Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 91–109
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 91–109
DOI: 10.17076/geo2391

УДК 537.9(470.22)

ГЕОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ГРАФИТОВЫХ РУД ИХАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ, РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

М. В. Солонинкина[1]*, В. В. Щипцов[1, 2], Д. В. Логинов[2], Н. Н. Рожкова[1]

[1] Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)
**mas31393@yandex.ru*
[2] Петрозаводский государственный университет
(пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

В статье анализируется современное состояние изученности графитовых руд, их потребности и основные направления использования в мировой экономике. Дана геологическая и минералого-технологическая прогнозная оценка крупного Ихальского месторождения крупночешуйчатого графита (Республика Карелия). Проведен комплексный анализ фазового состава и структурных особенностей природного графита Ихальского месторождения и продуктов его обогащения. Методами РСА, СТА и КРС установлено, что исходное сырье характеризуется высокой минеральной загрязненностью (содержание углеродной фазы до 64,3 %, примеси кварца, полевых шпатов, сульфидов и биотита). Показано, что различные методы обогащения позволяют получать концентраты с принципиально разным полиморфным углеродом: от 95 % содержания углерода с преобладанием гексагональной модификации α-графита (флотационный концентрат КарНЦ РАН) до 96,1 % (из них 9 % ромбоэдрической модификации β-графита). Методом КРС выявлена значительная микронеоднородность всех образцов, заключающаяся в сосуществовании зон идеального (I_D/I_G = 0,012) и дефектного (I_D/I_G = 0,22) графита. Обнаруженные структурно-фазовые особенности являются отражением метаморфогенного генезиса месторождения. Доказана эффективность комплексного подхода для оценки качества графитовых концентратов, установлена корреляция между данными применяемых методов. Результаты работы важны для оптимизации технологий обогащения и прогнозирования свойств графитовых материалов.

Ключевые слова: природный графит; Ихальское месторождение; обогащение; рентгенофазовый анализ; термогравиметрический анализ; спектроскопия комбинационного рассеяния света; фазовый состав; структурная неоднородность

Для цитирования: Солонинкина М. В., Щипцов В. В., Логинов Д. В., Рожкова Н. Н. Геология, минералогия и технология графитовых руд Ихальского месторождения (Западное Приладожье, Республика Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 91–109. doi: 10.17076/geo2391

Финансирование. Работа выполнена в рамках Госзадания КарНЦ РАН – FWME-0222-2019-0065.

M. V. Soloninkina[1]*, V. V. Shchiptsov[1, 2], D. V. Loginov[2], N. N. Rozhkova[1].
GEOLOGY, MINERALOGY AND TECHNOLOGY OF GRAPHITE ORES OF THE IHALA DEPOSIT (WESTERN LADOGA AREA, REPUBLIC OF KARELIA)

[1] Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)
*[2] Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *mas31393@yandex.ru*

The article analyzes the current state of research on graphite ores, demand for them, and their main uses in the global economy. A geological and mineralogical-technological predictive assessment of the large Ihala deposit of large flake graphite (Republic of Karelia) is provided. A comprehensive analysis of the phase composition and structural features of natural graphite from the Ihala deposit and the products of its enrichment has been conducted. X-ray diffraction analysis (XRD), simultaneous thermal analysis (STA), and Raman scattering (RS) showed that the initial raw material was highly mineralized (with a carbon phase content of up to 64.3 %, with impurities such as quartz, feldspars, sulfides, and biotite). It was also demonstrated that different enrichment methods can produce concentrates with significantly different polymorphic carbon compositions, ranging from 95 % carbon content with a predominance of the hexagonal α-graphite modification (flotation concentrate from the KarRC RAS) to 96.1 % (including 9 % of the rhombohedral β-graphite modification). Raman spectroscopy revealed significant microheterogeneity in all samples, manifested in the coexistence of zones of ideal (I_D/I_G = 0.012) and defective (I_D/I_G = 0.22) graphite. The detected structural and phase features reflect the metamorphogenic genesis of the deposit. The integrated approach for assessing the quality of graphite concentrates proved effective, and outputs of the applied methods were in good alignment. The results are important for optimizing enrichment technologies and predicting the properties of graphite materials.

Keywords: natural graphite; Ihala deposit; beneficiation; X-ray diffraction analysis; thermogravimetric analysis; Raman spectroscopy; phase composition; structural heterogeneity

For citation: Soloninkina M. V., Shchiptsov V. V., Loginov D. V., Rozhkova N. N. Geology, mineralogy and technology of graphite ores of the Ihala deposit (Western Ladoga area, Republic of Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2026. No. 10. P. 91–109. doi: 10.17076/geo2391

Funding. This work was supported by the State Assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (project no. FWME-0222-2019-0065).

Введение

Графит – один из самых интересных минералов, встречающихся на Земле. Он отмечается в природе, а также производится в синтетических процессах.

Самое раннее применение графита восходит к первобытному человеку, который рисовал им на стенах пещер. Египтяне также применяли его для украшения керамики. В средние века графит использовался как огнеупор для облицовки форм с целью изготовления более гладких пушечных ядер, которыми можно было стрелять на большие расстояния. На протяжении всей истории графит путали с другими минералами, особенно с галенитом и молибденитом. Для описания минерала использовались такие названия, как плюмбаго и черный свинец. Со временем термин графит (что означает «писать») был окончательно установлен для описания «карандашного» минерала.

Современный этап развития науки и технологий характеризуется возрастающим интересом к углеродным материалам, в частности, к графиту, что обусловлено его уникальными физико-химическими свойствами и широкими перспективами практического применения. Графит, являясь ключевым материалом для современных технологий, находит применение в энергетике (аноды литий-ионных аккумуляторов), металлургии (огнеупоры, смазки), электронной промышленности (теплоотводящие элементы), атомной и медицинской отраслях [Кононов, 2021; Государственный доклад..., 2024]. Особенно важно выделить использование графита в высоких технологиях [Щипцов и др., 2022]:

первая группа – промышленный графит (фольга и экранирование (нуклеарный класс)),

высокотехнологичные компоненты батарей (СЕМ). В общем объеме важных сырьевых материалов данная группа составляет 35 %;

вторая группа – электроды (ЭАФ), тигли, части ракеты. Ее объем достигает 45 %;

третья группа – батареи БАМ и ГЭМ, огнеупоры, пресс-формы, синтетические алмазы, порошкообразные металлы, дымомаскирующие средства (технология ослабления ЭМ), смазочные материалы. Объем составляет 20 %.

При этом эффективность использования графита в значительной степени определяется его структурой, а именно: степенью кристалличности, типом структурной упорядоченности, наличием и распределением дефектов, морфологией частиц и пористостью, что также важно и для нанотехнологий. Графит обладает формой чистого углерода, которая существует в простом составе и имеет слоистую структуру. Особенности строения кристаллической решетки графита преломляются в химико-физических свойствах графита.

Именно все это вкупе позволяет считать, что промышленный минерал графит относится к важнейшему минералу XXI века.

Целью настоящей работы являлось комплексное исследование структурных особенностей графита Ихальского месторождения в исходном состоянии и после обогащения различными методами. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведение рентгеноструктурного анализа для идентификации кристаллических фаз, определения размеров кристаллитов и оценки степени графитизации образцов; оценка структурного совершенства и дефектности методом спектроскопии комбинационного рассеяния света; а также количественное определение содержания углерода методом синхронного термического анализа.

Состояние изученности и использование графитовых руд

Мировые запасы графитовой руды составляют около 286,5 млн т, их крупными держателями являются Китай (27 %), Бразилия (26 %), Мадагаскар и Мозамбик (по 9 %). Россия обеспечивает 1,4 % мировой добычи графита, занимая 7-е место в рейтинге мировых производителей [Государственный доклад…, 2024; Щипцов, Светов, 2026].

Прогнозируется рост мирового спроса на графит. Китай является крупнейшим в мире производителем и экспортером переработанного мирового графита в материал, который используется практически во всех анодах электромобилей. По данным компании Benchmark Mineral Intelligence в ближайшее время литий-ионные аккумуляторы обгонят сталелитейную промышленность по спросу на графит.

В природе встречаются три природных морфотипа графита [Кононов, 2021; Государственный доклад…, 2024; Щипцов, Светов, 2026] и один синтетический [Островский и др., 1986; Государственный доклад…, 2024]:

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

б) скрытокристаллический 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 %;

г) синтетический графит – материал, который производится в электропечах при нагреве смеси тонкоизмельченного кокса и углеродистых связующих. Для этого используют нефтяной, антрацитовый или пековый кокс, а в качестве связующих веществ – пек или гудрон.

Природные графиты разделяются на явнокристаллический (средний размер кристаллов более 1 мкм) и скрытокристаллический [Методические рекомендации…, 2007]. Степени чистоты чешуйчатого графита в графитовой продукции различаются – *Cg* 85–90 %, 90–94 %, 94–96 % и выше. Содержание *Cg* более 98–99 %, как правило, достигается с помощью очистки химическими и/или термическими методами [Государственный доклад…, 2024].

Чешуйчатый графит имеет прямую зависимость от метаморфических процессов, связанных с условиями, где органический углерод, отложенный в осадочных и осадочно-вулканогенных породах, преобразуется в графит под влиянием условий давления, обычно превышающего 5 кбар, и температуры около 650–700 °С и выше [Щипцов и др., 2022]. Метаморфические реакции, в результате которых образуется графит, приводят к высокой электропроводности, поляризуемости и пониженной теплопроводности [Beyssac, Rumble, 2014; Engvik et al., 2020].

Ожидается, что потребности на графит будут неуклонно расти, в основном благодаря расширению мирового рынка на спрос литий-ионных аккумуляторов. В этом отношении выделяется огромный потенциал графитовых проектов Танзании (проект Линди-Джамбо, проект Бунью) в сочетании с продолжающимися геологоразведочными работами, что делает эту страну одним из ключевых игроков на мировом рынке

графита. Проявлен рост технологичности графитовой промышленности Танзании в организации производства важнейшего продукта второго передела графитового сырья – сферического (шарового) графита [Государственный доклад..., 2024].

Несмотря на использование синтетического графита в анодах аккумуляторов и косвенным влиянием тем самым на ценообразование природного чешуйчатого и сферического (шарообразного) графита, Агентство *Benchmark Mineral Intelligens* прогнозирует рост глобального спроса на анодный материал на основе природного графита для использования только в *Li*-ионных батареях с 255 тыс. т в 2023 году до 1,2 млн т в 2030 году. При этом для производства 1,2 млн т активного анодного материала на основе природного графита потребуется до 2,5 млн т чешуйчатого графита (–100 *mesh* 94–96 % *Cg*). Важными сферами применения графита также являются огнеупоры, электроды, науглероживание стали, литейное производство и производство смазочных материалов, изготовление формованных изделий, фрикционных материалов. В меньшей степени графит идет в производство грифелей, красок, пластмасс, искусственных алмазов и др. [Государственный доклад..., 2024].

На территории России существует единственное разрабатываемое Тайгинское месторождение кристаллического графита в Челябинской области, на котором ежегодно добывают около 10 тыс. т графита. Основу потенциальной сырьевой базы страны составляют крупное по запасам Курейское месторождение скрытокристаллического графита в Красноярском крае и среднее Союзное месторождение чешуйчатого графита высокого качества в Еврейской АО [Государственный доклад..., 2024]. Дефицит графита восполняется за счет импорта сырья из-за границы.

Прогнозные ресурсы графитовых руд России локализованы в пределах пяти рудных провинций: Карело-Кольской (Республика Карелия и Мурманская обл.), Уральской (Свердловская и Челябинская области), Забайкальской (Республика Бурятия и Иркутская обл.) и Буреинской (Приморский край и Еврейская АО) [Государственный доклад..., 2024].

Классификация запасов и прогнозных ресурсов графитовых руд в РФ базируется на степени геологической изученности, сложности строения месторождений и технологических свойствах графита (размер чешуек, содержание углерода). Основная часть запасов разведываемых объектов относится к категориям C_1 и C_2 [Методические рекомендации..., 2007].

Геологические особенности графитовых руд Ихальского месторождения (также именуемое как «Ихала-3»)

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 объектов в Норвегии, Финляндии и Швеции [Щипцов, 2022]. Обширная часть Фенноскандинавского щита включает Свекофеннскую область с характерными 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.]. С 2016 года 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 Edge Materials..., 2019]. Динамика началась от нулевого показателя в 2015 году и будет резко увеличиваться в перспективе по данным прогноза спроса на сферический (шаровидный) графит (SPC) и природные аноды.

Геологические структуры Российского Приладожья являются юго-восточным продолжением Раахе-Ладожской тектонической зоны Фенноскандинавского щита [Ekdahl, 1993; Ладожская..., 2020].

В Ладожской подвижной зоне открыто более 30 проявлений, в которых отмечены два типа графита: 1 – легкообогатимые руды явнокристаллического крупно-среднечешуйчатого графита; 2 – труднообогатимые руды скрытокристаллического графита.

В Западном Приладожье выделены два домена – Северный (СД) и Южный (ЮД), эволюция которых существенно отличается в палеопротерозое. Эти домены имеют тектоническую природу сочленения, определяемую как Мейерская зона [Балтыбаев и др., 1996; Ладожская..., 2020].

Супракрустальный комплекс СД сложен в основном палеопротерозойскими метавулканитами сортавальской и метатурбидитами ладожской серий, испытывающими зональный метаморфизм андалузит-силлиманитового типа, возрастающий к югу от зеленосланцевой до амфиболитовой со спорадическим появлением анатектической мигматизации пород.

ЮД сложен осадочными и вулкано-плутоногенными породами. В большинстве они метаморфизованы до гранулитового уровня и практически повсеместно мигматизированы. Из-за интенсивного преобразования и утери стратиграфических маркеров супракрустальные породы ЮД, хотя и объединены в лахденпохскую метаморфическую серию, но тем не менее рассматриваются как высокотемпературные аналоги осадков ладожской серии. С севера область распространения условно ограничивается осевой частью шовной зоны Мейерского надвига.

В последние годы по оценке графитовых руд Западного Приладожья выполнены следующие работы [Щипцов, Светов, 2026]:

1. Поисковые работы на крупночешуйчатый графит в пределах перспективных участков Кирьяволахтинской площади (Республика Карелия) в период 2022–2024 гг.

Исполнитель АО «Центральное ПГО».

2. Разведочные работы на участке Ихальского месторождения графитов («Ихала-3») 2017–2018 гг.

Исполнитель ООО «Промышленные инвестиции».

3. Поисковые и оценочные работы на графит на участке «Ихала-4». 2022–2023 гг.

Исполнитель ООО «Графит-Пром».

4. Информационный отчет о выполнении работ по геологическому изучению по участку недр «Ихала-6». 2023 год.

Исполнитель ООО «Русский графит».

5. Информационный отчет о выполнении работ по геологическому изучению по участку недр «Ихала-7». 2023 год.

Исполнитель ООО «Русский графит».

Основным методом поисковых и разведочных работ на данных площадях являлось бурение колонковых скважин. При поиске и разведке месторождений графитовых руд широко применялись геофизические методы. Геофизические исследования, особенно электромагнитные, являются очень эффективным методом для обнаружения нераскрытых залежей графита при поисках объектов на графит.

Последовательность геодинамических графитформирующих процессов в пределах Ихальского рудного поля от палеопротерозоя до фанерозоя приводится в опубликованной статье [Щипцов, Светов, 2026].

Учитывая потребность в суперчистом чешуйчатом графите, оценка графита связана прямым образом с приложением к исследованиям современных высокоточных аналитических методов. Примером таких исследований послужила территория Ихальского месторождения («Ихала-3») [Щипцов, 2022; Щипцов, Светов, 2026].

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

Основная краткая характеристика Ихальского месторождения приводится на основе обобщенных сведений из статьи [Щипцов, Светов, 2026]. Указывается, что месторождение приурочено к графитовой стратиформной формации кристаллических сланцев людиковийской системы палеопротерозоя. Графитовые руды метаморфогенного класса рассматриваются в едином блоке свекофеннид, и их формирование прямым образом связывается с высокотемпературными условиями метаморфизма гранат-кордиерит-ортоклазовой фации гранулитовой ступени метаморфизма с возрастом 1,89–1,85 млрд. Региональный метаморфизм пород отвечает условиям высокотемпературной амфиболитовой фации силлиманит-альмандин-калиевополевошпатовой субфации, местами гранулитовой фации, что впервые было отмечено Ю. И. Нагайцевым [Нагайцев, 1974].

Типизация графитовых руд проводилась по текстурно-структурным признакам. Графитовые руды (графиты) делятся на явно- и скрытокристаллические. Среди первых выделены плотнокристаллические и чешуйчатые разновидности. По морфологическим особенностям графитовые руды представляют собой крутопадающие пластообразные тела, сложенные графитсодержащими биотитовыми сланцами и мигматитами по ним. Простираются в субмеридиональном направлении. Площадь составляет 8,2 км^2. Длина залежи по простиранию равна 1700 м, мощность достигает 450 м. По падению залежь прослежена до глубины 100 м и не имеет признаков разубоживания. Основным природным типом графитовых руд являются мелко-, среднезернистые биотитовые гнейсы с содержанием чешуйчатого графита от 2,8 до 9,2%

и более. Другие минеральные разновидности графитоносных метаморфитов имеют подчиненное значение, обычно они образуют полосы и линзы среди графитсодержащих биотитовых гнейсов.

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. Гиперстеновая зона пиковой стадии метаморфизма соответствует условиям Т 800–900 °С и Р 5–6 кбар, что определяет параметры гранулитовой фации. Время гранулитовой стадии метаморфизма глиноземистых гнейсов установлено как 1880,1 ± 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 °С до 450–500 °С при давлении примерно 4 кбар, в наиболее поздних жилах – около 3–3,5 кбар, отмеченных в серии работ [Балтыбаев и др., 2000, 2009; Глебовицкий и др., 2001 и др.].

Руды оценены на обогатимость в границах «Ихала-3» на стадии поисково-оценочных работ. Испытания выполнялись в Уралмеханобр, ВНИИнеруд и ИГ КарНЦ РАН [Бискэ, 1987; Бискэ, Скамницкая, 2018; Скамницкая, Бискэ, 2019 и др.]. При химическом дообогащении неизмененных биотитовых гнейсов Ихальского месторождения 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 т до глубины 170 м при среднем содержании углерода 3,07 % [Недра Северо-Запада..., 2003].

Таким образом, Ихальское месторождение обладает значительными подтвержденными запасами крупночешуйчатого графита, а проведенные технологические исследования подтверждают принципиальную возможность получения высококачественных концентратов, соответствующих действующим стандартам.

Однако если традиционные области применения регламентированы в первую очередь химической чистотой и гранулометрическим составом, то новые направления использования графита, например, как прекурсора для получения графена, предъявляют принципиально иные требования к однородности и совершенству его кристаллической структуры. В этом случае ключевую роль играет не только чистота, но и плотность дефектов исходного графита. Исследования показывают, что чем меньше размер кристаллитов (L_c = 5–30 нм) и ниже кристалличность исходного графита, тем меньше количество слоев будет содержать получаемый графен [Mori et al., 2018]. Более того, высокая степень структурного совершенства графита ($d_{002} \leq 0{,}336$ нм, степень графитизации 85–93 %) и минимальное количество примесей в прекурсоре напрямую влияют на электронные свойства итогового материала [Wong et al., 2015].

Но, несмотря на детальное изучение геологии месторождения [Бискэ, Колодей, 2014; Бискэ, Скамницкая, 2018, 2019; Щипцов и др., 2020 и др.] и структурного состояния природного графита (табл. 1), влияние различных методов обогащения на кристаллическую структуру, дефектность и фазовый состав конечного графитового концентрата исследовано недостаточно.

Аналогом графитовых руд Ихальского рудного поля являются графиты эксплуатируемого месторождения «Завальевское» [Щипцов, Ковалевский, 2024]. Залежи связаны с палеопротерозойскими образованиями тетерьевской серии в составе Украинского кристаллического массива (хронологический интервал 2,5–2,3 млрд лет). Продуктивные толщи на месторождении представлены графитоносными биотит-хлоритовыми и полевошпат-гранатовыми гнейсами. Они соответствуют второй группе по классификации запасов и прогнозных ресурсов месторождений графитовых руд [Методические рекомендации..., 2007].

Технологические регламенты были разработаны украинскими промышленными предприятиями совместно с российскими. ОАО «Завальевский графитовый комбинат» (Кировоградская обл.) производил 25 марок графита размером 4–200 мкм с содержанием углерода от 85,00 до 99,95 %. На этом предприятии также существовало производство коллоидно-графитовых препаратов.

Таблица 1. Сводные данные по природному графиту Ихальского месторождения из литературных источников [Бискэ, Колодей, 2014; Бискэ, Скамницкая, 2018, 2019; Щипцов и др., 2020]

Table 1. Summary data on the natural graphite of the Ikhalskoye deposit from literature sources [Biske, Kolodey, 2014; Biske, Skamnitskaya, 2018, 2019; Shchiptsov et al., 2020]

Тип руды Type of ore	Метаморфогенный Metamorphogenic
Тип природного графита Type of natural graphite	Чешуйчатый Flaky
Размер чешуек графита Size of graphite flakes	Крупно- и мелкочешуйчатый Размер чешуек – от 0,01 до 3–4 мм. Средний размер – 0,3–0,6 мм Coarse- and fine-flaky Flake size: from 0.01 to 3–4 mm. Average size: 0.3–0.6 mm
Содержание графита в руде Graphite content in the ore	2,91–6,11 %
Породообразующие минералы Rock-forming minerals	кварц – 20–35 %, полевые шпаты – 25–40 % (преобладает плагиоклаз), биотит – 15–32 % и сульфиды (преимущественно пирротином) – 7–21 % quartz – 20–35 %, feldspars – 25–40 % (plagioclase predominates), biotite – 15–32 %, and sulfides (predominantly pyrrhotite) – 7–21 %
Содержание графита в концентратах Graphite content in concentrates	92–95 %
Данные РСА природного графита X-ray diffraction analysis (XA) data of natural graphite	Присутствует пик 002, характерный для α-графита, межслоевое расстояние (d) – 3,354–3,359 Å, степень графитизации – 1,9 A peak at 002 characteristic of α-graphite is present, the interlayer distance (d) is 3.354–3.359 Å, the degree of graphitization is 1.9
Данные КРС Raman spectroscopy	КР спектр характерен для монокристаллического графита: интенсивная узкая полоса G (на ~1580 $см^{-1}$), резко асимметричная полоса 2D (~2700 $см^{-1}$). В спектрах отдельных, более мелких чешуек в области 1100–1800 $см^{-1}$ проявляются слабые полосы «дефектов» D1 и D2 The Raman spectrum is characteristic of single-crystal graphite: an intense narrow G band (~1580 cm^{-1}), a sharply asymmetric 2D band (~2700 cm^{-1}). In the spectra of individual, smaller flakes, weak “defect” bands D1 and D2 appear in the 1100–1800 cm^{-1} region
Данные СТА Simultaneous thermal analysis (STA)	Содержание углерода в образцах не превышает 13 вес.%. На кривых ДСК наблюдаются экзотермические процессы горения углерода в двух температурных диапазонах: 400–650 °С и 700–850 °С The carbon content in the samples does not exceed 13 wt.%. Exothermic processes of carbon combustion are observed on the DSC curves in two temperature ranges: 400–650 °C and 700–850 °C

Методика проведения эксперимента и материалы

Объекты исследования

Материалом для исследований послужили образцы исходной графитовой руды Ихальского месторождения и обогащенных графитовых концентратов, полученных с использованием различных методов обогащения. Образец № 1 представляет собой измельченный графитсодержащий кварцбиотитово-полевошпатовый сланец. Образец № 2 – графитовый концентрат, полученный путем химического обогащения графитовой руды плавиковой кислотой (получен ИГ КарНЦ РАН). Образец № 3 – продукт промышленного обогащения, полученный флотационным методом в ВНИИнеруд г. Тольятти [Типовые нормы выработки..., 1984]. Образец № 4 – графитовый концентрат, полученный методом флотационного обогащения (ИГ КарНЦ РАН) [Бискэ, 1977].

Методы исследования

Методологической основой исследования послужил комплексный подход (РСА, КРС, СТА), успешно апробированный нами ранее для анализа структуры бразильского графита [Солонинкина и др., 2025].

Рентгеноструктурный анализ (РСА). Исследование выполнено на автоматизированном дифрактометре ДРОН-4 (Учебно-научная лаборатория РСА ПетрГУ, Петрозаводск) в геометрии Дебая-Шеррера (на просвет) с использованием MoKα-излучения (λ = 0,7107 Å), монохроматизированного кристаллом пиролитического графита. Выбор данного излучения обусловлен отсутствием флуоресценции со стороны углерода и его высокой проникающей способностью в образец. Дифракционные картины регистрировали в автоматическом режиме в двух угловых интервалах: 2–70° (шаг 0,02°, время счета 10 с/точка) и 70–145° (шаг 0,05°, время счета 10 с/точка). Для повышения

статистической достоверности данных, каждое измерение повторяли десять раз с последующим усреднением зависимости интенсивности от угла, I (2θ°). Положение образца фиксировали на оси вращения гониометра.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры КРС регистрировали на дисперсионном спектрометре Nicolet Almega XR (Thermo Scientific) в аналитической лаборатории КарНЦ РАН (Петрозаводск). Измерения проводили с использованием лазера с длиной волны 532 нм через 50-кратный объектив. Спектры регистрировали в диапазоне 400–4000 $см^{-1}$ с временем накопления 300 с. Обработку спектров, включая аппроксимацию и разложение на компоненты, выполняли в программном обеспечении «Omnic».

Синхронный термический анализ (СТА). Термический анализ проведен на синхронном анализаторе STA 449 F1 Jupiter (NETZSCH) в лаборатории физико-химических исследований наноматериалов КарНЦ РАН (Петрозаводск). Образцы нагревали на воздухе со скоростью 10 °С/мин. до температуры 1200 °С. Обработку полученных термогравиметрических (ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) кривых выполняли с использованием программного обеспечения Proteus.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены рентгенограммы исследованных образцов. Анализ дифракционных картин выявил существенные различия в их кристаллической структуре, непосредственно связанные с примененным методом обогащения.

Дифракционные картины образцов № 1, № 2 и № 3 характеризуются признаками сильно разупорядоченной, нанокристаллической структуры. На это указывает наличие широкого диффузного гало, на фоне которого наблюдаются слабые и уширенные дифракционные максимумы, соответствующие графитовой фазе. Такая картина типична для материалов с высоким содержанием дефектов, малым размером кристаллитов (турбостратная структура) или наличием сильно разупорядоченного углеродного компонента [Цыбуля, Черепанова, 2009]. В контексте данных образцов, наличие гало может быть обусловлено: присутствием аморфного углерода или силикатных примесей в исходном материале (№ 1),

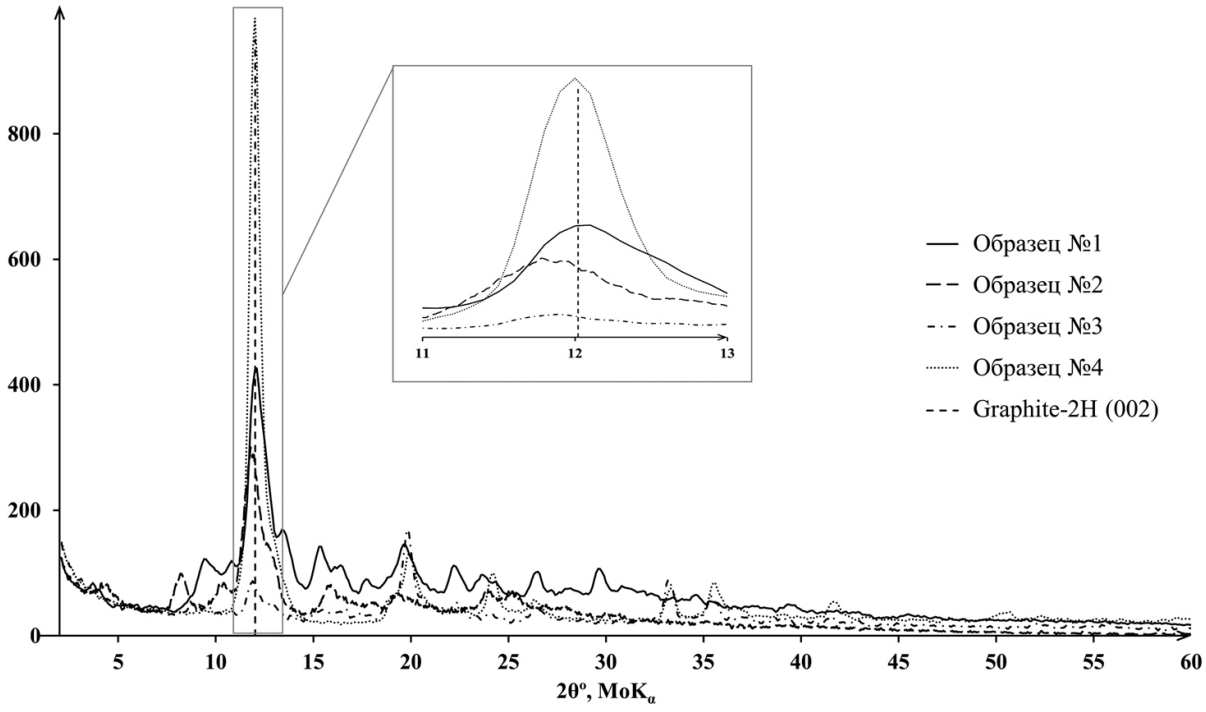


Рис. 1. Дифракционные картины рассеяния исследуемых образцов в сравнении, где:

– образец № 1; –- образец № 2; –·– образец № 3; ···· образец № 4; – эталонное положение пика графита 2H (002). На вставке вынесен участок дифрактограммы с пиком (002)

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the studied samples for comparison, where:

– sample no. 1; –- sample no. 2; –·– sample no. 3; ···· sample no. 4; – reference position of the 2H graphite (002) peak. The inset shows a section of the diffractogram featuring the (002) peak

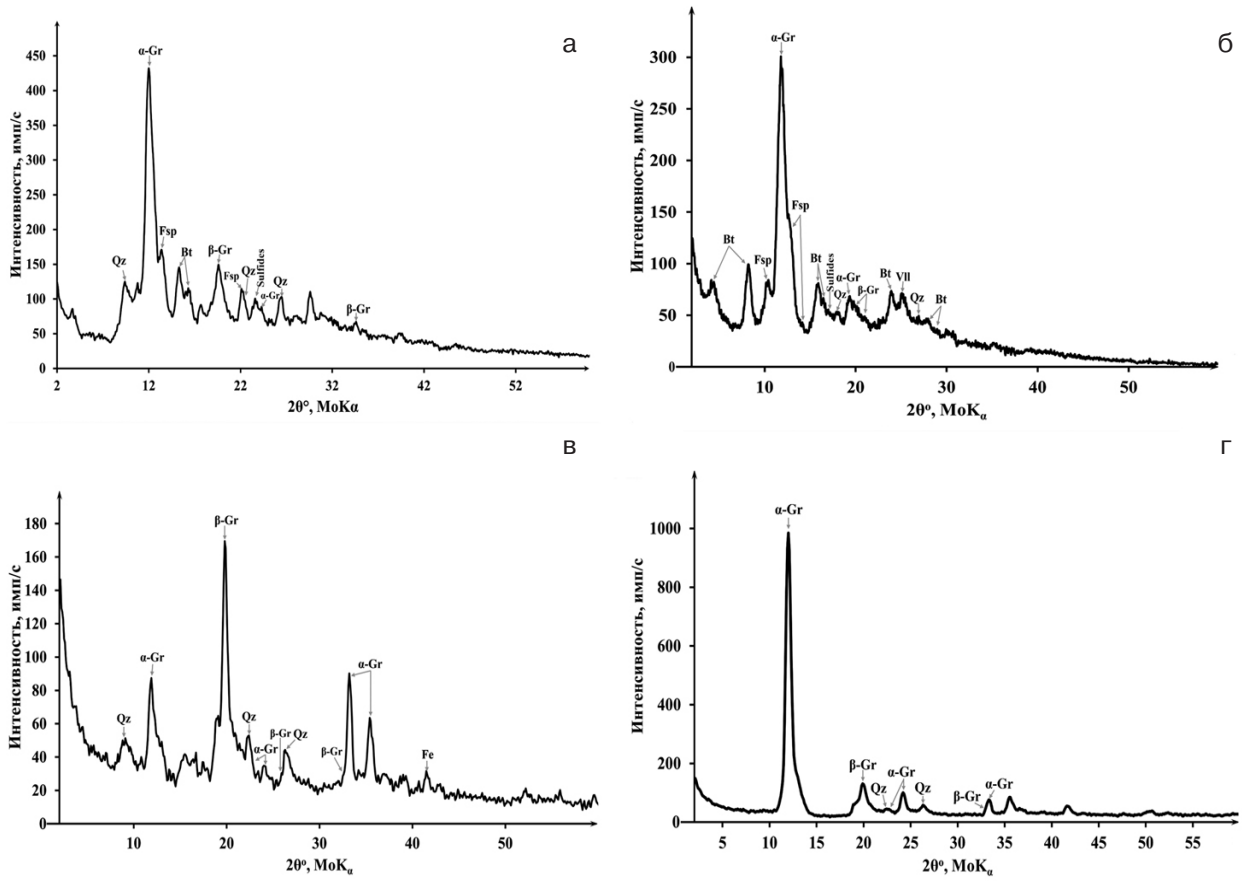


Рис. 2. Рентгенограммы исследуемых образцов Ихальского месторождения с указанием положения рефлексов (характеристических пиков) идентифицированных фаз, где:

а) – образец № 1, б) – образец № 2, в) – образец № 3, г) – образец № 4. Качественный и количественный фазовый анализ выполнен с использованием базы данных COD

Fig. 2. X-ray images of the studied samples of the Ikhalskoye deposit indicating the position of the reflexes (characteristic peaks) of the identified phases, where:

а) – sample no. 1, б) – sample no. 2, в) – sample no. 3, г) – sample no. 4. Qualitative and quantitative phase analysis was performed using the COD database

разрушением кристаллической решетки графита в процессе химического (№ 2) или механического (№ 3) воздействия, приводящего к росту дефектов и уменьшению размера кристаллитов.

В отличие от них, образец № 4 (флотационный концентрат) отражает картину, типичную для хорошо кристаллизованного графита. Наблюдаются интенсивные и узкие рефлексы, соответствующие гексагональной фазе графита с плотнейшей двухслойной упаковкой, что хорошо согласуется с литературными данными [Кузьмичева, 2000]. На высокое структурное совершенство указывает интенсивный и симметричный пик (002), свидетельствующий о строгой периодичности вдоль оси «с».

Для всех образцов на дифрактограммах наблюдается пик в области 2θ ≈ 12° (см. рис. 1), который соответствует отражению (002) гексагонального графита и характеризует межплоскостное расстояние. Полуширина этого пика минимальна для образца № 4, а для образцов № 1–3 она существенно возрастает, что указывает на меньший размер кристаллитов и повышенную дефектность их структуры. Кроме того, положение пика (002) для образцов № 1–3 незначительно смещено в сторону меньших углов по сравнению с образцом № 4. Это смещение может свидетельствовать об увеличенном среднем расстоянии между графеновыми слоями, наличием турбостратного графита или внедрением примесей между графеновыми слоями.

Идентификация кристаллических фаз во всех образцах была выполнена методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием программного комплекса Match! и базы данных Crystallography Open Database (COD). На рис. 2, а представлена дифрактограмма

исходного образца природного графита Ихальского месторождения (образец № 1) с отмеченными положениями рефлексов идентифицированных фаз.

В результате РФА установлено (табл. 2), что исходный образец содержит несколько кристаллических фаз, представленных преимущественно β- и α-графитами, а также идентифицируются такие породообразующие минералы, как кварц, полевой шпат, сульфиды и биотит. Полученный состав согласуется с особенностями геологического строения месторождения, представленного графитсодержащими сланцами и гнейсами с неоднородной степенью мигматизации.

Таблица 2. Характеристики образцов, полученные в ходе РФА и РСА

Table 2. Sample characteristics obtained from X-ray phase analysis (XPA) and X-ray diffraction (XRD) analyses

Рентгенофазовый анализ (РФА) X-ray phase analysis (XPA)				
Образец Sample	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Наименование кристаллической фазы и ее содержание The name of the crystalline phase and its content	β-графит (~18,2 мас.%) β-graphite (~18.2 wt.%)	β-графит (~0,8 мас.%) β-graphite (~0.8 wt.%)	β-графит (9,0 мас.%) β-graphite (9.0 wt.%)	β-графит (~0,6 мас.%) β-graphite (~0.6 wt.%)
	α-графит (46,1 % мас.%) α-graphite (46.1 wt.%)	α-графит (74,5 мас.%) α-graphite (74.5 wt.%)	α-графит (87,1 мас.%) α-graphite (86.6 wt.%)	α-графит (94,4 мас.%) α-graphite (94.4 wt.%)
	кварц (10,5 мас.%) quartz (10.5 wt.%)	кварц (3,7 мас.%) quartz (3.7 wt.%)	кварц (1,0 мас.%) quartz (1.0 wt.%)	кварц (5,0 мас.%) quartz (5.0 wt.%)
	полевой шпат (14,7 мас.%) feldspar (14.7 wt.%)	полевой шпат (9,2 мас.%) feldspar (9.2 wt.%)	н/д n/a	н/д n/a
	сульфиды (8,2 мас.%) sulfides (8.2 wt.%)	сульфиды (2,1 мас.%) sulfides (2.1 wt.%)	н/д n/a	н/д n/a
	биотит (2,4 мас.%) biotite (2.4 wt.%)	биотит (~7,6 мас.%) biotite (~7.6 wt.%)	н/д n/a	н/д n/a
	н/д n/a	виллиомит (2,1 мас.%) villiomite (2.1 wt.%)	железо (2,9 мас.%) iron (2.9 wt.%)	н/д n/a

Рентгеноструктурный анализ (РСА) X-ray Diffraction Analysis (XA)				
Образец Sample	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Межплоскостное расстояние d, нм Interplane distance d, nm	0,341	0,343	0,346	0,342
Размер кристаллитов L_c, нм Crystallite size L_c, nm	4,22	6,07	4,88	5,74
Степень граффитизации g, % Degree of graphitization g, %	87,8	26	≈ 0	87,8

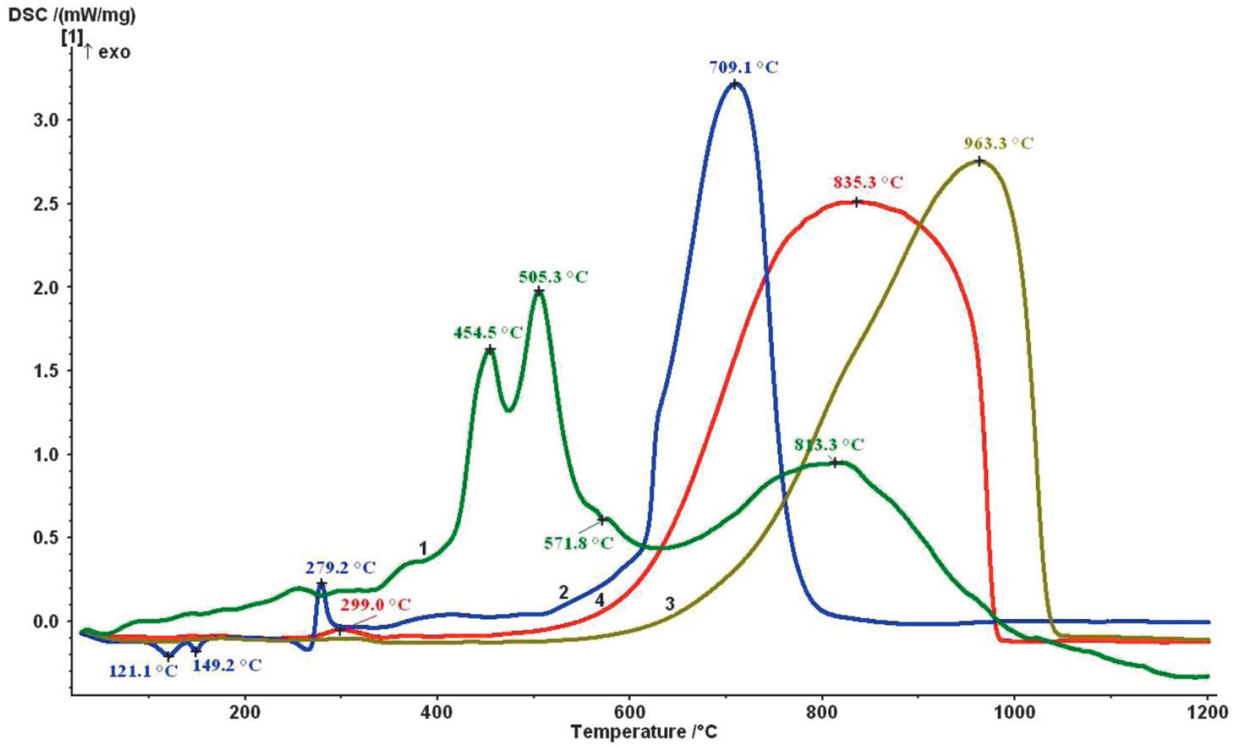


Рис. 3. Результаты синхронного термического анализа образцов графита (кривые ДСК), где: 1 – образец № 1, 2 – образец № 2, 3 – образец № 3, 4 – образец № 4

Fig. 3. Results of the simultaneous thermal analysis of the graphite samples (DSC curves), where: 1 – sample no. 1, 2 – sample no. 2, 3 – sample no. 3, 4 – sample no. 4

Для углеродной фазы рассчитаны ключевые структурные параметры, представленные в табл. 2. Согласно результатам, межплоскостное расстояние характерно для β-графита, размер кристаллитов вдоль оси «c» позволяет вычислить количество слоев, которое составило 12. Рассчитанная степень графитизации «g» соответствует частично графитизированному углероду. Наличие нескольких фаз в образце напрямую коррелирует с данными, полученными методом СТА (рис. 3), где каждая кристаллическая фаза проявляется в виде серии последовательных экзо- и эндотермических пиков (454,5 °C; 505,3 °C; 572,0 °C; 813,3 °C).

В табл. 3 представлены результаты, полученные в ходе исследования образцов методом СТА. Согласно данным, полученным при СТА (ТГ, ДТГ, ДСК, ДДСК), основная потеря массы составила ~8,98 % связанная с окислением отдельных чешуек графита и пирротина, что проявляется в серии доминирующих экзотермических эффектов (max ДСК-пиков при ~454,5 и 505,3 °C). Наложение слабого эндотермического эффекта на пик при ~572,0 °C отражает процесс инверсии кварца, что объясняет высокую остаточную массу (91,02 %). Эндотермический эффект в области ~700,1050 °C соответствует разложению фазе углерода.

Таблица 3. Характеристические температуры ТГ и ДСК исследуемых углеродных материалов

Table 3. Key thermal parameters (TGA and DSC) of the studied carbon materials

Образец Sample	Температура, °C Temperature, °C			Содержание углерода, % Carbon content, %
	начала окисл. the beginning of oxidation	конца окисл. the ends are oxidized	max ДСК-пика max DSC peaks	
№ 1	665,6	957,8	813,3	5,81
№ 2	615,7	766,1	709,1	76,28
№ 3	695,6	1034,1	963,3	86,49
№ 4	614,7	978,7	835,3	96,45

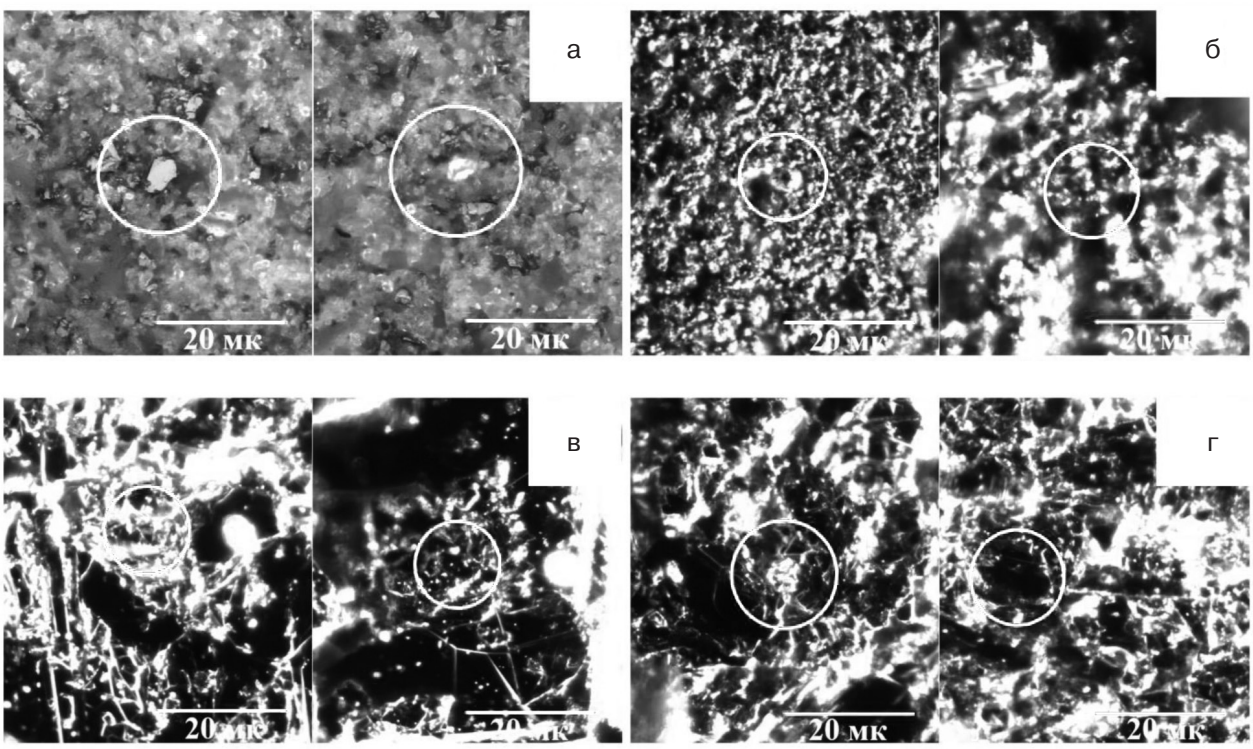


Рис. 4. Оптические микрофотографии образцов с указанием точек проведения спектроскопии КРС:
а – образец № 1, б – образец № 2, в – образец № 3, г – образец № 4

Fig. 4. Optical microphotographs of the samples showing the Raman spectroscopy measurement points:
a – sample № 1, b – sample № 2, c – sample № 3, d – sample № 4

Спектроскопия КРС, полученная в нескольких точках образца (рис. 4, а), также выявила неоднородность степени упорядочения графита.

На рис. 5, а представлены спектры КРС, а полученные сведения позиций основных пиков графитовой фазы и рассчитанные значения интегральных интенсивностей (I_D/I_G) пиков D и G сведены в табл. 4. Спектры демонстрируют широкий диапазон структурных состояний – от зон с исключительно высокой степенью совершенства ($I_D/I_G \rightarrow 0$) до областей с сильным разупорядочением ($I_D/I_G = 0{,}56$).

Для количественной оценки структурного совершенства графита традиционно используется отношение интегральных интенсивностей D- и G-пиков (I_D/I_G). G-полоса (~1580 $см^{-1}$) соответствует колебаниям атомов углерода в идеальной гексагональной решетке и присутствует во всех графитоподобных материалах. D-полоса (~1350 $см^{-1}$), напротив, является индикатором дефектности: ее интенсивность возрастает при нарушении дальнего порядка – наличии краев кристаллитов, точечных дефектов, гетероатомов или иных искажений решетки. Соответственно, чем меньше значение I_D/I_G, тем выше структурное совершенство и больше размер кристаллитов, и наоборот [Tuinstra, Koenig, 1970; Ferrari, Robertson, 2000]. Таким образом, регистрируемые значения I_D/I_G от 0 до 0,56 отражают широкий спектр структурных состояний углерода – от практически идеального монокристаллического графита до сильно дефектного нанокристаллического материала.

В части микрозон наблюдаются спектры, характерные для структурно совершенного графита: присутствует лишь узкий G-пик и интенсивный 2D-пик при полном отсутствии D-пика, что указывает на минимальное количество дефектов. Помимо этого, идентифицированы зоны с умеренной дефектностью, где в спектрах четко наблюдаются как D-, так и G-пики графита с характерным соотношением их интенсивностей. В этих же областях зарегистрированы спектральные линии минеральных примесей, в частности, кварца (~463 $см^{-1}$).

Для оценки эффективности химического обогащения был исследован образец № 2, полученный после обработки исходного природного графита плавиковой кислотой (HF). Сравнительный анализ выявил существенное влияние кислотной обработки на фазовый состав и структурные характеристики углеродной фазы.

Таблица 4. Позиции основных пиков в спектрах КРС, отношение интегральных интенсивностей (I_D/I_G) пиков D и G

Table 4. Positions of the main peaks in the Raman spectra and the integral intensity ratio (I_D/I_G) of the D and G peaks

Образец Sample	Позиция, $см^{-1}$ Position, cm^{-1}				(I_D/I_G)
	D	G	2D	D’	
№ 1	–	1578,7	2706,0	–	0
	1316,0	1581,0	–	–	0,56
№ 2	1350,9	1573,7	2699,6		0,17
	1353,3	1577,7	2704,8		0,21
№ 3	1352,4	1580,8	2709,5		0,04
	1350,9	1580	2711,7		0,22
№ 4	1334,5	1578,9	2717,0		0,01
	1346,3	1579,9	2716,0		0,18

Результаты рентгенофазового анализа образца № 2 (см. рис. 2, б) выявили кардинальное изменение фазового состава. Обработка плавиковой кислотой приводит к уменьшению содержания породообразующих минералов, что свидетельствует о высокой эффективности HF по отношению к силикатным и сульфидным фазам. Кроме того, идентифицирована новая фаза (см. табл. 2) – виллиомит, который является вторичным продуктом реакции взаимодействия кислоты с полевыми шпатами. Наблюдаемое преимущественное замещение метастабильной ромбоэдрической модификации (β-графит) стабильной гексагональной

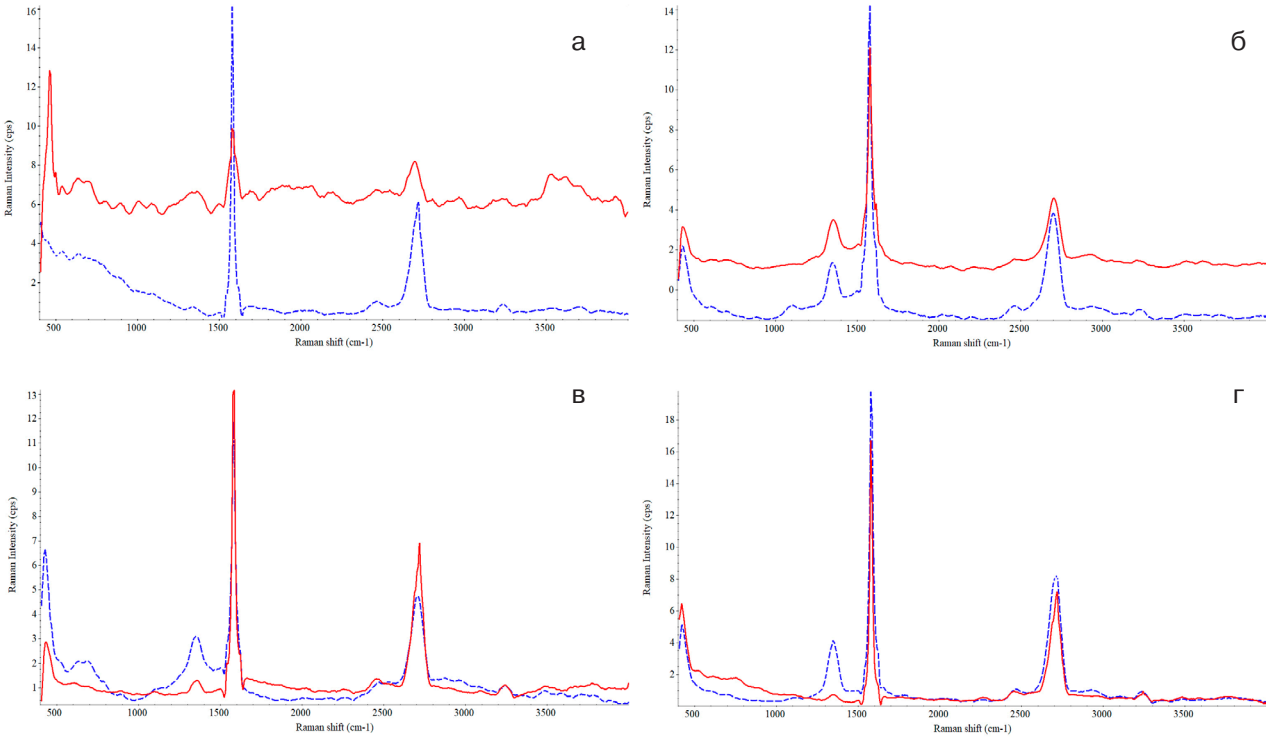


Рис. 5. Спектры КРС образцов, демонстрирующие структурное состояние углеродной фазы в разных точках (— точка 1, – – точка 2): а – образец № 1, б – образец № 2, в – образец № 3, г – образец № 4

Fig. 5. Raman spectra of the samples demonstrating the structural state of the carbon phase at different measurement points (— point 1, – – point 2): a – sample no. 1, б – sample no. 2, в – sample no. 3, г – sample no. 4

(α-графит), вероятно, связано с процессом перекристаллизации в ходе химической обработки. Для углеродной фазы рассчитаны структурные параметры (см. табл. 2). Установлено, что межплоскостное расстояние существенно превышает теоретическое значение для идеального α-графита (~0,335 нм). Такое увеличение является характерным признаком турбостратной упаковки графеновых слоев, при которой нарушается их четкая ориентация друг относительно друга. Вклад в увеличение d_{002} также могут вносить остаточные межслоевые примеси и дефекты. Рассчитанное значение размера кристаллитов L_c соответствует нанокристаллическому строению, однако, превышает таковое значение для исходного образца (4,2 нм), что свидетельствует об устранении части дефектов и упорядочении структуры в процессе очистки. Степень графитизации осталась в интервале, характерном для частично графитизированного углерода.

Данные СТА (см. рис. 3) подтвердили изменение фазового состава. Термограмма образца № 2 отличается от термограммы исходного графита, как по количеству, так и по характеру тепловых эффектов, что отражает формирование новых фаз.

На кривой ДСК четко наблюдаются два эндотермических эффекта (см. табл. 3) до ~150 °С, которые соответствуют процессам удаления воды. Интенсивный экзотермический эффект с максимумом при 709,1 °С сопровождается основной потерей массы и представляет собой сложный процесс окисления основной массы α-графита. Важным наблюдением является наличие на кривой ДСК плеча в области ~650 °С, который соответствует окислению остаточных углеродных фаз с более высокой дефектностью или иным типом упаковки слоев, что согласуется с гипотезой о превращении β-графита в более устойчивую фазу графита – α-графит. Экзотермический пик при 279,2 °С может быть связан с окислением органических соединений. На кривых ТГ наблюдался ступенчатый характер потери массы (суммарно 76,28 %), который отражает разложение новообразованных фаз, а высокая остаточная масса обусловлена наличием виллиомита и оксидами.

Структурная неоднородность образца № 2, визуально наблюдаемая на рис. 4, б, была детально исследована методом КРС. На рис. 5, б представлены спектры КРС, зарегистрированные в указанных точках, которые также показывают структурную неоднородность образца. В частности, наблюдаются зоны со спектрами, характерными для графитов с высоким структурным порядком и умеренным уровнем дефектов (см. табл. 4). Также присутствует промежуточный тип спектра, соответствующий микрокристаллическому графиту со средней степенью упорядоченности.

Для переработки природного графита также применяются промышленные методы. В рамках данного исследования был изучен образец, обогащенный по стандартной технологии во ВНИИнеруде (г. Тольятти) (образец № 3) [Бискэ, Скамницкая, 2018]. Сравнительный анализ с исходным образцом (образец № 1) позволил оценить эффективность данной технологии в повышении содержания углеродной фазы и изменении ее структурных характеристик.

По данным РСА и рентгенофазового анализа (см. рис. 2, в), суммарная доля углеродных фаз в образце возросла до 96,1 % по сравнению с 64,3 % в исходной руде (см. табл. 2). Расчетные структурные параметры углеродной фазы свидетельствуют о ее глубоком структурном разупорядочении. Межплоскостное расстояние превышает значения как для идеального β-графита (~0,344 нм), так и для α-графита (~0,335 нм). Такое увеличение, наряду с малым размером кристаллитов, является характерным признаком турбостратной упаковки слоев с высокой плотностью дефектов. Степень графитизации (g) соответствует сильно разупорядоченному (турбостратному) углероду. Обработка позволила значительно снизить содержание основных примесей: доля кварца уменьшилась, а полевые шпаты, сульфиды и биотиты, присутствовавшие в исходном образце, были полностью удалены, что свидетельствует об эффективности данной технологии в отношении породообразующих минералов. При этом в составе образца № 3 обнаружена металлическая фаза железа, которая может являться как продуктом преобразования биотитов и сульфидов в процессе обогащения, так и техногенной примесью (например, продуктом износа оборудования).

Данные СТА (см. рис. 3) согласуются с результатами РСА и наглядно демонстрируют эффективность промышленного обогащения. На кривой ДСК наблюдается единственный интенсивный экзотермический пик (см. табл. 3), с плечом в области ~820 °С, который соответствует процессу окисления углеродной фазы. Кривая ТГ продемонстрировала три ступени потери массы. Незначительные потери на первых двух ступенях (0,08 % и 1,64 %) могут быть связаны с удалением воды с поверхности или удалением следовых органических примесей. Основная масса теряется на третьей ступени, что напрямую связано с окислением углерода. Суммарная потеря массы хорошо коррелирует

с высоким содержанием углеродной фазы (90,0 %), установленным методом РСА. Низкая остаточная масса (11,73 %) подтверждает эффективное удаление минеральных примесей в процессе обогащения, в первую очередь – кварца.

Структурная неоднородность образца № 3 (см. рис. 4, в) была исследована методом КРС. На рис. 5, в представлены спектры КРС, зарегистрированные в указанных точках, которые показывают принципиальные различия в составе и строении углеродной фазы в различных микрозонах образца (табл. 4).

В первой зоне наблюдается спектр с доминирующей острым G-пиком и минимальным отношением интенсивностей D- и G-пиков, что свидетельствует о присутствии участков графита с практически идеальной кристаллической решеткой. Спектр второй зоны контрастен первой и характеризуется интенсивными, но уширенными D- и G-пиками. Значительно более высокое отношение их интенсивностей указывает на область с высокой концентрацией дефектов в углеродной матрице. На всех полученных спектрах идентифицирован пик, соответствующий кварцу, что подтверждает наличие данной минеральной примеси во всем исследованном объеме материала.

Результаты РФА графитового концентрата (образец № 4), представленные на рис. 3, г, демонстрируют его высокую степень очистки. Дифрактограмма характеризуется интенсивными и резкими рефлексами, соответствующими преимущественно α-графиту (см. табл. 2). Идентифицирована лишь фаза кварца и незначительное содержание β-графита. Рассчитанные структурные параметры углеродной фазы показывают, что межплоскостное расстояние близко к значению идеального α-графита, незначительное увеличение d_{002} относительно теоретического значения (~0,335 нм) может быть связано с остаточной турбостратной упаковкой слоев, характерной для природных графитов. Размер кристаллитов указывает на наноразмерность вдоль оси «c», а рассчитанная степень графитизации на высокий уровень кристаллического совершенства. Количественный анализ подтвердил, что доля стабильной углеродной фазы в данном концентрате достигает 94,4 %, что делает его наиболее чистым материалом среди всех исследованных образцов.

Данные СТА (см. рис. 3), полученные при нагреве до 1200 °С, полностью коррелируют с выводами РСА о высокой чистоте концентрата. На кривой ДСК наблюдаются два экзотермических эффекта (см. табл. 3). Слабый пик при 299,0 °С может быть связан с окислением небольшого количества аморфного углерода или органических примесей. Доминирующий интенсивный экзотермический пик, сопровождающийся потерей 96,45 % массы, соответствует окислению основной массы кристаллического графита. Суммарная выгоревшая масса хорошо согласуется с содержанием углеродной фазы, установленным методом РСА. Крайне низкая остаточная масса (3,04 %) подтверждает эффективность удаления минеральных примесей.

Методом КРС детально исследована визуально наблюдаемая структурная неоднородность образца на рис. 4, г. Анализ выявил гетерогенность даже в высокоочищенном концентрате, представленную участками с принципиально различным строением.

Зарегистрированы спектры (рис. 5, г), характерные для практически идеального графита с исключительно низким уровнем дефектов и полным отсутствием посторонних фаз (см. табл. 4). В других зонах наблюдается сильно дефектная углеродная фаза с более высокой плотностью нарушений в кристаллической решетке. Общим для всех исследованных областей является присутствие пика кварца (~426 $см^{-1}$).

Полученные данные убедительно доказывают, что даже наиболее эффективное обогащение не устраняет полностью микронеоднородность природного графита. Концентрат представляет собой сложный материал, содержащий как зоны исключительного структурного совершенства, так и области с развитой дефектной структурой, что определяет его свойства и потенциальные области применения.

Выводы

Комплексное применение рентгенофазового анализа, синхронного термического анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света показало высокую информативность данных методов для установления фазового состава, количественного содержания углерода и структурных характеристик природного графита Ихальского месторождения и продуктов его обогащения.

Установлено, что исходный природный графит («Ихала-1») характеризуется сложным фазовым составом с низким содержанием углеродной фазы, представленной β-графитом (18,2 %) и α-графитом (46,1 %), а также значительной долей минеральных примесей: кварца (10,5 %), полевого шпата (14,7 %), сульфидов (8,2 %) и биотитов (2,4 %), что обусловливает необходимость его обогащения.

Различные методы обогащения по-разному влияют на фазовый состав и структуру конечного продукта:

а) химическое обогащение (плавиковая кислота) уменьшает количество минеральных примесей в образце, снижает содержание β-графита до 0,8 % и увеличивает содержание гексагонального графита до 76,5 %;

б) промышленное флотационное обогащение (ВНИИнеруд, г. Тольятти) позволяет получить концентрат с содержанием углерода > 90,0 % с преобладанием гексагональной модификации графита;

в) разработанная методика Н. С. Бискэ (КарНЦ РАН) [Бискэ, 1977] обеспечивает получение наиболее чистого концентрата (95 % углерода), представленного преимущественно α-графитом с высокой структурной упорядоченностью.

Также установлена корреляция между данными РСА, СТА и КРС. Показано, что суммарная выгоревшая масса при окислении (по данным ТГ) хорошо согласуется с содержанием углеродной фазы, определенным методом РСА.

Структурно-фазовые характеристики находятся в прямой связи с геологическими условиями формирования Ихальского месторождения. Выявленная микронеоднородность, тесное нахождение графита с кварцем, сульфидами железа, полевыми шпатами и биотитами, а также одновременное существование полиморфных модификаций графита (α- и β-графит) являются прямым отражением метаморфогенного происхождения руд в процессе регионального метаморфизма углеродсодержащих толщ.

Комплекс полученных данных характеризует технологические свойства сырья. В частности, все три обогащенных образца (№ 2, № 3, № 4) имеют размер кристаллитов L_c в диапазоне 4,88–6,07 нм, что соответствует рекомендуемому диапазону для использования в качестве прекурсоров для получения малослойного графена (5–30 нм) [Mori et al., 2018]. Наиболее перспективным в этом отношении является образец № 3, который демонстрирует турбостратную структуру с максимальным межплоскостным расстоянием (0,346 нм) и наименьшим размером кристаллитов (4,88 нм). Однако присутствие металлической фазы железа (4,7 %) требует дополнительной очистки.

Проведенные исследования доказывают, что для комплексной оценки структуры и свойств природного графита необходимо сочетание РСА, СТА и КРС методов анализа. Установленная связь между особенностями вещественного состава и геологической историей месторождения позволяет не только оптимизировать технологии обогащения графитового сырья, но и прогнозировать структурно-фазовые характеристики концентратов в зависимости от генетического типа руд.

Литература

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

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

Балтыбаев Ш. К., Левченков О. А. Вулканиты 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.

Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В. и др. Геология и петрология свекофеннид Приладожья. СПб.: Изд-во 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.

Бискэ Н. С. Оптимальные условия обогащения и возможности применения кристаллического графита [Текст]. Петрозаводск, 1977. [3] с. (Информ. листок о науч.-техн. достижении / Карельский МТЦНТИ; № 76–77).

Бискэ Н. С. Графитовое оруденение Северного Приладожья (геология и генетические особенности). Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. 172 с.

Бискэ Н. С., Колодей В. А. КР-спектры графита из месторождений и проявлений Приладожья // Проблемы и перспективы современной минералогии (Юшкинские чтения–2014). Сыктывкар, 2014. С. 94–95.

Бискэ Н. С., Скамницкая Л. С. Графитовые руды Карелии: обогатимость и перспективы промышленного использования // Разведка и охрана недр. 2018. № 12. С. 33–40.

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

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

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

Кононов В. А. Графит: рынок, добыча, свойства, применение // Новые огнеупоры. 2021. № 3. С. 3–10. doi: 10.17073/1683-4518-2021-3-3-10

Кузьмичева Г. М. Теория плотнейших шаровых упаковок и плотных шаровых кладок. М.: Изд-во МГУ, 2000. 36 с.

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

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Графит // Инструкция утверждена распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р. М.: ФГУ ГКЗ, 2007. 30 с. + 1 прил. URL: https: //www.geokniga.org›geokniga-metrek-grafit

Минерально-сырьевая база Республики Карелия / Ред. В. П. Михайлов, В. Н. Аминов. Петрозаводск: Карелия, 2006. Кн. 2. 356 с.

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

Недра Северо-Запада Российской Федерации / В. А. Коровкин, Л. В. Турылев, Д. Г. Руденко, В. А. Журавлев, Г. Н. Ключникова. СПб.: Изд-во СПб фабрики картографии ВСЕГЕИ, 2003. 520 с.

Островский В. С., Виргильев Ю. С., Костиков В. И., Шипков Н. Н. Искусственный графит. М.: Металлургия, 1986. 272 с.

Скамницкая Л. С., Бискэ Н. С. Графитовые руды Ихальского месторождения: основные природные типы и их технологическая оценка // Горный журнал. 2019. № 3. С. 55–60. doi: 10.17580/gzh2019.03.11

Солонинкина М. В., Логинов Д. В., Мошкалев С. А., Рожкова Н. Н. Анализ структуры бразильского графита посредством методов рентгеновской дифракции, растровой электронной микроскопии и термогравиметрического анализа с синхронной дифференциальной сканирующей калориметрией // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2025. № 4. С. 11–19. doi: 10.31857/S1028096025040026

Типовые нормы выработки на производство графита / разраб. ВНИИнеруд; утв. М-вом пром-сти строит. материалов СССР 12.09.1984. Тольятти: ВНИИнеруд, 1984. 18 с.

Цыбуля С. В., Черепанова С. В. Введение в структурный анализ нанокристаллов. Новосибирск: НГУ, 2009. 59 с.

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

Щипцов В. В., Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С. Теория и практика обогащения минерального сырья Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 9. С. 183–196.

Щипцов В. В., Бурцев И. Н., Жиров Д. В. и др. Промышленные минералы севера европейской части России // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 6. С. 7–35. doi: 10.17076/them1267

Щипцов В. В. Графитоносные рудные районы Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 2. С. 33–49. doi: 10.17078/geo1551

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., Ковалевский В. В. Сравнительное исследование графитов месторождений Завальевское (Украина) и Ихальское (Республика Карелия, Россия) // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов. Плаксинские чтения–2024. Апатиты: КНЦ РАН, 2024. С. 115–118. doi:10/37614/978-5-91137-532-2

Щипцов В. В., Светов С. А. Минерально-сырьевая база Карелии: промышленные минералы // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 5–44. doi: 10.17016/geo2208

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

Ekdahl E. Early proterozoic Karelian and Svecofennian formations and the Evolution of the Raahe-Ladoga Ore Zone, based on the Pielavasi area, central Finland // Geol. Surv. of Finland. Bull. 1993. no. 173. 137 p.

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. P. 56.

Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Physical review B. 2000. Vol. 61, no. 20. C. 14095.

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., Wanvik J. E. The graphite shchists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway // Report NGU no. 2016.10. 2016.

Leading Edge Materials. Wohna graphite. 2018. URL: https: // leadingedgematerialscom/woxna-graphite / Accessed 27 October 2019

Mori F., Kubouchi M., Arao Y. Effect of graphite structures on the productivity and quality of few-layer graphene in liquid-phase exfoliation // Journal of materials science. 2018. Vol. 53, no. 18. P. 12807–12815.

Palosaari J., Latonen R.-M., Smått J.-H. et al. 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.

Rønning J. S., Gautneb H., Larsen B. E. et al. Geophysical and geological investigations of graphite occurrences in Vesterålen and Lofoten, Northern Norway 2017 // NGU report 2018.011. Geological Survey of Norway. 2018.

Tuinstra F., Koenig J. L. Raman spectrum of graphite // The Journal of chemical physics. 1970. Vol. 53, no. 3. P. 1126–1130.

Wong C. H. A., Sofer Z., Pumera M. Geographical and geological origin of natural graphite heavily influence the electrical and electrochemical properties of chemically modified graphenes // Chemistry–A European Journal. 2015. Vol. 21, no. 23. P. 8435–8440.

References

Baltybaev Sh. K., Glebovitsky V. A., Kozyreva I. V., Shul'diner V. I. The Meyersky Thrust as the main structural element of the suture at the boundary between the Karelian Craton and the Svecofennian Complex in the Ladoga region, Baltic Shield. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences.* 1996;348(3):353–356. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K. Fluid inclusions and P-T conditions of leucosome formation in sodic migmatites of the granulite facies in the Ladoga region (South Karelia). *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva = Zapiski of the Russian Mineralogical Society.* 2002; CXXXI(5):22–39. (In Russ.)

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

Baltybaev Sh. K., Glebovitsky V. A., Kozyreva I. V. et al. Geology and petrology of the svecofennides of the Ladoga region. St. Petersburg: St. Petersburg State University Press; 2000. 200 p. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K., Levsky L. K., Levchenkov O. A. The Svecofennian Belt of Fennoscandia: spatiotemporal correlation of Early Proterozoic endogenous processes. Moscow: Nauka; 2009. 276 p. (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

Biske N. S. Optimal enrichment conditions and the possibility of using crystalline graphite. Information leaflet on scientific and technical achievements. Karelian Intersectoral Territorial Centre for Scientific and Technical Information and Propaganda. No. 76–77. Petrozavodsk: 1977. 3 p. (In Russ.)

Biske N. S. Graphite mineralization of the Northern Ladoga region (geology and genetic features). Petrozavodsk: Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1987. 172 p. (In Russ.)

Biske N. S., Kolodey V. A. Raman spectra of graphite from deposits and occurrences in the Ladoga region. Problems and perspectives of modern mineralogy (Yushkin Readings – 2014). Syktyvkar; 2014. P. 94–95. (In Russ.)

Biske N. S., Skamnitskaya L. S. Graphite ores of Karelia: beneficiation and prospects for industrial use. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2018;12:33–40. (In Russ.)

Ekdahl E. Early Proterozoic Karelian and Svecofennian formations and the evolution of the Raahe-Ladoga ore zone, based on the Pielavesi area, central Finland. *Geol. Surv. of Finland. Bull*. 1993;173:137.

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. 56 p.

Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*. 2000;61(20):14095.

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 shists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway. NGU Report no. 2016.10. Geological Survey of Norway. 2016.

Glebovitsky V. A., Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A. et al. Time, duration, and P-T parameters of the polystage metamorphism of the Ladoga region Svecofennides: results of isotopic dating. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2001;377(5):667–671. (In Russ.)

Kononov V. A. Graphite: market, mining, properties, application. *Novye ogneupory = New Refractories*. 2021;3:3–10. (In Russ.). doi: 10.17073/1683-4518-2021-3-3-10

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

Kuz'micheva G. M. Theory of densest sphere packings and dense sphere assemblages. Moscow: Moscow State University Press; 2000. 36 p. (In Russ.)

Leading edge materials. Woxna graphite. 2018. URL: https://leadingedgematerials.com/woxna-graphite (accessed 27.10.2019).

Methodological guidelines for the application of the classification of reserves of deposits and predicted resources of solid minerals. Graphite. Instruction approved by order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 37-r dated 05.06.2007. Moscow: FSI GKZ; 2007. 30 p. (In Russ.). URL: https://www.geokniga.org/geokniga-metrek-grafit

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

Mori F., Kubouchi M., Arao Y. Effect of graphite structures on the productivity and quality of few-layer graphene in liquid-phase exfoliation. *Journal of Materials Science*. 2018;53(18):12807–12815.

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

Ostrovskii V. S., Virgil'ev Yu. S., Kostikov V. I., Shipkov N. N. Artificial graphite. Moscow: Metallurgiya; 1986. 272 p. (In Russ.).

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

Rønning J. S., Gautneb H., Larsen B. E. et al. Geophysical and geological investigations of graphite occurrences in Vesterålen and Lofoten, Northern Norway 2017. NGU Report 2018.011. Geological Survey of Norway. 2018.

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

Shul'diner V. I., Baltybaev Sh. K., Kozyreva I. V. Tectonic-metamorphic zoning of the Ladoga region. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta = Vestnik of St. Petersburg University*. 1997;3(7):63–70. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Kameneva E. E., Skamnitskaya L. S. Theory and practice of mineral raw materials beneficiation in Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2006;9:183–196. (In Russ.)

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

Shchiptsov V. V. Graphite-bearing ore regions of the Fennoscandian Shield. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2022;2:33–49. (In Russ.). doi: 10.17078/geo1551

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Nikiforov A. G., Frolov P. V. Mineralogical and technological features of graphite ores of the Fennoscandian Shield. *Technological mineralogy in the assessment of the quality of mineral raw materials of natural and technogenic origin*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS; 2022. P. 16–23. (In Russ.). doi: 10.17076/tm14_32

Shchiptsov V. V., Kovalevskii V. V. Comparative study of graphites from the Zavalievskoe (Ukraine) and Ikhal (Republic of Karelia, Russia) deposits. *Innovative processes of beneficiation and deep processing of rare metal, mining-chemical raw materials and complex ores of non-ferrous and ferrous metals. Plaksin readings – 2024*. Apatity: KSC RAS; 2024. P. 115–118. (In Russ.). doi: 10/37614/978-5-91137-532-2

Shchiptsov V. V., Svetov S. A. Mineral resource base of Karelia: industrial minerals. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2026;2:5–44 (In Russ.)

Skamnitskaya L. S., Biske N. S. Graphite ores of the Ikhal deposit: main natural types and their technological assessment. *Gornyi Zhurnal.* 2019;3:55–60. (In Russ.). doi: 10.17580/gzh.2019.03.11

Soloninkina M. V., Loginov D. V., Moshkalev S. A., Rozhkova N. N. Analysis of the structure of Brazilian graphite using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and thermogravimetric analysis with synchronous differential scanning calorimetry *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2025;4:11–19. (In Russ.). doi: 10.31857/S1028096025040026

Standard output norms for graphite production: developed by VNIInerud; approved by the Ministry of the Construction Materials Industry of the USSR, dated 12.09.1984. Tolyatti: VNIInerud; 1984. 18 p. (In Russ.)

Teten'kin D. D., Kazanov O. V. (eds.). State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023. Moscow: FGBU VIMS; 2024. 710 p. (In Russ.)

Tsybulya S. V., Cherepanova S. V. Introduction to structural analysis of nanocrystals. Novosibirsk: NGU; 2009. 59 p. (In Russ.)

Tuinstra F., Koenig J. L. Raman spectrum of graphite. *The Journal of Chemical Physics*. 1970;53(3):1126–1130.

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

Wong C. H. A., Sofer Z., Pumera M. Geographical and geological origin of natural graphite heavily influence the electrical and electrochemical properties of chemically modified graphenes. *Chemistry–A European Journal*. 2015;21(23):8435–8440.

Поступила в редакцию / received: 27.04.2026; принята к публикации / accepted: 09.09.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Солонинкина Мария Васильевна

инженер-физик

e-mail: mas31393@yandex.ru

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

Логинов Дмитрий Владимирович

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого тела

e-mail: logindm@mail.ru

Рожкова Наталья Николаевна

д-р хим. наук, заведующая лабораторией физико-химических исследований наноматериалов

e-mail: rozhkova@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Soloninkina, Maria

Physics Engineer

Shchiptsov, Vladimir

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

Loginov, Dmitry

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof.

Rozhkova, Natalya

Dr. Sci. (Chem.), Head of Laboratory