

**Вариант 2.** При обследовании установлено:  $Q_1 = Q_0$ ;  $H_{ст1} = H_{ст}$ ;  $H_{д1} > H_{д}$ ;  $S_1 > S_0$ ;  $q_1 < q_0$ , содержание песка в откачиваемой воде  $C_1$  соответствует содержанию песка в начальный момент при включении скважин в эксплуатацию  $C_0$ . На основании полученных результатов можно сделать вывод, что имеет место кольматация фильтра и прифильтровой зоны скважины и при  $q_1$ , равном  $0,7-0,8 q_0$ , необходимо производить профилактическую регенерацию для восстановления первоначального удельного дебита. Ремонт насоса в данном случае не требуется.

**Вариант 3.**  $Q_1 < Q_0$ ;  $H_{ст1} < H_{ст}$ ;  $H_{д1} < H_{д}$ ;  $S_1 = S_0$ ;  $q_1 = q_0$ ;  $C_1 = C_0$ . Такой результат обследования свидетельствует о сработке запасов подземных вод, и требуемая производительность может быть обеспечена установкой насоса ниже в стволе скважины, в виде исключения — в интервале расположения фильтра. Ремонт насоса и восстановительных работ на скважине в этом случае не требуется.

**Вариант 4.**  $Q_1 < Q_0$ ;  $H_{ст1} = H_{ст}$ ;  $H_{д1} > H_{д}$ ;  $S_1 < S_0$ ;  $q_1 = q_0$ ;  $C_1 = C_0$ . Снижение дебита и уменьшение понижения уровня связаны в данном случае с неисправностью насоса. В этих условиях необходимо произвести ремонт насоса; целесообразность же восстановительных работ устанавливается при опробовании в случае  $S_1 = S_0$  и достижении соответствия полученного удельного дебита первоначальному.

**Вариант 5.**  $Q_1 < Q_0$ ;  $H_{ст1} = H_{ст}$ ;  $H_{д1} > H_{д}$ ;  $S_1 > S_0$ ;  $q_1 < q_0$ ;  $C_1 = C_0$ . Снижение удельного дебита обусловлено кольматацией фильтра, но возможна и неисправность в работе насоса. Необходимо демонтировать насос, проверить его и устранить неполадки; установить степень заилиения фильтра и прочистить его. При отсутствии заилиения фильтра осуществить регенерацию фильтра скважины.

**Вариант 6.**  $Q_1 = 0$ ;  $H_{ст1} = H_{д}$ . Обследование свидетельствует о неисправности насоса, его следует отремонтировать или заменить.

**Вариант 7.** Скважина работает при пульсирующем режиме подачи воды,  $H_{ст1} = H_{ст}$ ;  $H_{д1} > H_{д}$ ;  $S_1 > S_0$ ;  $q_1 < q_0$ ;  $C_1 = C_0$ . Насос скважины работает «на хруп», что может являться следствием существенной кольматации фильтра и прифильтровой зоны, а в случае  $C_1 > C_0$  — и заилиения фильтра. Несмотря на отсутствие в этом случае надежных данных об удельном дебите скважины водоподъемное оборудование необходимо демонтировать, проверить степень заилиения, прочистить, отремонтировать, ликвидировав источники поступления песка. При отсутствии заилиения и пескования скважина подлежит регенерации.

Полученные варианты позволяют принимать оптимальные решения по дальнейшей эксплуатации или ремонту каждой конкретной скважины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, В. С. Фильтры буровых скважи. — Ростов-на-Дону: Феникс, 1967. — 344 с.
2. Третьяк, А.Я. Техника и технология сооружения гидрогеологических скважин / А.Я. Третьяк, В.Ф. Чихоткин, А.П. Павлунишин — Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2006. — 408 с.
3. Федоров, Ю.С. Предупреждение кольматации фильтров гидрогеологических скважин // Ю.С. Федоров, А.А. Петров // Разведка и экран недр. — 1974. — № 7. — С. 56–58.
4. Фоменко, В.И. Подбор и расчет фильтров дренажных и водозаборных скважин / Мелиорация, гидротехника и водоснабжение, вып. 3. — Горки: изд. БСХА, 1975.
5. Black, J.M. Observation well response time and its effect upon aquifer test results / J.M. Black, K.L. Kipp. // J. Hydrol. — 1977. — Vol. 34. — P. 297–306.
6. Ryckborst, M. Optimum well sampling distance of ground water levels in till and coversands, deerinkbeck catehment area, the Netherlands / M. Ryckborst, A. Lousink // Geol. en Mijnbonn. — 1980. — Vol. 59. — N 1. — P. 43–48.
7. Van Beek, C. D. E. M. Sulfate-Reducing bacteria in Ground water from clogging and nonclogging shallow wells in the Netherlands River region / C. D. E. M. Van Beek, D. Van der Kooij // Ground Water. — Vol. 20. — N 3. — 1982. — P. 298–302.

© Третьяк А. А., Швец В.В., 2018

Третьяк Александр Александрович // 13050465@mail.ru  
Швец Виталий Владимирович // 13050465@mail.ru

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК: 550.8 + 552+622.1

Бискэ Н.С., Скамницкая Л.С. (Институт геологии Карельского научного центра РАН)

### ГРАФИТОВЫЕ РУДЫ КАРЕЛИИ: ОБОГАТИМОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В Карелии установлены основные природные типы графитовых руд: крупночешуйчатого, мелкочешуйчатого графита с примесью скрыто- и плотнокристаллической разновидности графита. Выделены генетические и технологические типы руды. Установлена их обогатимость и возможные направления использования в промышленно-

сти. Промышленный интерес представляет Ихальское месторождение крупночешуйчатого графита — одно из крупнейших в Европе по разведанным запасам. **Ключевые слова:** графит, обогатимость графита, технологические показатели, месторождение, минерально-сырьевая база.

Biske N.C., Skamnitskaya L.S. (Institute of Geology Karelian research centre RAS)

### GRAPHITE ORES IN KARELIA: DRESSABILITY AND PROSPECTS FOR INDUSTRIAL USE

The main natural types of graphite ores (coarseflake, fineflake graphite with an admixture of a crypto- and dense crystalline variety graphite) are found in Karelia. Genetic and technological types of ore are distinguished. Their enrichment and

*possible directions of use in industry are established. Ihala deposit of coarseflake graphite has commercial assessment. It is one of the largest in Europe by proven mineral reserve. Key-words: graphite, enrichment of graphite, technological enrichment indicators, deposit, mineral resource base.*

Благодаря уникальному сочетанию свойств (термостойкость, прочность и химическая стабильность, высокая тепло- и электропроводность, пластичность) графит применяется в различных промышленных отраслях. Рынок графита проявляет устойчивый ускоренный рост. Наряду с традиционными появляются новые перспективные области использования природного графита: в производстве литиевых аккумуляторов, топливных элементов, терморасширенного графита и ядерных реакторов «Pebble Bed» [15]. Высокотехнологичные отрасли предъявляют особые требования к крупности помола и чистоте графита. Наиболее ценными и легкообогатимыми являются руды чешуйчатого и плотнокристаллического графита, которые считаются промышленными при содержании в них свыше 2–3% полезного компонента. Графит извлекают путем обогащения преимущественно методом флотации. Общего стандарта на графит и руды не существует. Технические требования различаются в зависимости от типа руды и области использования.

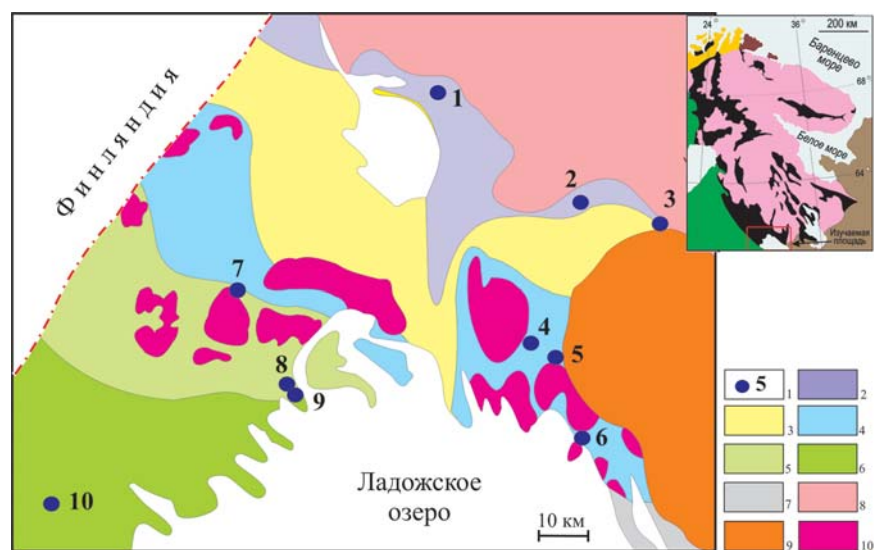
В настоящее время большая часть потребности России в графите удовлетворяется за счет импорта. Отечественные месторождения кристаллического графита располагаются преимущественно в неосвоенных районах Сибири и Дальнего Востока. Единственное разрабатываемое месторождение чешуйчатого графита Тайгинское сложено бедными рудами (~3 % C), запасы которых близятся к истощению. Для обеспечения промышленности страны собственным высококачественным графитовым сырьем представляется необходимым вовлечь в разработку новые месторождения графита, приближенные к потребителям.

Карелия имеет выгодное географо-экономическое положение: развитая инфраструктура, близость к промышленным центрам Северо-Запада России, приграничное положение региона. В Карелии известны одно месторождение (Ихальское), 29 проявлений явно- и скрытокристаллического графита, а также небольшие графитовые залежи на Кительском месторождении и проявлениях редкометалльно-оловорудной скарново-грейзеновой формации [8]. Разработка графитовых руд в небольших объемах велась в Карелии в конце XIX — начале XX вв., обычно попутно с добычей других полезных ископаемых — железа, полиметаллов, жильного кварца. В настоя-

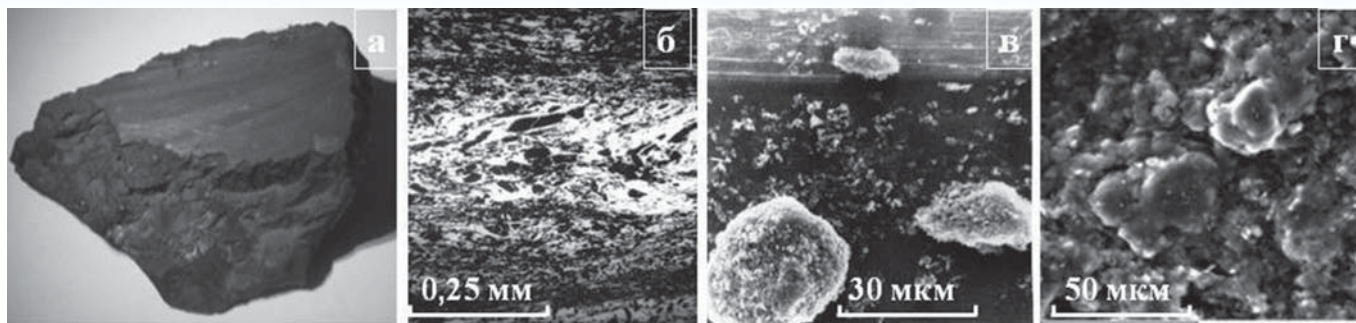
щее время графит на территории республики не добывается. Проявления графита сосредоточены преимущественно в юго-западных районах Карелии, на территории Северного Приладожья.

Область Северного Приладожья приурочена к сочленению докембрийского Карельского кратона с палеопротерозойским Свекофенским подвижным поясом и состоит из двух частей (доменов), различных по тектоническому строению и уровню прогрессивного регионального метаморфизма [1]. Характерными особенностями Северного домена, непосредственно примыкающего к Карельскому массиву, являются наличие выступов реоморфизованного архейского фундамента в виде окаймленных гранитогнейсовых куполов и развитие зонального низкоградиентного метаморфизма, степень которого возрастает в юго-западном направлении. Супракрупный комплекс раннего протерозоя представлен сортавальской (людиковий) и ладожской (калевий) сериями. Преобладающим развитием пользуются метатурбидиты ладожской серии. Проявления графита приурочены к графитоносным горизонтам вулканогенно-осадочной сортавальской серии и сгруппированы в три зоны. Северная зона в виде узкой субширотной полосы обрамляет Карельский массив, западная и восточная — гранитогнейсовые купола соответственно Сортавальской и Питкярантской группы.

Совершенство кристаллической структуры и размер выделений графита, а, следовательно, качество графитовых руд в значительной степени определяются степенью метаморфического преобразования. Скрытокристаллический графит развит в зоне биотита и граната,



**Рис. 1. Местоположение месторождений и проявлений графита на схеме метаморфической зональности Северного Приладожья.** Составлена с использованием материалов Д.А. Великославинского [4] и Ш.К. Балтыбаева с соавторами [1]: 1 — месторождения и проявления графита (1 — Соанлахти; 2 — Полвилампи; 3 — Майсула; 4 — Руокоярви; 5 — Кителя; 6 — Шварц; 7 — Туоксяярвинская группа; 8 — Вуорио; 9 — Красный победитель; 10 — Ихальская группа); 2 — 6 — метаморфические зоны: 2 — биотита и граната, 3 — ставролитовая, 4 — силлиманит-мусковитовая, 5 — силлиманит-ортоклазовая, 6 — мигматизации, гранитизации и ультраметаморфизма; 7 — платформенный чехол; 8 — нерасчлененный древний фундамент; 9 — граниты-рапакиви; 10 — реоморфизованный древний фундамент в гранитогнейсовых куполах



**Рис. 2. Руды скрытокристаллического графита:** а — графитовая руда, проявление Соанлахти; б — брекчиевидная текстура графитовой руды, проявление Майсула (шлиф, без анализатора); в — частицы и агрегаты частиц скрытокристаллического графита, проявление Майсула (ПЭМ, фото В.В. Ковалевского); г — графит, проявление Полвилампи, СЭМ

где уровень метаморфизма отвечает фации зеленых сланцев и эпидотовых амфиболитов (проявления Соанлахти — Майсула). Месторождения мелкочешуйчатого кристаллического графита в районе г. Питкяранта располагаются в пределах силлиманит-мусковитовой зоны. Сортавальская группа месторождений локализована преимущественно в силлиманит-калиевополевошпатовой метаморфической зоне (рис. 1).

Южный домен сложен глубоко метаморфизованными (до гранулитовой фации), сложно складчатыми породами, мигматизированными, гранитизированными и подвергшимися ретроградным изменениям. Пиковым условиям метаморфизма гранулитовой фации соответствуют значения  $T = 780\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $P = 5\text{--}6$  кБар. Для поздней стадии ретроградного метаморфизма определены  $T = 450\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $P = 2\text{--}4$  кБар [1]. Южный домен характеризуется широким развитием магматических пород различного состава и возраста. Наиболее распространены здесь метаморфические аналоги терригенных образований ладожской серии, выделенные в составе лахденпохской серии [13] или лахденпохского метаморфического комплекса [11]. В области развития ихальского амфиболит-графит-гнейсового метаморфического подкомплекса, рассматриваемого в качестве высокометаморфизованного аналога сортавальской серии, расположено Ихальское месторождение крупночешуйчатого графита.

Проявления скрытокристаллического графита расположены в Северном Приладожье и на севере Карелии (проявление Кукас). В районе Соанлахти — Майсула в составе мощных протяженных графитоносных пачек сортавальской серии установлены графитовые пласты и линзы мощностью до 30 м. Графитовые руды представлены преимущественно тонкозернистыми слюдяно-кварцевыми и кварц-слюдяными сланцами, нередко с заметным количеством полевых шпатов и амфибола. Содержание графита достигает в тонких прослоях 60 %, среднее содержание не превышает 30 %. Руды скрытокристаллического графита тонковкрапленные (рис. 2). Отмечается присутствие примеси плотной и мелкочешуйчатой разновидности. Методами рентгенографии углерод в породах неизменно диагностируется как графит, обладающий несовершенной кристаллической структурой [2]. На дифрак-

тограммах высокие порядки отражений типа 001 и hkl имеют слабую интенсивность или отсутствуют, отражение 002 отчетливо асимметричное. Графит обладает низкой степенью графитизации, межплоскостное расстояние ( $d_{002}$ ) составляет  $0,336\text{--}0,337$  нм; размер кристаллитов:  $L_a = 14\text{--}25$  нм;  $L_c = 40\text{--}91$  нм.

Проявления скрытокристаллического графита в северном обрамлении гранитогнейсовых куполов Сортавальской группы (район Рускеала — Харлу) отличаются малой мощностью и низким содержанием углерода (15–20 %), не выдержаны или не прослежены по простиранию. На сопредельной территории Финляндии запасы скрытокристаллического графита оцениваются в несколько миллионов тонн при содержании углерода в рудах около 30 масс. %. Однако в связи с высокой зольностью продуктов флотационного обогащения разработка месторождений признана нерентабельной [14, 16].

Руды скрытокристаллического графита с трудом поддаются обогащению флотационными методами. Применение схемы обогащения, включающей основную флотацию, одно доизмельчение и три операции перемешивания, позволило получить графитовый концентрат высокой зольности лишь из руды проявления Кукас, отличающейся повышенным содержанием кристаллического графита (табл. 1).

Как показали испытания, руды скрытокристаллического графита могут использоваться без обогащения в качестве наполнителя противопожарных покрытий. В лабораториях ЦНИИТМаша из руды Кукасозерского проявления были получены отливки, не уступающие по качеству отливкам, изготовленным с применением присыпок и паст, в состав которых входит литейный графит.

В настоящее время проявления скрытокристаллического графита с содержанием полезного компонента менее 70 % (в исключительных случаях 40 %) не рассматриваются как промышленные. Однако в связи с высоким потенциальным ресурсом черносланцевой формации на редкие и благородные металлы не исключена возможность их использования как попутного полезного ископаемого в будущем. На территории Приладожья графитовые сланцы вмещают молибден-ванадиевое оруденение [8] и урановую мине-

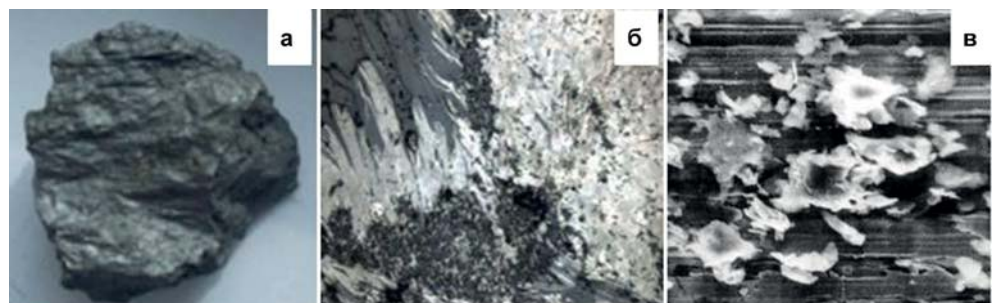
**Таблица 1**  
**Технологические показатели обогащения руд Карелии (Бискэ, 1986)**

Месторождение, рудопоявление (участок) графита	Содержание углерода, %		Извлечение углерода, %	Количество перечисток	Исполнитель
	в руде	в концентрате			
Майсульская группа графитопоявлений, Суоярвский район					
Соанлахти	23,5	53,8	34,0	3	ПГО «Уралгеология»
Питкярантская группа графитопоявлений, Питкярантский район					
Кительское	39,8	76,4	91,4	6	ВНИИнеруд, ПГО «Уралгеология»
Шварц	31,2	58,6	97,3	2	
Руокоярви	5,9	45,3	84,1	3	
Импилахти	3,5	81,5	94,0	4	
Сортавальская группа графитопоявлений, Сортавальский район					
Вуорио	2,8	77,1	Не опр.	5	ИГ КарНЦ РАН
Ихальская группа графитопоявлений, Лахденпохский район					
Северный	5,0	92,7	92,8	4	ПГО «Уралгеология» ИГ КарНЦ РАН
	2,9	91,2	93,4	5	
	2,8	92,2	92,3	5	
Западный	2,9	92,3	94,9	5	
	3,2	95,3	96,5	5	
	5,9	95,0	94,4	5	
Терварви	3,9	88,0-90,0	96,0	4	ВНИИнеруд
Лоухский район					
Кукаозеро	36,0	71,8	60,9	3	ПГО «Уралгеология»

рализацию [3]. В них установлены аномальные концентрации золота, серебра и платиноидов [6].

Проявления мелкочешуйчатого графита известны в Питкярантском и Сортавальском районах Карелии. Прогнозные ресурсы графита Питкярантского рудного района превышают 0,5 млн т при средних содержаниях от 7,2 до 20,3 % [9]. Пластообразные и линзовидные залежи небольшой мощности (0,5–5, иногда до 15 м) протяженностью до 590 м сложены графитовыми слюдяно-кварцевыми, кварцево-слюдяными, кварцево-слюдяно-полевошпатовыми, хлорит-полевошпатовыми и амфибол-полевошпат-кварцевыми сланцами. Графитопоявления располагаются в контактовой зоне Салминского массива гранитов-рапакиви. Воздействие постмагматических гидротермальных растворов привело к локальному обогащению стратиформных графитовых залежей плотнокристаллическим и крупночешуйчатым графитом и формированию графитовых руд с содержанием углерода до 40–60 % (рис. 3). За пределами графитовых залежей, в зонах расланцевания и брекчирования наблюдаются лишь редкие мелкие обособления графита.

Текстура графитовых руд равномерно-вкрапленная, массивная или сланцеватая. На участках с плотнокристаллическим графитом —



**Рис. 3. Руды кристаллического плотного и чешуйчатого графита:** а — богатая графитовая руда месторождения шахта Шварц (размер образца 6х8 см<sup>2</sup>); б — развитие крупночешуйчатого и плотнокристаллического графита в тонковкрапленной руде мелкочешуйчатого графита, Кительское месторождение (отраженный свет, без анализатора, ширина поля зрения 0,8 мм); в — кительский графит (флотоконцентрат, ПЭМ, ув. 10 000, фото В.В. Ковалевского)

прожилково-вкрапленная, прожилково-пятнистая, пятнистая, брекчированная. Структура основной массы микрогранобластовая, микрорепидобластовая. Размер графитовых чешуек в основной массе варьирует от 0,005 до 0,3 мм, в графитовых прожилках 0,1–0,15 мм. В наиболее крупных из них, с нерудными минералами в центральной части, встречаются чешуи графита до 10 мм в диаметре. Рентгенографически для кительского графита определены  $d_{002} = 0,3355$  нм,  $L_a = 50$  нм;  $L_c = 55$  нм. Графит проявления Руокоярви при равных значениях величины межслоевого расстояния и диаметра углеродного слоя отличается увеличенными (свыше 100 нм) размерами высоты кристаллитов [2].

Исследования обогатимости проводились по технологической схеме, включающей основную флотацию, доизмельчение, две-четыре (иногда шесть) перечистные операции и два доизмельчения пенных продуктов I и IV перечистных флотаций. Были получены концентраты зольностью от 23,6 до 41,4 % при довольно высоком извлечении углерода в концентрат (табл. 1). Высокая зольность флотоконцентратов обусловлена, вероятно, преобладанием в рудах мелкочешуйчатого графита.

Наиболее детально изучена обогатимость графитовых руд *Кительского оловорудного месторождения*. Месторождение детально разведано и подготовлено к промышленному освоению. Графитовая руда технологической пробы имеет следующий минеральный состав, масс. %: графит — 40; полевые шпаты (преобладает альбит) — 28–29,9; амфибол — 10,2; кварц — 8,8;

пирит — 6,1; каолинит — 3,1; хлорит — 2,5. Средний размер чешуй графита — 0,02 мм. Проба отобрана в непосредственной близости от оловорудной залежи.

ВНИИнеруд разработана схема обогащения, включающая основную флотацию, два доизмельчения и шесть перемывочных операций. Испытания режимов флотации проводились в широком диапазоне. Однако не удалось уменьшить зольность концентрата до 20 %. Высокая зольность полученного концентрата связана с переизмельчением руды и образованием шламов из-за большого содержания сульфидов и тонкого прораствания графита с порообразующими минералами.

Серия экспериментов по автоклавному выщелачиванию флотоконцентрата, проведенная во ВНИИнеруде, показала принципиальную возможность получения графита с содержанием зольных примесей 0,5 %, пригодного для производства коллоидно-графитовых препаратов и других, более высокозольных сортов графита.

Сходных результатов добились на Завальевском графитовом комбинате, где обогащение кительской графитовой руды проводилось по флотационной схеме действующей фабрики [10]. В результате из пробы с содержанием графита 8,61 % получен флотоконцентрат зольностью 22 %, пригодный для литейного производства. Выход концентрата составил 10 %. Химическое дообогащение позволило снизить зольность продукта до 3,95 %.

Применение традиционных схем флотационного обогащения, как правило, не позволяет получить из руд мелкочешуйчатого графита наиболее ценный малозольный графит. Богатые руды в естественном виде (без обогащения) могут использоваться в литейном производстве. Испытания кительской графитовой руды в качестве наполнителя противопожарных покрытий показали, что она обеспечивает то же качество поверхности, что и стандартные графитовые покрытия.

Проявления графита Сортавальской группы (Красный победитель, Северо- и Южно-Туоксъярвинское и др.) по стратиграфическому положению, морфологии залежей и составу руд близки к графитопоявлениям Питкярантской группы. Однако в отличие от последних графитовые руды Сортавальской группы, как правило, более раскристаллизованы. Средний размер графитовых чешуек обычно сопоставим со средним размером зерен порообразующих минералов. Количественные соотношения между чешуйчатыми разновидностями графита весьма изменчивы, поэтому следует ожидать существенных различий между рудами по обогатимости. Бедные руды, представленные мелкозернистыми биотит-кварц-полевошпатовыми сланцами, судя по результатам испытания единичной пробы с содержанием графита 2,8 %, отобранной южнее г. Сортавала, являются относительно труднообогатимыми (табл. 1).

Рудопроявлениям крупночешуйчатого графита свойственны максимальные мощности залежей и соответственно наиболее значительные запасы кристаллического графита. Наиболее значимы проявления

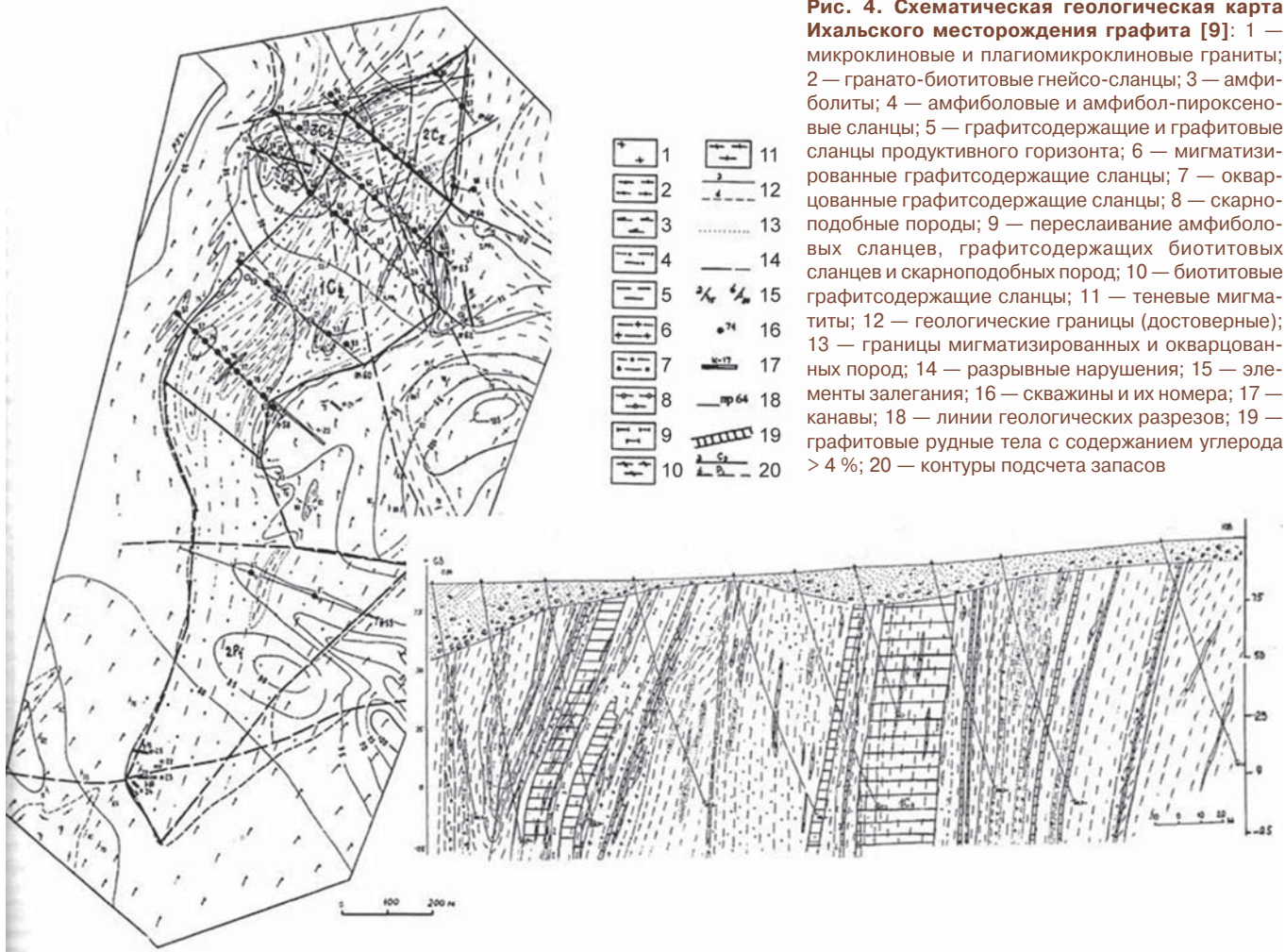
графита Ихальской группы, расположенные южнее г. Лахденпохья. Продуктивная толща представлена пачками ритмичного переслаивания графитосодержащих биотитовых, биотит-амфиболовых, амфибол-пироксеновых, гранат-биотитовых сланцев и гнейсов, пироксен-плагиоклазовых «скарноидов» и полевошпатовых амфиболитов. Породы продуктивной толщи относятся к нерасчлененным образованиям питкярантской свиты сортавальской серии, метаморфизованным в условиях амфиболитовой, местами гранулитовой фации [2, 9, 12 и др.]. На государственной карте масштаба 1:200 000 нового поколения они образуют ихальский амфиболит-графит-гнейсовый подкомплекс Лахденпохского метаморфического комплекса [11].

В результате поисковых работ на графит, проводившихся ПГО «Севзапгеология», в составе продуктивной толщи выделены и закартированы графитоносные горизонты, к которым приурочены стратиформные руды крупночешуйчатого графита. В пределах Ихальского рудного поля на площади около 100 км<sup>2</sup> выявлено Ихальское месторождение и девять детальных участков с суммарными запасами (кат. С<sub>2</sub>) и прогнозными ресурсами (кат. Р<sub>1</sub>+Р<sub>2</sub>) графита свыше 17 млн т [9]. Руды залегают на поверхности или перекрыты мало мощным чехлом четвертичных отложений.

Ихальское месторождение расположено в 5 км южнее железнодорожной станции Ихала и в 3 км к западу от шоссейной дороги Санкт-Петербург-Сортавала-Петрозаводск. Субмеридиональная пластообразная крутопадающая залежь длиной 1700 м и средней мощностью около 300 м сложена в различной степени мигматизированными графитосодержащими сланцами и гнейсами. Падение пород крутое, преимущественно в северо-западном направлении, осложнено мелкой складчатостью. Среднее содержание графита в рудах 3,17 % при колебаниях от долей до 9 %. Выделены зоны мощностью до 80 м с содержанием графита более 4 % (рис. 4).

Основные порообразующие минералы (по рядовым лабораторным пробам) представлены кварцем — 20–35 %, полевыми шпатами — 25–40 % (преобладает плагиоклаз), биотитом — 15–32 % и сульфидами (преимущественно пирроотином) — 7–21 % [7]. Амфибол обычно присутствует в незначительных количествах. В единичных зернах отмечаются гранат, кордиерит, силлиманит. Вторичные минералы представлены хлоритом, альбитом и серицитом. В незначительном количестве встречаются цеолиты, карбонаты, минералы группы эпидота и каолинит. Хлорит развит повсеместно, но его содержание в пробах не превышает 3 %. В выветрелых графитовых рудах пирротин замещается сульфатами и гидроксидами железа.

Содержание графита в пробах составляет 3–4 % (до 6 %). Графит крупно- и мелкочешуйчатый. Размер чешуек колеблется от 0,01 до 3–4 мм. Средний размер чешуй составляет 0,3–0,6 мм. По рентгеноструктурным данным структура графита близка к идеальной. На дифрактограммах ихальского графита присутствует



максимальное количество отражений. Пик 002 острый, симметричный, его положение соответствует межслоевому расстоянию 0,3354–0,3359. Степень графитизации, определяемая по соотношению интенсивностей линий 112 и 110, достигает 1,9 [2].

На месторождении и проявлениях Ихальского рудного поля выделено (с долей условности) несколько генетических и технологических типов руд: графитосодержащие биотитовые гнейсы (неизменные и диафорированные), мигматиты и щелочные метасоматиты [7]. Первые рассматриваются как основные природные типы графитовых руд Ихальского рудного поля. Мигматиты пользуются широким развитием на исследованной площади, но, как правило, содержание графита в них не превышает 1 %. Мигматиты с содержанием графита 2–3 % встречаются в небольших, разрозненных участках среди мигматизированных графитосодержащих пород. Щелочные метасоматиты имеют локальное развитие в экзоконтактах Райвмякского щелочного массива [12]. Им свойственна изменчивость минерального и вещественного состава, обусловленная как неравномерным проявлением щелочного метасоматоза, так и разным составом исходных пород.

На Ихальском месторождении и проявлениях графита Ихальского рудного поля наблюдаются перекристаллизация и перераспределение графита в узких

согласных зонах трещиноватости, рассланцевания, брекчирования, милонитизации, сопровождаемых диафорезом вмещающих пород. Графит (обычно вместе с пирротином) цементирует тектонические брекчии, образует прожилковидные выделения и неправильной формы скопления. Графитовые руды подвергаются сульфидизации, хлоритизации, фельдшпатизации, окварцеванию, ослюденению и карбонатизации. Для зон дробления характерна ассоциация графита с минералами группы эпидота. В породах появляются глинистые минералы, цеолиты и каолинит.

Графитовые руды заметно различаются по структурно-текстурным особенностям (рис. 5), что характерно для Ихальского рудного поля в целом, где структурные разновидности связаны взаимными переходами и обычно перемежаются друг с другом. В биотитовых гнейсах сростки графита представлены параллельными срастаниями с биотитом. По сравнению с ними мигматиты более крупнозернисты и содержат более крупночешуйчатый графит. В метасоматитах крупные чешуи графита образуют сростки с амфиболом и пироксеном, а мелкие находятся в тесном срастании с полевыми шпатами.

Установлено, что неизменные биотитовые гнейсы, мигматиты и щелочные метасоматиты характеризуются легкой обогатимостью. Многочисленными

Таблица 2

Показатели обогащения различных природных типов графитовых руд Ихальского месторождения

Тип руды		Особенности технологической схемы			Характеристика концентрата		
		Тонина измельчения перед основной флотацией	Количество перецистных операций	Количество операций доизмельчения	Степень раскрытия сростков графита	Содержание углерода	Извлечение углерода
Биотитовые гнейсы	неизмененные	50–60 % класса –0,074 мм	3–5	1	75–80	92,43	91,57
	диафторированные		5	2	65–70	90,51	87,58
Мигматиты			3–5	1	75–78	95,0	94,58
Щелочные метасоматиты			3–5	1	70–75	86,65	94,23

лабораторными испытаниями по флотационному обогащению пород Ихальского рудного поля, выполненными в ПГО «Уралгеология», Институте геологии КарНЦ РАН и ВНИИнеруде (г. Тольятти), доказана возможность получения методом флотации графитовых концентратов, содержащих при высоком извлечении до 95 % углерода (табл. 1). При расसेве конечного продукта флотационного обогащения можно получить различные марки графита, удовлетворяющие требованиям ГОСТов на графит тигельный, электроугольный, элементный, литейный.

ВНИИнерудом разработана технологическая схема и реагентный режим химического обогащения ихальского флотоконцентрата методом автоклавного выщелачивания, позволяющие получить графит зольностью до 0,17 %. Установлено, что выход графита зольностью до 0,1 % из ихальского концентрата значительно превышает выход дефицитного малозольного графита из завальевского концентрата.

В заводской лаборатории Завальевской обогатительной фабрики ПО «Кировоградграфит» химическое дообогащение ихальского флотоконцентрата

проводилось по схеме, максимально приближенной к принятой на фабрике. При средней зольности 0,12 % крупный класс (+0,20 мм), составляющий свыше 60 % обогащенного графита, имел зольность 0,06 %. Из химически обогащенного ихальского графита были изготовлены коллоидно-графитовые препараты, соответствующие действующим стандартам и техническим условиям.

Наиболее сложные и разнообразные по составу и типам сростаний сростки образует графит в диафторированных биотитовых гнейсах. Содержание свободных чешуй графита в основном невелико — 10–20 %, редко достигает 35–40 %. Преобладают трудно раскрываемые сростки с пирротином и сложные сростки с биотитом и полевыми шпатами, биотитом и кварцем (рис. 6). На границе графита с плагиоклазом наблюдается тонкая кайма калишпата. Графитовые чешуи нередко смяты, изогнуты, расщеплены на краях. Графитовые руды из зон диафтореза характеризуются наиболее низкими технологическими показателями (табл. 2).

Характер распределения графита и его сростков с породообразующими минералами — биотитом, поле-

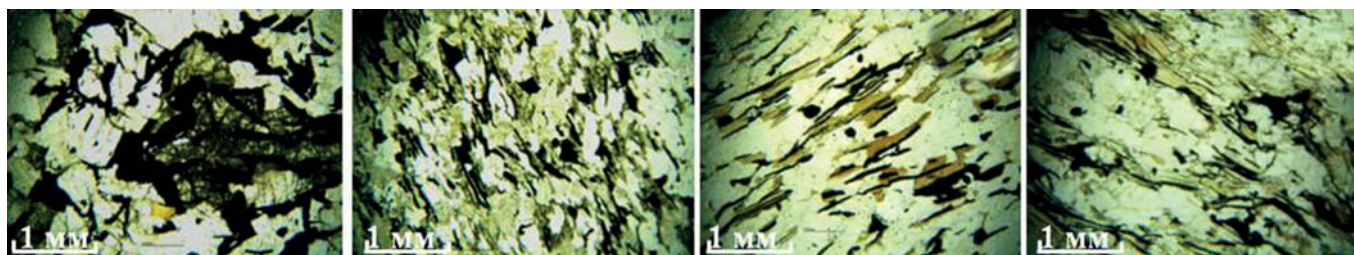


Рис. 5. Шлифы Ихальских графитовых руд (фото с анализатором)

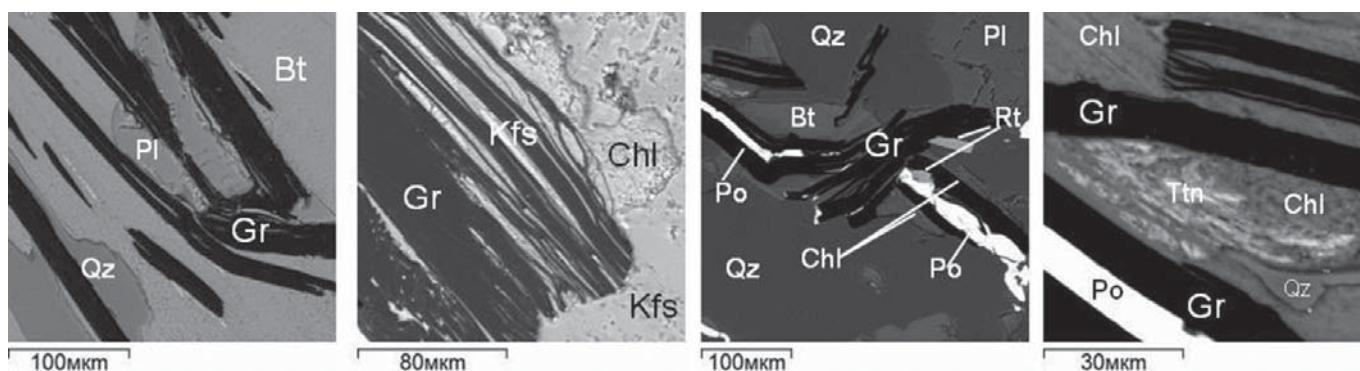


Рис. 6. Морфология сростаний графита (фото СЭМ)

вым шпатом и кварцем в концентрате при крупности 30–40 % класса –0,074 мм показывает, что свободные чешуйки графита в крупном (+0,25 мм) классе составляют в среднем 36 % от общей массы графитосодержащих зерен. Преобладают бедные (содержание графита до 30–40 %) сростки графита с биотитом. В мелких классах количество сростков с биотитом уменьшается и растет количество сростков с кварц-полевошпатовым агрегатом. Это подтверждает связь крупночешуйчатого графита с биотитом, а мелкочешуйчатый графит чаще встречается в ассоциации с кварцем и полевыми шпатами.

Ихальское месторождение по разведанным запасам крупночешуйчатого графита является одним из крупнейших в Европе. Месторождение характеризуется благоприятными природными и горно-техническими условиями и выгодным географо-экономическим положением. Возможна разработка открытым способом. Месторождение лицензировано, на нем проводятся разведочные работы. По качеству и разведанным запасам руды Ихальского месторождения превосходят руды разрабатываемого Тайгинского месторождения кристаллического графита. Развитая инфраструктура района и близость к Санкт-Петербургу выгодно отличают Ихальское месторождение от месторождения Пестпакша [5], расположенного на юго-западе Мурманской области в 120 км от железнодорожной станции Ковдор в экономически не освоенном районе. Месторождение Пестпакша имеет гидротермально-метасоматический генезис и локализовано в плагиогнейсах и метасоматитах Лапландской зоны гранулитов. Среднее содержание графита в рудах составляет 5,03 % при колебаниях от 3 до 46 %. Графит кристаллический крупно-мелкочешуйчатый. Форма рудных тел не установлена. Месторождение отличается меньшей изученностью и сложным геологическим строением.

Наличие в пределах Ихальского рудного поля Райвмякского щелочного массива с комплексным апатитовым, редкоземельно-титанитовым и потенциальным стронций-барий-полевошпатовым сырьем [8, 9, 12] позволяет рассматривать данную территорию как новый горнорудный район, что повышает инвестиционную привлекательность Ихальского месторождения.

В связи с растущим спросом на кристаллический графит и несомненной потребностью в нем промышленных предприятий Северо-Запада, а также с учетом хорошей обогатимости ихальских графитовых руд промышленное освоение Ихальского месторождения представляется целесообразным и своевременным.

Руды скрытокристаллического и мелкочешуйчатого кристаллического графита, развитые на территории республики, могут представлять промышленный интерес лишь как попутное полезное ископаемое. Первые трудно поддаются обогащению методами флотации и имеют низкое (для руд данного типа) содержание углерода. Вторые обогащаются методами флотации с получением высокозольных концентратов, но установлены лишь в виде небольших по размеру обособленных рудных тел.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балтыбаев, Ш.К. Свекофеннский пояс Фенноскандии: пространственно-временная корреляция раннепротерозойских эндогенных процессов / Ш.К. Балтыбаев, О.А. Левченко, Л.К. Левский. — СПб.: Наука, 2009. — 328 с.
2. Бискэ, Н.С. Графитовое оруденение Северного Приладожья (геология и генетические особенности) / Н.С. Бискэ. — Петрозаводск, Карельский филиал АН СССР, 1987. — 172 с.
3. Бискэ, Н.С. Необычное углеродное вещество в черных сланцах соанлахтинской свиты (Северное Приладожье) / Н.С. Бискэ // Геология и полезные ископаемые Карелии. — 2016. — КарНЦ РАН. — Вып. 18. — С. 40–47.
4. Великославинский, Д.А. Сравнительная характеристика регионального метаморфизма умеренных и низких давлений / Д.А. Великославинский. — Л.: Наука, 1972. — 190 с.
5. Дуракова, А.Б. Основные черты геологического строения и графитоносность юго-западного фрагмента Лапландской зоны гранулитов / А.Б. Дуракова, В.А. Павлов, О.Б. Кузнецов // Отечественная геология. — 2010. — № 3. — С. 33–39.
6. Иващенко, В.И. Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы / В.И. Иващенко, А.И. Голубев. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. — 369 с.
7. Каменева, Е.Е. Обогащение минерального сырья Карелии / Е.Е. Каменева, Л.С. Скамницкая. — Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2003. — 230 с.
8. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 1. / Ред. А.Г. Леонтьев, В.П. Михайлов. — Петрозаводск: Карелия, 2005. — 280 с.
9. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. / Ред. В.П. Михайлов, В.Н. Аминов. — Петрозаводск: Карелия, 2005. — 356 с.
10. Справочник по обогащению руд. Т. 3. Обогащительные фабрики. — М., 1984. — С. 296–303.
11. Степанов, К.И. Отчет по геологическому доизучению м-ба 1:200000 Сортавальской площади, составлению и подготовке к изданию комплекта Государственной геологической карты масштаба 1:200000 листов Р-35-XXIV, Р-36-XXIX / К.И. Степанов, Г.Н. Санина, В.А. Богачев. — СПб., 2006.
12. Хазов, Р.А. Рифейский калиевый щелочной магматизм южной части балтийского щита / Р.А. Хазов, М.Г. Попов, Н.С. Бискэ. — СПб.: Наука, 1993. — 218 с.
13. Шульдинер, В.И. Возрастное и формационное расчленение раннекембрийских образований Северо-Западного Приладожья / В.И. Шульдинер, И.В. Козырева, Ш.К. Балтыбаев // Стратиграфия. Геологическая корреляция. — 2000. — Т. 8. — № 6. — С. 20–33.
14. Biske, N. Geology and commercial assessment of graphite deposits in the eastern Fennoscandian Shield. Tutkimus-raportti / N. Biske, L. Skamnitskaya, V. Mikhailov, O. Sarapää. — 1991. — ТКК. — P. 39–48.
15. Graphite, N (2017). About graphite <http://northerngraphite.com>. (30.07.2018).
16. Sarapää, O. Discovery potential of hi-tech metals and critical minerals in Finland / O. Sarapää, L.S. Lauri, T. Ahtola et al. — Tutkimusraportti. — 2015. — N 219. — P. 1–54.

© Бискэ Н.С., Скамницкая Л.С., 2018

Бискэ Наталья Сергеевна // nataliabiske@yandex.ru  
Скамницкая Любовь Степановна // skamnits@krc.karelia.ru

УДК 502.21:691.335

**Жерновский И.В., Кожухова Н.И. (Белгородский государственный технологический университет)**

### ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ НИЗКОКАЛЬЦИЕВЫХ ЗОЛ УНОСА

*В работе приводятся результаты разработки методики прогнозной оценки реакционной активности низкокальциевых зол уноса для получения геополимерных вяжущих. Предлагаемая методика отработана на золах уноса углей*