997; Балтыбаев, 2002]. Метаморфические комплексы данной

территории относятся к зоне с преобладанием первичных метapelитов.

Для Южного домена, в котором размещено Ихальское рудное поле, гиперстеневая зона пиковой стадии соответствует условиям $T\ 800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P\ 5\text{--}6\text{ кбар}$, что определяет параметры гранулитовой фации. В дальнейшем условия метаморфизма смещаются в область амфиболитовой фации, что приводит к новообразованным минеральным парагенезисам, флюидным включениям в поздних жильных телах, определяемых диапазоном их формирования от $600\text{--}660$ до $450\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении примерно 4 кбар, в наиболее поздних жилах около 3–3,5 кбар, отмеченных в работах сотрудников ИГГД [Балтыбаев и др., 2000, 2009; Глебовицкий и др., 2001 и др.].

Углеродистое вещество первично-осадочных и вулканогенно-осадочных пород претерпело длительную эволюцию, выражающуюся в потере летучих компонентов, повышении содержания углерода, графитизации, очищении от примесей, укрупнении частиц и изменении их морфологии. С периодом регрессивного метаморфизма и этапами тектономагматической активизации связано формирование эпигенетического графитового оруденения [Бискэ, Скамницкая, 1981; Бискэ, 1987].

На стадии поисково-оценочных работ проведена оценка обогатимости руд основной площади Ихальского объекта (Ихала III). Испытания выполняли «Уралмеханобр», ВНИИнеруд и ИГ КарНЦ РАН [Бискэ, 1987].

Укрупненные испытания, проведенные во ВНИИнеруде, позволили рекомендовать для участка Ихала измельчение пород перед флотацией до 30–40 %, класса 0,07 мм, и основную флотацию с четырьмя перемешками, включая доизмельчение на первом этапе перемешки.

На участке Ихальского месторождения оценены запасы C_2 и прогнозные ресурсы P_1 . 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 % [Коровкин и др., 2003].

В западной части Кольского п-ова в Сальнотундровской зоне в пределах контуров крупных электропроводящих аномалий выявлены три рудопроявления богатых средне- и крупночешуйчатых графитовых руд [Балабошин и др., 1979; Ивлиев и др., 1982; Пожиленко и др., 2002; Гавриленко, 2004] (рис. 2). В геологическом отношении они принадлежат к печенгско-варзугскому комплексу. В районе р. Явр

установлены рутил-кианит-графитовые гранатиты с содержанием углерода от 27 до 34 %, с минимальной зольностью концентратов от 1,09 до 1,60 %.

Богатые руды крупночешуйчатого графита обнаружены на г. Скалистой в 500-метровой толще биотитовых плагиогнейсов с содержанием углерода от 8 до 13,6 %. Богатые залежи представлены пластообразными телами мощностью от 2 до 6 м. Породы простираются в северо-западном и субширотном направлениях на десятки километров в пределах контуров электропроводящих зон. Главные породообразующие минералы биотитовых гнейсов – плагиоклаз (30–40 %), кварц (25–35 %), биотит (18–35 %), гранат (2–8 %) [Ивлиев и др., 1982].

В этой же зоне в результате поисковых работ, проведенных ОАО «Центрально-Кольская экспедиция» в 2006–2010 гг., выявлен перспективный объект на графит Пестпакша [Лузин и др., 2010] (рис. 6). Установлены три графитовых участка с двумя типами – метасоматические породы комплекса габбро-анортозитов и коры выветривания. Выделены четыре типа графитовых руд: 1) графитсодержащие и графитистые коры выветривания с содержанием графита 5–14 %; 2) графитсодержащие метасоматиты с сульфидами с содержанием графита 3–7 %; 3) графитоносные метасоматиты с содержанием графита 1–4 %; 4) графитсодержащие гранат-амфиболовые сланцы с сульфидами с содержанием графита 2–6 %.

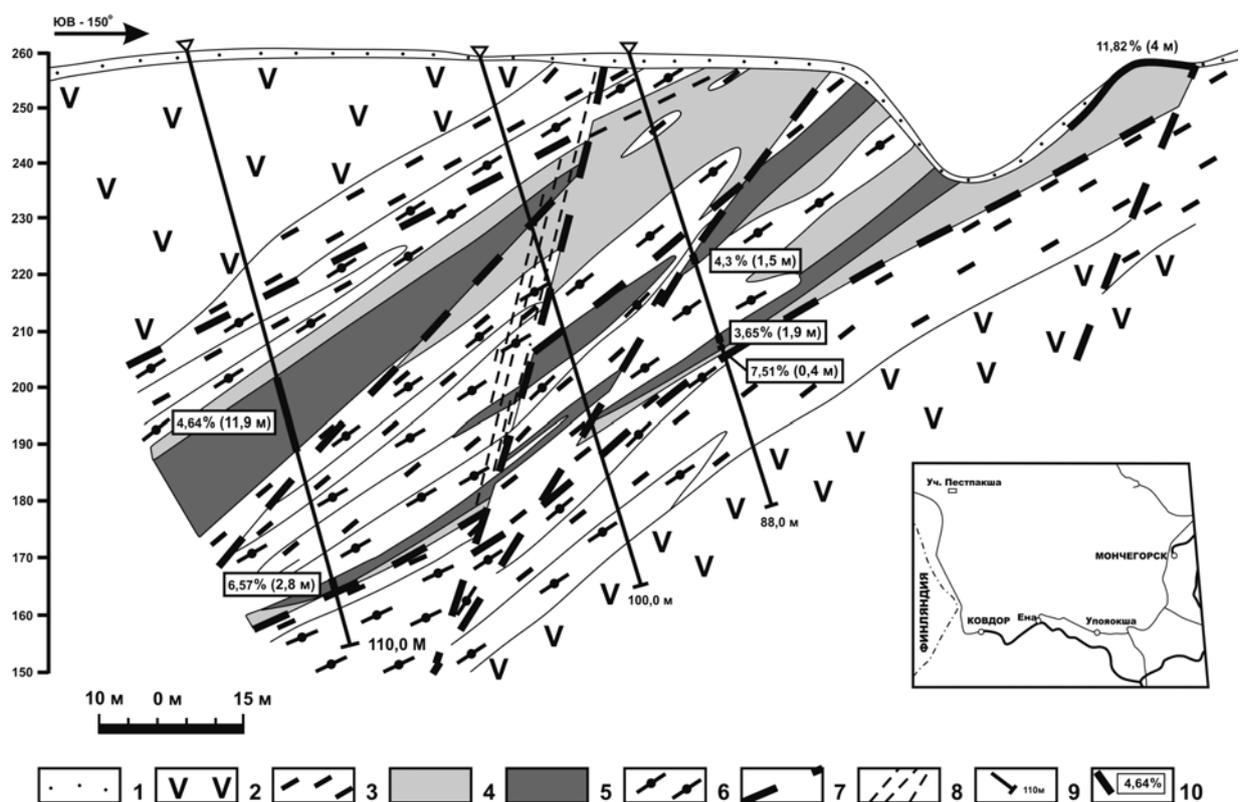


Рис. 6. Геологический разрез главной рудной зоны проявления Пестпакша (с использованием материалов ОАО «Центрально-Кольская экспедиция»):

1 – четвертичные отложения. Якрозерский комплекс 2 – метагаббро-анортозиты; 3 – гранат-амфиболовые, гранат-пироксен-амфиболовые сланцы; 4 – метасоматиты кианит-кварц-гранатовые, гранат-кварцевые, гранатиты с содержанием графита до 1–2 %; 5 – графитсодержащие метасоматиты от 2 до 15 %, в т. ч. гранат-амфибол-графит-сульфидные руды (графита до 35 %). Сальнотундровский метаморфический комплекс 6 – амфиболиты с гранатом и без граната; 7 – разрывные нарушения; 8 – зоны интенсивной трещиноватости, катаклаза и дробления; 9 – поисковые скважины и их глубина; 10 – места отбора проб, средневзвешенное содержание графита (суммарная мощность опробования пород)

Fig. 6. Geological section of the main ore zone of the Pestpaksha occurrence (using materials from JSC Central Kola Expedition):

1 – Quaternary deposits. Yakrozersky complex 2 – metagabbro-anorthosite; 3 – garnet-amphibole, garnet-pyroxene-amphibole schists; 4 – metasomatites kyanite-quartz-garnet, garnet-quartz, garnetites with graphite content to 1–2 %; 5 – graphite metasomatites from 2 to 15 %, including garnet-amphibole-graphite-sulfide ores (up to 35 % of graphite). Salnotundra metamorphic complex 6 – amphibolites with and without garnet; 7 – fractures; 8 – zones of intense fracturing, cataclasis and crushing; 9 – exploration wells and their depths; 10 – sampling sites, weighted average graphite contents (total thickness of sampling)

Лабораторно-технологические исследования проводились в лабораториях ФГУП «ЦНИИГеолнеруд». Основные показатели по четырем технологическим пробам: 50 % чешуйчатого графита имеют размер 0,05–0,1 мм, максимальный размер агрегатов 10×6×3 мм, среднее содержание графита 5,4 %, метод обогащения – флотация, выход концентрата с содержанием графитового углерода 91,6 % при извлечении 60,92 %.

Заключение

Таким образом, в настоящее время графит вызывает повышенный интерес в связи с резкой динамикой спроса на промышленные концентраты графита. В этом отношении месторождения и проявления чешуйчатого графита Фенноскандинавского щита переживают второе рождение за счет важной потенциальной базы, внимание к которой стало актуальным на примере динамики развития и оценки в Норвегии, Финляндии и Швеции. Учитывая потребность в суперчистом чешуйчатом графите, оценка графита связана прямым образом с приложением к исследованиям современных аналитических методов. На основе принципов народнохозяйственной значимости и аналогии нельзя сбрасывать со счетов минерально-сырьевой потенциал восточной части Фенноскандинавского щита (Карело-Кольский регион).

Литература

Балабошин Н. Г., Кривовичев В. Г., Аведисян А. А. Углеродистое вещество в кристаллических сланцах северо-запада Кольского п-ова // Минералы метаморфических пород Кольского п-ова. Апатиты: Кольский фил. АН СССР, 1979. С. 81–94.

Балтыбаев Ш. К. Флюидные включения и РТ-режим формирования лейкосом мигматитов натрового ряда в гранулитовой части Приладожья (Ю. Карелия) // Зап. ВМО. 2002. Ч. 131, № 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.: Изд-во СПбГУ, 2000. 200 с.

Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В., Шульдинер В. И. Мейерский сдвиг – главный элемент строения сутуры на границе Карельского кратона и свекофеннского комплекса в Приладожье, Балтийский щит // ДАН. 1996. Т. 348, № 3. С. 353–356.

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

Бареев И. А., Пинягина Л. В. Графит // Геофизические методы поисков и разведки неметаллических полезных ископаемых. М.: Недра, 1984. С. 88–93.

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

Бискэ Н. С., Скамницкая Л. С. Метаморфические критерии прогнозирования графитовых руд // Проблемы прогнозирования поисков и разведки месторождений нерудных полезных ископаемых. М.: Наука, 1981. С. 142–143.

Бискэ Н. С., Скамницкая Л. С. Графитовые руды Карелии и перспективы их промышленного использования // Комплексное освоение минеральных ресурсов Севера и Северо-Запада СССР (европейская часть): Мат-лы всесоюзного совещания. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1990. С. 127–130.

Борисов И. В. История горного дела Сев. Приладожья. XVII в. – 1939 г. Сортавала, 2009. URL: http://ladoga-online.ru/portal/libr/book_08.html (дата обращения: 20.01.2022).

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

Гавриленко Б. В. Кладовые недр Кольского края. Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2004. 92 с.

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.

Еремин Н. И. Неметаллические полезные ископаемые. М.: МГУ, 2007. 459 с.

Ивлиев А. И., Гершенкоп А. Ш., Романюха А. М., Хавин В. Я. Графитовые руды г. Скалистой // Геология неметаллических полезных ископаемых Кольского п-ова. Апатиты: Кольский фил. АН СССР, 1982. С. 57–69.

Кирюков В. В. Графит // Промышленные типы месторождений неметаллических полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. С. 42.

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

Леонтьев А. Г., Михайлов В. П., Бискэ Н. С. Графит // Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. Петрозаводск: Карелия, 2006. С. 40–47.

Лузин В. П., Вафин Р. Ф., Пермьяков Е. Н., Кузнецов О. Б., Лузина Л. П., Губайдуллина А. М., Кузнецова В. Г., Ахиярова А. В. Комплексные минералого-технологические исследования графитовых руд месторождения Чебере в Республике Саха (Якутия) // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 91–100.

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

Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 359 с.

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

Al-Ani T., Leinonen S., Ahtola T., Salvador D. High-grade flake graphite deposits in metamorphic schist belt, Central Finland-mineralogy and beneficiation of graphite for lithium-ion battery applications // Minerals. 2020. Vol. 10(8). Art. 680. doi: 10.3390/min10080680

Al-Ani T., Ahtola T., Kuusela J. Prospecting and exploration of flake graphite occurrences in Central and Southern Finland // GTK research Report 24. 2018. 28 p.

Arkimaa H., Hyvönen E., Lerssi J., Loukola-Ruskeeniemi K., Vanne J. Suomen Mustaliuskeet aeromagneettisella kartalla – Proterozoic black shale formations and aeromagnetic anomalies in Finland 1:1000 000. Geological Survey of Finland. 2000.

Beysac 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

Beysac O., Chopin C., Rouzaud J.-N. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: A new geothermometer // Journal of Metamorphic Geology. 2002. Vol. 20(9). P. 859–871. doi: 10.1046/j.1525-1314.2002.00408.x

Corfu F. Multistage metamorphic evolution and nature of the amphibolites-granulite facies transition in Lofoten-Vesterålen, Norway, revealed by U-Pb in accessory minerals // Chemical Geology. 2007. Vol. 241. P. 108–128. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.01.028

Engvik A. K., Davidsen B., Coint N., Lutro O., Tveten E., Schiellerup H. High-grade metamorphism of the Archean to Palaeoproterozoic gneiss complex in Vesterålen, North Norway // 32nd Geological Winter Meeting Helsinki, Bulletin of the Geological Society of Finland, special issue. 2000. P. 153–154.

Engvik A. K., Gautneb H., Knežević Solberg J., Rønning J. S., Austrheim H. High-grade formation of graphite in Vesterålen, northern Norway, and its consequences for petrophysical properties of the lower continental crust // NGF Abstracts and Proceedings of 34th Nordic Geological Winter Meeting. 2020. No. 1. 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.

Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., Novoselov K. S., Roth S., Geim A. K. Raman spectrum of graphene and graphene layers // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97. Art. 187401. doi: 10.1103/PhysRevLett.97.187401

Gautneb H. Graphite deposits in Northern Norway; A review and latest exploration results // Conference paper, May 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/317545564> (дата обращения: 20.01.2022).

Gautneb H., Gloaguen E., Törmänen T. Lithium, cobalt and graphite occurrences in Europe // Results

from GeoEra FRAME project wp 5, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7025. doi: 10.5194/egusphere-egu2020-7025, 2020

Gautneb H., Knezevic J., Johannesen N. E., Wanvik J. E., Engvik A., Davidsen B., Rønning J. S. Geological and ore dressing investigations of graphite occurrences in Bø, Sortland, Hadsel and Øksnes municipalities, Vesterålen, Nordland County, Northern Norway 2015–2016 // NGU Report 2017.015

Gautneb H., Wanvik J. E. The graphite schists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway // Report NGU. 2016. No. 10.

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

Halberg A., Reginiussen H. Mapping of innovation-critical metals and minerals // SGU report 2019:20. Uppsala, 2019.

Hölttä P., Heilimo E. Metamorphic map of Finland in bedrock of Finland at the scale 1:1 000 000 – major stratigraphic units, metamorphism and tectonic evolution // Nironen M. (ed). Geological Survey of Finland, Special Paper. 2017. P. 6075–6126.

Keeling J. Graphite: properties, uses and South Australian resources // MESA J. 2017. Vol. 84. 41 p.

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

LKAB and Mitsui Extend Talga LOI for Swedish Graphite Anode Project // ASX Release 28 June 2021. URL: <https://www.talgagroup.com/irm/PDF/0371d89b-d2b1-4be8-b58b-9dbfa40e5a6e/LK-ABAndMitsuiSignLOIExtensionWithTalga> (дата обращения: 27.10.2019).

Lynch E., Hellström F., Huhma H., Jönberger J., Persson O., Morris J. Geology, lithostratigraphy and petrogenesis of c. 2.14 Ga greenstones in the Nunasvaara and Masugnsbyn areas, northernmost Sweden // Geology of the Northern Norrbotten ore province, Northern Sweden. 2018. GSS. 77 p.

Mineral deposits of Finland / Eds W. Maier, R. Lahntien, H. O'Brien. Elsevier Inc., 2015. 791 p.

Nurmela P. Katsaus Suomen grafiittiesiintymiin. Report M81/1989/1. Geological Survey of Finland, 1989.

Palosaari J., Latonen R. M., Smått J.-H., Raunio S., Eklund O. The flake graphite prospect of Piippumäki – an example of a high-quality graphite occurrence in a retrograde metamorphic terrain in Finland // Mineralium Deposita. 2020. Vol. 55. P. 1647–1660. doi: 10.1007/s00126-020-00971-z

Palosaari J., Latonen R.-M., Smått J.-H., Blomquist R., Eklund O. High-quality flake graphite occurrences in a high-grade metamorphic region in Sortland, Vesterålen, Northern Norway // Nor. J. Geol. 2016. Vol. 96. P. 19–26. doi: 10.17850/njg96-1-03

Puustinen K. Suomen kaivosteollisuus ja mineraalien raaka-aineiden tuotanto vuosina 1530–2001, historiallinen katsaus erityisesti tuotantolukujen valossa. Geologian tutkimuskeskus, arkistoraportti, M 10.1/2003/3. Geologian tutkimuskeskus, 2003. URL:

<http://weppi.gtk.fi/aineistot/kaivosteollisuus> (дата обращения: 20.06.2018).

Rahl J. M., Anderson K. M., Brandon M. T., Fasoulas C. Raman spectroscopic carbonaceous material thermometry of low-grade metamorphic rocks: calibration and application to tectonic exhumation in Crete, Greece // *Earth Planet Sci. Lett.* 2005. Vol. 240. P. 338–354. doi: 10.1016/j.epsl.2005.09.055

Rodionov A., Ofstad F., Stampolidis A., Tassis G. Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey at Langøya in Vesterålen // Nordland. NGU report 2013, 044. Geological Survey of Norway, 2013.

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.

Scogings A., Chesters J., Shaw B. Assessing graphite projects on credentials // *Industrial Minerals Magazine*. August 2015. P. 50–55.

Stinton C., Holmström H., Gosselin M., Reed G. Woxna Graphite // Technical Report-Project 112. 2021. Woxna Graphite AB. 354 p.

References

Al-Ani T., Leinonen S., Ahtola T., Salvador D. High-grade flake graphite deposits in metamorphic schist belt, Central Finland-mineralogy and beneficiation of graphite for lithium-ion battery applications. *Minerals*. 2020;10(8):680. doi: 10.3390/min10080680

Al-Ani T., Ahtola T., Kuusela J. Prospecting and exploration of flake graphite occurrences in Central and Southern Finland. *GTK research Report*. 2018;24:28.

Arkimaa H., Hyvönen E., Lerssi J., Loukola-Ruskeeniemi K., Vanne J. Suomen Mustaliuskeet aeromagneettisella kartalla – Proterozoic black shale formations and aeromagnetic anomalies in Finland 1:1000 000. Geological Survey of Finland; 2000.

Balaboshin N. G., Krivovichev V. G., Avedisyan A. A. Carbonaceous matter in crystalline schists of the north-west Kola Peninsula. *Mineraly metamorficheskikh porod Kol'skogo p-ova = Minerals of metamorphic rocks of the Kola Peninsula*. Apatity: Kol'skii fil. AN SSSR; 1979. P. 81–94. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K. Fluid inclusions and PT-mode formation of leucosomes of sodic migmatites in the granulite part of the Ladoga area (South Karelia). *Zapiski VMO*. 2002;131(5):22–39. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K., Glebovitskii V. A., Kozyreva I. V., Shuldiner V. I. The Meyer shear – the main element of suture structure on the border of the Karelian Craton and Svecofennian Complex in the Ladoga region, Baltic Shield. *DAN = Proceed. of the Academy of Sciences*. 1996;348(3):353–356. (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 Svecofennides of Priladozh'e. St. Petersburg: SPbGU; 2000. 200 p. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K., Levskii L. K., Levchenkov O. A. The Svecofennian Belt of Fennoscandia: Spatial and temporal correlation of the Early Proterozoic endogenic processes. Moscow: Nauka Publ.; 2009. 276 p. (In Russ.)

Bareev I. A., Pinyagina L. V. Graphite. *Geophysical methods of search and exploration of non-metallic minerals*. Moscow: Nedra Publ.; 1984. P. 88–93. (In Russ.)

Beyssac O., Rumble D. Graphitic carbon: a ubiquitous, diverse and useful geomaterial. *Elements*. 2014;10:415–420. doi: 10.2113/gselements.10.6.415

Beyssac O., Chopin C., Rouzaud J.-N. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: A new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*. 2002;20(9):859–871. doi: 10.1046/j.1525-1314.2002.00408.x

Biske N. S. Graphite mineralization of Northern Ladoga Lake (geological and genetic features). Petrozavodsk: KarRC RAS; 1987. 172 p. (In Russ.)

Biske N. S., Skamnitskaya L. S. Graphite ores of Karelia and prospects of their industrial use. *Kompleksnoe osvoenie mineral'nykh resursov Severa i Severo-Zapada SSSR (evropeiskaya chast')*: *Mat-ly vsesoyuzn. soveshch. = Complex development of mineral resources of the North and North-West of USSR (European part): Proceed. of All-Union meeting*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1990. P. 127–130. (In Russ.)

Biske N. S., Skamnitskaya L. S. Metamorphic criteria of forecasting of graphite ores. *Problemy prognozirovaniya poiskov i razvedki mestorozhdenii nerudnykh poleznykh iskopaemykh = Problems of forecasting of search and exploration of deposits of non-metallic minerals: Collection of scientific works*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. P. 142–143. (In Russ.)

Borisev I. V. The history of mining in the Northern Ladoga Region of XVII c. – 1939. Sortavala; 2009. URL: http://ladoga-online.ru/portal/libr/book_08.html (accessed: 20.01.2022). (In Russ.)

Corfu F. Multistage metamorphic evolution and nature of the amphibolites-granulite facies transition in Lofoten-Vesterålen, Norway, revealed by U-Pb in accessory minerals. *Chemical Geology*. 2007;241:108–128. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.01.028

Engvik A. K., Davidsen B., Coint N., Lutro O., Tveten E., Schiellerup H. High-grade metamorphism of the Archean to Palaeoproterozoic gneiss complex in Vesterålen, North Norway. *32nd Geological Winter Meeting Helsinki, Bulletin of the Geological Society of Finland*, special issue. 2000. P. 153–154.

Engvik A. K., Gautneb H., Knežević Solberg J., Rønning J. S., Austrheim H. High-grade formation of graphite in Vesterålen, northern Norway, and its consequences for petrophysical properties of the lower continental crust. *NGF Abstracts and Proceedings of 34th Nordic Geological Winter Meeting*. 2020;1:56.

Eremin N. I. Non-metallic minerals. Moscow: MSU; 2007. 459 p. (In Russ.)

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.

Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., Novoselov K. S., Roth S., Geim A. K. Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Phys. Rev. Lett.* 2006;97:187401. doi: 10.1103/PhysRevLett.97.187401

Gautneb H. Graphite deposits in Northern Norway; A review and latest exploration results. Conference paper, May 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/317545564> (accessed: 20.01.2022).

Gautneb H., Gloaguen E., Törmänen T. Lithium, Cobalt and Graphite occurrences in Europe. *Results from GeoEra FRAME project wp 5, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7025*. doi: 10.5194/egusphere-egu2020-7025,2020

Gautneb H., Knezevic J., Johannesen N. E., Wanvik J. E., Engvik A., Davidsen B., Rønning J. S. Geological and ore dressing investigations of graphite occurrences in Bø, Sortland, Hadsel and Øksnes municipalities, Vesterålen, Nordland County, Northern Norway 2015–2016. *NGU Report*. 2017;015.

Gautneb H., Wanvik J. E. The graphite schists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway. *Report NGU*. 2016;10.

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.

Gavrilenko B. V. Stores of mineral resources of the Kola Territory. Apatity: KSC RAS; 2004. 92 p. (In Russ.)

Glebovitskii V. A., Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A., Berezhnaya N. G., Levskii L. K. Time, duration and PT-parameters of polystaged metamorphism of the Svecofennian Ladoga metamorphism: results of isotopic age determination. *DAN = Proceed. of the Academy of Sciences*. 2001;377(5):667–671. (In Russ.)

Halberg A., Reginiussen H. Mapping of innovation-critical metals and minerals. *SGU report* 2019:20. Uppsala, 2019.

Hölttä P., Heilimo E. Metamorphic map of Finland in bedrock of Finland at the scale 1:1 000 000 – major stratigraphic units, metamorphism and tectonic evolution. *Nironen M. (ed)*. Geological Survey of Finland, Special Paper; 2017. P. 6075–6126.

Ivliev A. I., Gershenkop A. Sh., Romanyukha A. M., Khavin V. Ya. Graphite ores of Skalistaya Mountain. *Geology of non-metallic minerals of the Kola Peninsula*. Apatity: Kol'skii fil. AN SSSR; 1982. P. 57–69. (In Russ.)

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

Keeling J. Graphite: properties, uses and South Australian resources. *MESA J.* 2017;84: 41.

Kiryukov V. V. Graphite. *Promyshlennyye tipy mestorozhdenii nemetallicheskih poleznykh iskopaemykh = Industrial types of nonmetallic minerals deposits*. Moscow: Nedra Publ.; 1985. P. 42.

Leont'ev A. G., Mikhailov V. P., Biske N. S. Graphite. *Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya = Mineral and raw material base of the Republic of Karelia*. Book 2. Petrozavodsk: Karelia; 2006. P. 40–47. (In Russ.)

Luzin V. P., Vafin R. F., Permyakov E. N., Kuznetsov O. B., Luzina L. P., Gubaidullina A. M., Kuznetsova V. G., Akhiyarova A. V. Complex mineralogical and technological research of graphite ores from the Chebere deposit in the Sakha Republic (Yakutia). *Tekhnologicheskaya mineralogiya, metody pererabotki mineral'nogo syr'ya i novye materialy = Mineralogy, mineral processing methods and new materials*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. P. 91–100. (In Russ.)

Leading Edge Materials. Woxna graphite. 2018. URL: <https://leadingedgematerials.com/woxna-graphite> (accessed: 27.10.2019).

LKAB and Mitsui Extend Talga LOI for Swedish Graphite Anode Project. *ASX Release* 28 June 2021. URL: <https://www.talgagroup.com/irm/PDF/0371d89b-d2b1-4be8-b58b-9dbfa40e5a6e/LKABAndMitsuiSignLOIExtensionWithTalga> (accessed: 27.10.2019).

Lynch E., Hellström F., Huhma H., Jönberger J., Persson O., Morris J. Geology, lithostratigraphy and petrogenesis of c. 2.14 Ga greenstones in the Nunasvaara and Masugnsbyn areas, northernmost Sweden. *Geology of the Northern Norrbotten ore province, Northern Sweden*. 2018. GSS. 77 p.

Maier W., Lahntien R., O'Brien H. (eds). *Mineral deposits of Finland*. Elsevier Inc.; 2015. 791 p.

Nurmela P. Katsaus Suomen grafiittiesiintymiin. *Report M81/1989/1*. Geological Survey of Finland; 1989.

Palosaari J., Latonen R. M., Smått J.-H., Raunio S., Eklund O. The flake graphite prospect of Piippumäki – an example of a high-quality graphite occurrence in a retrograde metamorphic terrain in Finland. *Mineralium Deposita*. 2020;55:1647–1660. doi: 10.1007/s00126-020-00971-z

Palosaari J., Latonen R.-M., Smått J.-H., Blomquist R., 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. doi: 10.17850/njg96-1-03

Pozhilenko V. I., Gavrilenko B. V., Zhirov D. V., Zhabin S. V. Geology of ore areas of Murmansk region. Apatity: KSC RAS; 2002. 359 p. (In Russ.)

Puustinen K. Suomen kaivosteollisuus ja mineraalien raaka-aineiden tuotanto vuosina 1530–2001, historiallinen katsaus erityisesti tuotantolukujen valossa. *Geologian tutkimuskeskus, arkistoraportti*, M 10.1/2003/3. Geologian tutkimuskeskus; 2003. URL: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/kaivosteollisuus> (accessed: 20.06.2018).

Rahl J. M., Anderson K. M., Brandon M. T., Fassoulas C. Raman spectroscopic carbonaceous material thermometry of low-grade metamorphic rocks: calibration and application to tectonic exhumation in Crete, Greece. *Earth Planet Sci. Lett.* 2005;240:338–354. doi: 10.1016/j.epsl.2005.09.055

Rodionov A., Ofstad F., Stampolidis A., Tassis G. Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey at Langøya in Vesterålen, Nordland. *NGU report*. 2013;044.

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.

Scogings A., Chesters J., Shaw B. Assessing graphite projects on credentials. *Industrial Minerals Magazine*. August 2015. P. 50–55.

Stinton C., Holmström H., Gosselin M., Reed G. Woxna Graphite. *Technical Report-Project*. Woxna Graphite AB. 2021;112:354.

Velikoslavinsky D. A. The comparative characteristic of regional metamorphism of moderate and low pressures. Leningrad: Nauka Publ.; 1972. 192 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 21.02.2022; принята к публикации / accepted: 28.02.2022.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Щипцов Владимир Владимирович

д-р геол.-мин. наук, старший научный сотрудник,
заведующий отделом минерального сырья ИГ КарНЦ РАН

e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com

CONTRIBUTOR:

Shchiptsov, Vladimir

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