

Проведение вышеописанных исследований технических и технологических свойств калийной породы не только повысит объективность и достоверность оценки возможности использования их под те или иные способы добычи и переработки, но и позволит своевременно сосредоточить внимание на наиболее трудных проблемах обогащения руд и комплексности их использования, а также существенно повысит техническую, технологическую и экономическую эффективность геолого-промышленной оценки месторождений калийных солей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Аренс В.Ж.* Скважинная добыча полезных ископаемых (геотехнология). М: Недра, 1986. 279 с.
2. *Аренс В.Ж.* Физико-химическая геотехнология. М: Изд. МГУ, 2001. 656 с.
3. *Арсентьев В.А., Горловский С.И.* Определение удельной поверхности набухающих глин, доступный флотационным реагентам различного молекулярного веса // В сб. Обогащение неметаллических полезных ископаемых. Вып.2. Свердловск: Изд.Урал.политех.ин-та, 1976 С. 106-109.
4. *Болдырев А.И.* Инфракрасные спектры минералов. М.: Недра, 1976 199 с.
5. *Бургомистрова Н.П., Прибылов К.П., Савельев В.П.* Комплексный термический анализ // Казань: Изд. КГУ, 1981 111 с.
6. *Вишняков А.К., Гревцев В.А., Щербаков В.Д.* Применение методов резонансной спектроскопии в технологической минералогии калийных солей // Роль технологической минералогии в расширении сырьевой базы СССР. Челябинск, 1986. С. 155.
7. *Вишняков А.К., Тетерина Н.Н., Молоштанова Н.Е.* Определение степени раскрытости калийных руд // Калийная промышленность. 1980. № 3. С. 17-20.
8. *Вишняков А.К., Молоштанова Н.Е., Глазунова З.И.* Технологические свойства калийных солей как фактор их оценки. Природная сода и девсонитпроявления в СССР. М: Наука, 1985. С. 169-179.
9. *Годен А.М.* Основы обогащения полезных ископаемых. М: Metallurgizdat, 1946. 535 с.
10. *Дудко П.М.* Подземное выщелачивание солей. М: Недра, 1972. 160 с.
11. *Желнин А.А.* Теоретические основы и практика флотации калийных солей. Л: Химия, 1973. 353 с.
12. *Зильбершмидт В.Г., Синопальников К.Г., Полянина Г.Д. и др.* Технология подземной разработки калийных руд. М: Недра, 1977. 287 с.
13. *Куковский Е.Г.* Особенности строения и физико-химические свойства глинистых минералов. Киев: изд. Наук. Думка, 1966. 172 с.
14. *Меланхолин Н.М.* Методы исследования оптических свойств кристаллов. М: Наука, 1970. 250 с.
15. *Миркин Л.И.* Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М: Гос. изд. физ.-матем. литературы, 1961. 864 с.
16. *Михеев В.И., Сельдау Э.Г.* Рентгонометрический определитель минералов. Т.2. Л: Недра, 1965. 363 с.
17. *Пермяков Р.С., Романов В.С., Бельды М.П.* Технология добычи солей. М: Недра, 1981. 272 с.
18. *Печковский В.В., Александровский Х.М., Пинаев Г.Ф.* Технология калийных удобрений. Минск: изд. Высшая школа, 1968. 264 с.
19. *Плюснина И.И.* Инфракрасные спектры минералов. М: Изд. МГУ, 1977. 175 с.
20. Рентгеновские методы определения и кристаллическое строение минералов глин / Под ред. Бриндли. М: изд. ИЛ, 1955. 403 с.
21. *Титков С.Н., Мамедов А.И., Соловьев Е.Н.* Обогащение калийных руд. М: Недра, 1982. 216 с.
22. *Франк-Каменецкий В.А.* Руководство по рентгеновскому исследованию минералов. М: Недра, 1977. 399 с.
23. *Шушкенов А.В., Ефременко Л.Я.* Об ошибке в определении степени раскрытия извлекаемого минерала в продуктах обогащения. Кокыма. № 9. 1972. С. 11-12.

### **КОМПЛЕКСНЫЕ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАФИТОВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕБЕРЕ В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)**

***Лузин В.П., Вафин Р.Ф., Пермяков Е.Н., Кузнецов О.Б., Лузина Л.П., Губайдуллина А.М.,  
Кузнецова В.Г., Ахиярова А.В.***

ФГУП «ЦНИИгеолнеруд», г. Казань

Настоящее исследование графитовых руд месторождения Чебере (Республика Саха) было проведено сотрудниками ФГУП «ЦНИИгеолнеруд» в 2008-2009 гг.

#### ***Минеральный состав графитовых руд***

Графитсодержащие породы (руды) представлены биотит-гиперстеновым плагиосланцем мелко-, среднезернистым с различным содержанием графита и сульфидов (проба № Т-1), биотит-гиперстеновыми

плагиосланцами в разной степени мигматизированными с различным содержанием графита и сульфидов (проба № Т-2), графитистым кварцевым метасоматитом (проба № Т-3). Исследуемые типы руд различаются по минеральному составу. По результатам комплексных исследований (РПКФА, описание шлифов, изучение твердых фаз под бинокляром, технологические методы определений и др.) в рудах проб № Т-1 и № Т-2 установлено свыше 14, а в руде пробы № Т-3 больше 5 минералов. Минеральный состав руд на основе изучения рентгенографическим полуквантитативным фазовым анализом (РПКФА, аналитики Волкова С.А. и Ильичева О.М.) приведен в табл. 1.

Поскольку под биотитом понимается группа минералов, состоящая из сидерофиллита, истонита, аннита, флогопита и др., которые различаются по химическому составу [1], то нами было проведено альтернативное исследование по установлению вида слюды с применением технологического способа определения по [2]. В результате было установлено, что слюда в изучаемой руде представлена флогопитом коричневой и черной окраски.

При изучении под бинокляром (аналитик В.П. Лузин) в рудах пробы № Т-1 пробы № Т-2 дополнительно, к указанным выше минералам, выделены пирит, ковеллин, борнит, халькопирит, прозрачная слюда (мусковит), флогопит. В руде пробы № Т-3 зафиксированы редкие пластинки флогопита и зерна различных сульфидов. В составе этой же пробы присутствуют бурые охры железа, непрозрачные или полупрозрачные нерудные минералы.

Таблица 1. Основные минералы графитовых руд по данным РПКФА

Минерал	Содержание минерала в пробе №, %		
	Т-1	Т-2	Т-3
Графит	10	18	29
Кварц	25	22	71
Биотит	16	28	-
Полевые шпаты	36	18	-
Хлорит	2	4	-
Пироксены	7	3	-
Тальк	2	5	-
Пирротин	2	2	-

Сульфиды (пирротин и пирит) являются магнитными и выделяются в магнитную фракцию в виде мономинеральных зерен (рис. 1) и в сростках с другими немагнитными минералами, в том числе и графитом, то есть состав получаемой фракции в целом является полиминеральным. Содержание этой фракции варьирует от 11,2% (проба № Т-1) до 14,2% (проба № Т-2), в руде пробы № Т-3 наличие ее незначительное (аналитик Л.П. Лузина). В процессе обжига магнитной фракции при 700°C пирротин преобразовывается в гематит, отличительным признаком которого является красно-бурая (вишневая) черта и массивное плотное сложение. При повышении температуры до 900°C гематит переходит в порошкообразное состояние. Зольность магнитной фракции составляет 84-85%. При обогащении наличие сульфидов в руде может влиять на увеличение содержания серы, меди и железа в получаемых графитовых концентратах.

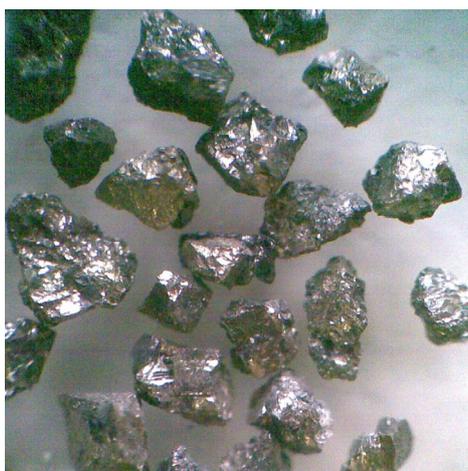
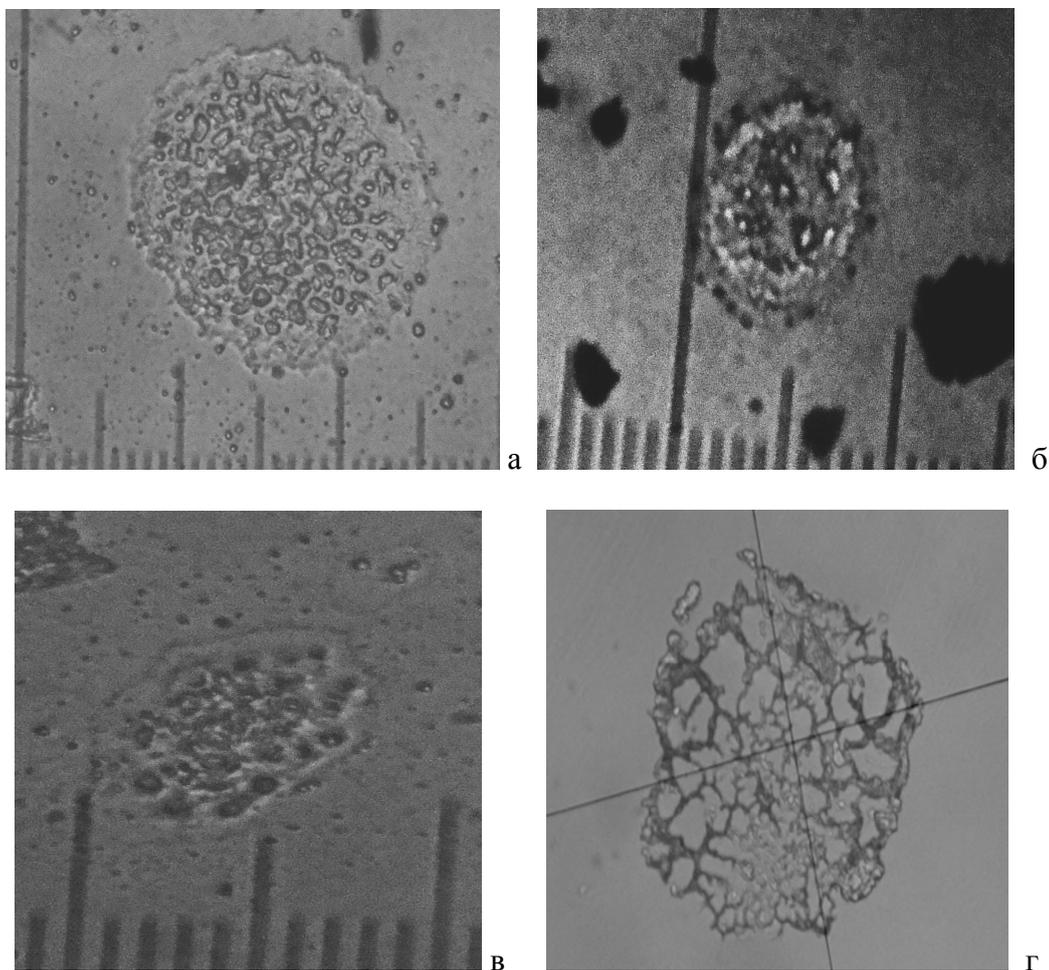


Рис. 1. Зерна сульфидов, фракция -0,63+0,40 мм (Лузин В.П., 2009 г.)

**Графит** в породе распределен неравномерно, в виде разнообразных вкраплений, линз, прослоев, гнезд, сплошных скоплений.

Внутреннее строение монокристаллов графита показано на рис. 2. Снимки получены по разработанной в 2007 г. В.П. Лузиным методике, основанной на применении поляризационного

микроскопа. На снимках видны опорные структурные элементы, которые вместе образуют слоистую решетку, характерную для графита. Отмечается разнообразие в формах и размерах отдельных ячеек решетки даже в пределах одного кристалла. Линии, оконтуривающие кристаллы, проходят не хаотично, их направления совпадают с положением базовых структурных элементов. Строение монокристаллов, имеющих различный облик, характеризуется большим сходством. Внутреннее решетчатое строение монокристаллов графита месторождения Чебере во многом совпадает с таковым проявления Пестпакша.



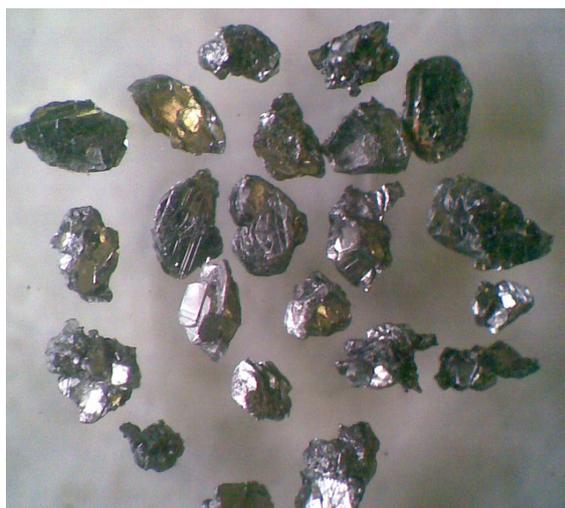
**Рис. 2. Внутреннее строение монокристаллов графита: а, б, в – графит месторождения Чебере, г – графит проявления Пестпакша. Масштаб: в 1 делении линейной шкалы 0, 05 мкм (Лузин В.П., 2008-2009 гг.)**

Облик агрегатов графита многообразный: массивный (плотный) кристаллический, зернистый, пластинчатый, чешуйчатый, шестоватый и др. (рис. 3, 4, 5). Агрегаты *массивного (плотного) кристаллического графита* могут быть представлены друзоподобными или щетковидными формами. Часть кристаллов характеризуется ступенчатыми формами. Встречаются кристаллы в виде усеченной пирамиды, у которых одна из двух противоположных граней имеет крутой угол наклона, другая – пологий. На отдельных кристаллах графита прослеживаются грани роста. Некоторые кристаллы подвергнуты рекристаллизации. Преобразованные кристаллы отличаются меньшими размерами по сравнению с базовыми, более темной окраской, ровной поверхностью и четкими очертаниями.

Значительная часть *зернистых графитовых агрегатов* состоит из множества мелких массивных графитовых кристалликов, соединенных кремнистым цементом. При последовательном многократном раздавливании эти зерна, как и другие крупные агрегаты, распадаются на отдельные зерна меньшей величины или кристаллики черного графита и частички прозрачного кварца. Исходные (природные) крупные *чешуйчатого строения агрегаты графита* сложены менее тонкими плотно соединенными (спрессованными) чешуйчатыми агрегатами (кристаллами) графита. В плане форма отдельных агрегатов (кристаллов) может быть неправильная, близкая к гексагональной, округлая или другая.

Поверхность частиц графита гладкая, ступенчатая, шероховатая, волнистая, изогнутая, с углублениями различных размеров и т.д. Шероховатость обусловлена расположением на поверхности крупных агрегатов микрочешуйчатых частиц графита, налегающих друг на друга (структура «черепичного» покрытия). Углубления на поверхности чешуйчатых агрегатов графита отражают, в основном, форму поверхности минералов, находившихся в контакте друг с другом (рис. 6). Контур

индивидов неровные, зазубренные, извилистые или прямолинейные. Особенности в облике агрегатов и рельефе их поверхности могут служить причиной различной обогатимости графита в пределах одного месторождения [3].



**Рис. 3. Массивные (плотные) кристаллы графита, фракция  $-0,63+0,40$  мм**



**Рис. 4. Чешуйчатые, шестоватые и пластинчатые агрегаты вскрытого графита, фракция  $-0,63+0,40$  мм**



**Рис. 5. Зернистые агрегаты графита, состоящие из многих массивных микрокристаллов графита, цементированных кремнистым цементом, фракция  $-0,63+0,40$  мм**



**Рис. 6. Поверхность агрегатов графита со следами углублений от сопутствующих породообразующих минералов, фракция  $-1,0+0,63$  мм**

По результатам полевых наблюдений и описания шлифов под микроскопом (аналитик О.Б. Кузнецов) графит в рудах характеризуется как мелко- и среднечешуйчатый. Однако, установленные технологическими приемами размеры мономинеральных агрегатов графита во всех пробах значительно крупнее, но не превышают 5 мм ( $5 \times 4 \times 2$ ;  $4,0 \times 1,5 \times 0,2$ ;  $3,5 \times 2,5 \times 0,3$  мм и т.д.). Поэтому, согласно классификации [4], в рудах определенную часть изучаемого графита можно причислить к крупнечешуйчатому ( $+0,1$  мм) типу, а другую часть к мелкочешуйчатому ( $-0,1+0,0$  мм) типу. Но в соответствии с Инструкцией по применению классификации запасов к месторождениям графита [5] в целом на изучаемом объекте Чебере графит следует отнести к крупнокристаллическому типу, так как содержание графитовых агрегатов (кристаллов) размером крупнее  $0,050$  мм составляет больше 50%. Необходимо отметить, что по крупности агрегатов графита месторождение Чебере относится к рядовым графитовым объектам, поскольку максимальные размеры агрегатов графита в рудах на разрабатываемых за рубежом месторождениях обычно находятся в пределах 1-5 мм [6]. В промышленных условиях графит с такими природными размерами агрегатов по отечественным стандартам (ГОСТ 17022-81 «Графит. Типы, марки и общие технические требования», ГОСТ 17818.2-90 «Графит. Метод определения гранулометрического состава») является пригодным для производства крупнечешуйчатого ( $+0,2$  мм), среднечешуйчатого ( $-0,2+0,063$  мм) и мелкочешуйчатого ( $-0,063+0,0$  мм) обогащенного графита. Одновременно он является пригодным для производства крупнечешуйчатого  $+0,2$  мм, среднечешуйчатого  $-0,2+0,15$  мм и мелкочешуйчатого  $-0,15$  мм графита, отвечающего требованиям международных стандартов [БИКИ № 21 (9267) 21.02.2008 г.].

В составе породы крупнокристаллические агрегаты графита присутствуют или в виде отдельных обособлений среди породообразующих минералов, или среди мелкокристаллического графита, образуя линзообразные скопления или тонкие прослои. Это исключает возможность раздельного обогащения крупнокристаллического и мелкокристаллического графита. При дроблении руды сростки из графита и породообразующих минералов распространены в преобладающем большинстве в классах крупности +0,05 мм. В руде, измельченной до крупности частиц -0,05+0,0 мм, зерна породообразующих минералов и различные частицы графита практически полностью раскрыты. Таким образом, для максимального раскрытия графита необходимо доводить крупность руды до класса -0,05+0,0 мм.

Природные графитовые агрегаты исследуемых типов руд не являются минералогически однородными по наличию углерода из-за наличия в них минеральных включений (например, кварца, слюды, сульфидов и др.) и загрязнений (например, оксидов железа и др.). Количество минеральных включений и загрязнений можно выразить через зольность агрегатов графита. Например, при содержании графитного углерода 94% ненарушенные (естественные) монофракции графита +0,2 мм из биотит-гиперстеновых плагиосланцев (руда пробы № Т-1) характеризуются наличием зольности в количестве 6%. В этой же пробе в монофракциях графита с природными размерами частиц меньше 0,2 мм наличие зольности (засоряющих веществ) не превышает 4,0%, а содержание графитного углерода составляет 96%. Судя по наличию зольности, количество засоряющих веществ в частицах исходного графита из мигматизированных биотит-гиперстеновых плагиосланцев (руда пробы № Т-2) составляет 3,7%, а из графитистых кварцевых метасоматитов (руда пробы № Т-3) – 2%. Летучие вещества в мономинеральных агрегатах графита отсутствуют. Следовательно, при флотационном раздельном обогащении руд можно достигнуть чистоты концентратов с максимальным содержанием графитного углерода 96-98% при минимальной зольности 2-4%.

Термоустойчивость графита была определена по потерям массы при разных температурах нагрева. До температуры нагрева 500°C потерь в массе графита не наблюдается (аналитик Л.П. Лузина). При температуре прокаливания 600°C масса графита уменьшается на 5,0% а при температуре 700°C – на 36%. Цвет графита при этих температурах не изменяется. Максимальное сгорание графита происходит при 800-1000°C, но при 800°C графита сгорает на 1-3% меньше, чем при 900°C. Практически полное выгорание графита происходит при температуре свыше 1000°C. При температуре обжига 900°C кристаллы графита крупнее 2,0 мм месторождения Чебере сгорают не в полном количестве, незначительная часть из них сохраняется, однако доля их настолько мала, что это не влияет на вычисление показателя зольности. Таким образом, если по ГОСТ 17818.4-90 «Графит. Метод определения зольности» определение зольности графита рекомендуется проводить при одной из температур от 800 до 1000°C, то для графита месторождения Чебере наиболее оптимальной температурой определения зольности можно считать 900°C. Сохранившиеся после обжига при 900°C частички (останцы) графита имеют сильный блеск и черную окраску. Форма их заметно отличается от формы исходных агрегатов графита. В основном форма останцев графита вытянутая, чечевицеобразная. Края их зазубренные, пилообразные. Зубцы остроугольные и не ровные по высоте. Тонкие плоские останцы обычно изогнутые, часто имеют вогнутую (дугообразную) форму. Утолщенные останцы в плане прямолинейные и сохраняют ровную поверхность, но при этом края их также извилистые, зазубренные. Часть сохранившихся при температуре обжига 800°C останцев графита имеет явно кристаллическую форму. Они представлены отдельными массивными единичными кристаллами или сростками из 2-3 кристаллов, у которых отмечается грубое (редкое) расслоение параллельное слоистости и вертикальные трещины, ориентированные преимущественно согласно краевым контурам. Неравномерное сгорание графита при высоких температурах отмечалось нами также и при исследовании графита Тайгинского месторождения на Южном Урале. Неодинаковая способность к сгоранию кристаллов графита свидетельствует о возможном различии их кристаллического строения и фазового состава. Не исключено, что трудно сгораемый графит является более чистым (однородным) по химическому составу, то есть отличается незначительным количеством примесных веществ и максимальным содержанием графитного углерода. Образующаяся после сгорания графита масса (зола) имеет бурый (красно-бурый) цвет и пухообразную структуру.

По результатам технологических испытаний (аналитик Лузина Л.П.) содержание графитного углерода в исследуемых графитовых рудах в среднем составляет 23,67%, в том числе в руде пробы № Т-1 – 14%, пробы № Т-2 – 22%, пробы № Т-3 – 35%. По данным термического анализа (ДТГ, ДТА) содержание графитного углерода в руде пробы № Т-1 равно 12%, в руде пробы № Т-2 – 19%, в руде пробы № Т-3 – 32% (аналитики Губайдуллина А.М., Вассерман Д.В., Исламова Г.Г.). На основании полученных сведений геологические (или технологические) типы руд по содержанию основного полезного ископаемого – графита можно условно подразделить на бедные (содержание графита до 15%), рядовые (содержание графита от 15 до 25%), богатые (с содержанием графита больше 25%).

### ***Химический состав графитовых руд***

По химическому составу геологические типы руд, представленные биотит-гиперстеновым плагиосланцем (проба № Т-1) и мигматизированными биотит-гиперстеновыми плагиосланцами (проба № Т-2) имеют

незначительное отклонение, но существенно отличаются от состава графитистого кварцевого метасоматита (проба № Т-3). Химический состав руд приведен в табл. 2 (аналитики Медведева О.А., Демидова Л.А.).

Таблица 2. Химический состав графитовых руд

Оксиды, элементы	Содержание оксидов (%) и элементов (г/т) в рудах проб №№		
	Т-1	Т-2	Т-3
H <sub>2</sub> O	0,15	0,02	0,08
SiO <sub>2</sub>	50,96	47,72	63,09
TiO <sub>2</sub>	0,48	0,39	0,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,42	7,99	0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,33	0,98	0,35
FeO	10,37	12,51	0,29
MnO	0,03	0,04	0,01
CaO	3,58	2,37	0,01
MgO	2,44	2,42	0,05
Na <sub>2</sub> O	1,79	1,51	0,05
K <sub>2</sub> O	1,76	1,01	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15	0,17	0,03
SO <sub>3</sub> сульфат	<0,05	0,05	0,07
S сульфид	4,43	5,29	0,02
Летучие (ППП 350 °С)	0,20	0,14	0,10
ППП 1000 °С	15,27	21,85	35,72
Зольность 950 °С	85,73	78,33	64,28
CO <sub>2</sub>	0,18	0,29	0,04
Cl	не опр.	0,03	0,006
Cu г/т	453	650	69
Co г/т	28,9	40	3,2
Pb г/т	1,73	4,2	24
Ni г/т	228	3060	15
As	не опр.	0,85	2,6
C графита	15,11	21,88	30,25
pH	не опр.	не опр	6,96

Высокое содержание железа и серы в составе руд проб №№ Т-1 и Т-2 обусловлено наличием в них сульфидов.

Принимая во внимание химический состав исходного сырья, на данном этапе исследований было сделано предположение, что получаемые концентраты графита из руд проб № Т-1 и № Т-2 могут иметь повышенное содержание железа и серы.

### **Флотация графитовой руды**

Извлечение графита в концентрат осуществлялось способом прямой пенной флотации. Для флотации руду предварительно дробили и измельчали до крупности –1,0+0,0 мм.

В результате проведения основной флотации с применением отечественных флотореагентов, в частности солярового масла, были получены основной (черновой, стартовый) концентрат и хвосты обогащения (аналитик Л.П. Лузина). Выход концентратов основной флотации по пробам составляет от 23,5 до 57,6%, содержание в них графитного углерода от 52 до 58% (табл. 3).

Полученные стартовые концентраты по зольности (от 42 до 48%) не отвечают требованиям ГОСТ 17022-81. Согласно этому ГОСТ максимальная зольность концентратов не должна превышать 25%. С целью получения графитового концентрата (графита), отвечающего нормам ГОСТ 17022-81, черновой концентрат подвергали перерешетке способом флотации в шесть последовательных этапов с двумя промежуточными доизмельчениями. В результате были получены чистовые (финишные) концентраты, характеризующиеся более высоким содержанием графитного углерода (90%) и низким содержанием зольности (10%), чем основные (стартовые) концентраты, и хвосты перерешеток, в которых отмечается более высокое содержание графита по сравнению с хвостами основной флотации. Выход конечного (чистового) графитового концентрата зависел от количества графита в руде: чем выше содержание графита, тем больше был выход графитового концентрата. При этом качество графитовых концентратов по содержанию в них графита не зависит от содержания графита в исходной руде. Это можно считать одним из критериев, по которому изучаемые руды следует отнести к одному технологическому типу по обогащению.

Содержание графита как минерала в концентратах варьирует от 91,8 до 93,6% (в среднем составляет 92,6%). Повышенное содержание графита в концентрате по сравнению с графитным углеродом объясняется тем, что графит не является химически чистым по наличию углерода, а содержит минеральные примеси и загрязнения в количестве 2-4%. Определение содержания графита как минерала, в %, в концентратах проводилось с учетом методических рекомендаций № 93 «Методика определения содержания в породах графита» (МПР РФ, 1999), разработанных ЦНИИгеолнерудом, и согласно [7].

Таблица 3. Технологические показатели обогащения графитовых руд проявления Чебере

Показатель	Результат обогащения руды по пробе №			
	Т-1	Т-2	Т-3	Среднее
Выход чистового неклассифицированного концентрата из руды, %	11,47	16,6	28,8	18,96
в том числе: концентрата +0,2 мм, %	0,3	1,56	0,86	0,91
концентрата -0,2+0,0 мм	11,17	15,04	27,94	18,05
Содержание графитного углерода в чистовом неклассифицированном концентрате, %	90	90	90	90
в том числе: в концентрате +0,2 мм, %	96	96,3	98	96,7
в концентрате -0,2+0,0 мм	89,5	89	89,6	89,40
Содержание графита как минерала в чистовом неклассифицированном концентрате, %	93,6	93,3	91,8	92,60
Извлечение графитного углерода, %	73,7	67,9	74	72,09
Степень обогащения	6,4	4,09	2,57	4,35
Степень сокращения	8,7	6,02	3,47	6,06
Выход концентрата основной флотации, %	23,5	34,39	57,6	38,50
Содержание графитного углерода в концентрате основной флотации (в черновом концентрате), %	52	56	58	56
Выход хвостов после основной флотации, %	76,5	65,61	42,4	61,50
Содержание графитного углерода в хвостах основной флотации, %	2,5	4,0	4,0	3,38
Выход хвостов перечистных операций, %	12,03	17,79	28,8	19,54
Содержание углерода в хвостах перечистных операций, %	15	25	26	23
Содержание графитного углерода в исходной пробе, %	14	22	35	23,67
Расход руды на получение 1 т концентрата, т	8,7	6,02	3,47	6,06
Количество возможных марок графита, отвечающих требованиям ГОСТ 17022-81	16	17	26	26

Наиболее высокое извлечение графитного углерода установлено для руды, представленной графитистым кварцевым метасоматитом (руда пробы № 3). Самое низкое извлечение углерода 67,9% отмечено для руды, представленной биотит-гиперстеновыми плагиосланцами (руда пробы № 2). В среднем извлечение графитного углерода для всех проб составило 72,09%. Недостаточное извлечение графитного углерода в концентрат, с нашей точки зрения, частично объясняется наличием некондиционного (неизвлекаемого) графитного вещества, мелкие частицы которого имеют тесное срастание с породообразующими минералами или находятся внутри их и практически не поддаются вскрытию механическими способами. Поэтому содержание графитного углерода в хвостах основной флотации довольно высокое и составляет в среднем 3,38%. По отечественным меркам, на примере разделения по обогатимости перерабатываемых графитовых руд Тайгинского месторождения [3], усредненная графитовая руда объекта Чебере является среднеобогатимой в случае получения неклассифицированного графитового концентрата с содержанием графитного углерода 90%. При снижении требований к качеству графитовых концентратов можно увеличить выход графитового концентрата на примере переработки руды пробы № Т-3 до 40,1% (или в 1,4 раза больше, чем максимально чистого), но с более высокой зольностью – 22,5%. Такой графит отвечает маркам ГЛ-3 (графит литейный кристаллический) и ГЛС-4 (графит литейный скрытокристаллический). При этом извлечение графитного углерода в концентрат будет увеличено с 74 до 88,8% (или в 1,2 раза больше). В этом случае графитовая руда пробы № Т-3 будет относиться к хорошо обогатимым рудам. Обогатимость руд других типов останется прежней.

По результатам флотационного обогащения выделенные преимущественно по минералогическому составу исследованные 3 природных типа графитовых руд отнесены нами к одному технологическому типу. Они способны к обогащению по одной технологической схеме с применением одного и того же оборудования и с использованием равнозначных реагентов.

## Техническая оценка чистового графитового концентрата

Гранулометрический состав чистового графитового концентрата. Методом ситового анализа в составе чистового концентрата было установлено наличие частиц графита всех основных размеров, которые нормируются ГОСТ 17022-81 для производства соответствующих марок товарного графитового продукта (табл. 4).

Таблица 4. Гранулометрический состав неклассифицированного чистового графитового концентрата

Фракция крупности графита, мм	Содержание фракции графита в пробе №, в % к итогу			
	Т-1	Т-2	Т-3	Среднее
-0,63+0,20	2,7	9,4	3,0	5,0
-0,2+0,16	4,9	6,1	6,1	5,7
-0,16+0,10	12,6	15,2	18,7	15,5
-0,10+0,071	16,6	19,8	19,5	18,7
-0,071+0,063	6,6	3,6	6,2	5,5
-0,063+0,045	17,4	19,3	19,2	18,6
-0,045+0,00	39,2	26,6	27,3	31,0
Итого: -0,63+0,00	100	100	100	

При объединении выделенных классов в соответствующих пропорциях и проведения необходимого их доизмельчения можно получать требуемую марку графита, отвечающего нормативам отечественного ГОСТ 17022-81 или графитовой продукции международного уровня. По нормативам ГОСТ 17818.2-90 обогащенный графит во всех пробах представлен крупночешуйчатым (+0,2 мм), среднечешуйчатым (-0,2+0,063 мм) и мелкочешуйчатым (-0,063+0,0 мм) промышленными типами. Графит, размеры частиц которого превышают 0,2 мм, по БИКИ № 2 (21.02.2008) также считается крупночешуйчатым.

В процессе переработки руды произошло некоторое изменение графита по величине агрегатов. Так, в концентрате максимальный размер частиц извлеченного графита не превышает 0,63 мм, т.е. в сравнении с исходной величиной природного графита, равной 5,0 мм, в результате дробления, измельчения и флотации произошло уменьшение их размеров практически в 8 раз. Доля крупнокристаллического графита +0,2 мм в составе концентратов различна и изменяется от 2,7 до 9,4%. Это можно объяснить наличием в пробах неодинакового количества высокоабразивных минералов, такие как кварц, полевые шпаты, пироксены и пирротин, которые могут оказывать большое воздействие на истирание графита. Чем больше высокоабразивных минералов в исходной пробе, тем интенсивнее истираются частицы графита, что приводит к сокращению выхода крупнокристаллического графита. По содержанию крупнокристаллического графита в концентратах исходные графитовые руды целесообразно подразделить на низкосортные (с содержанием графита +0,2 мм не больше 0,5%), рядовые (с содержанием графита +0,2 мм не больше 0,5-1,0%) и высокосортные (с содержанием графита +0,2 мм больше 1,0%).

*Минеральный состав чистовых графитовых концентратов.* Помимо графита в составе концентратов присутствуют нерудные минералы и магнитные сульфиды. Содержание магнитной фракции установлено только в концентратах графита из руды пробы № Т-1 пробы – 0,5% и из руды пробы № Т-2 – 0,8% (аналитик Л.П. Лузина).

Среди нерудных минералов по результатам исследований рентгенографического полуколичественного фазового анализа (аналитики С.А. Волкова, Ильичева О.М.) в составе чистовых графитовых концентратов имеют место кварц, биотит, полевой шпат, пироксены, тальк, хлорит (табл. 5).

*Химический состав графитовых концентратов.* Содержание графитного углерода в концентратах по данным химического анализа составляет от 79,30 до 88,46%. В числе других компонентов в составе финишных графитовых концентратов определены оксиды (% мас.): SiO<sub>2</sub> – 8,6-9,50; TiO<sub>2</sub> – 0,04-0,014; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,16-1,05; MnO – 0,01; CaO – 0,05-0,48; MgO – 0,05-0,69; Na<sub>2</sub>O – 0,03-0,18; K<sub>2</sub>O – 0,01-0,11; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,02-0,05; CO<sub>2</sub> – 0,03-0,15 (аналитики О.А. Медведева, Л.А. Демидова, Н.В. Князева).

Таблица 5. Минеральный состав чистовых неклассифицированных концентратов графита по данным рентгенографического полуколичественного фазового анализа

Минерал	Содержание минерала в пробе №, %			
	Т-1	Т-2	Т-3	Среднее
Графит	78	81	86	81,7
Кварц	10	8	14	10,7
Биотит	2	1	-	1,0
Полевой шпат	3	5	-	2,7
Пироксены	1	-	-	0,3
Хлорит	2	5	-	2,3
Тальк	4	-	-	1,3

Кроме того, в составе концентратов установлены такие элементы, как  $C$  0,003-0,027%;  $S$  0,02-0,32%;  $Fe$  0,35-1,9% и др., присутствие которых в значительных количествах не всегда является желательным для производства ряда марок графита (например, меди не должно быть больше 0,05% , серы 0,1-0,3% и железа не выше 0,15-1,9%). Наиболее высококачественным по наличию меди является графит из руды пробы № Т-1, а по содержанию серы и железа – графит из руды пробы № Т-3. Повышенное содержание указанных примесей можно объяснить за счет присутствия в концентратах сульфидов.

### **Направления применения графитовых концентратов**

Принимая во внимание установленные технические показатели можно прогнозировать, что обогащенный графит может иметь комплексное применение.

По таким показателям как *содержание углерода (C) и гранулометрический состав* обогащенный графит проявления Чебере может быть *продуктом Экспорта* в качестве крупночешуйчатого +0,2 мм ( $C = 94-97\%$ ), среднечешуйчатого  $-0,2+0,15$  мм ( $C = 85-96\%$ ) и мелкочешуйчатого  $-0,15$  мм ( $C = 90\%$ ) графита [БИКИ № 21 (9267) 21.02.2008 г.]. Дополнительные показатели для графита (например, по химическому составу), предназначенного на экспорт, в БИКИ не указаны. На мировом рынке цена за 1 т кристаллического крупночешуйчатого графита, 94-97%  $C$ , составляет 958-1089 USD/т, среднечешуйчатого, 90%  $C$ , – 484-544 USD/т, мелкочешуйчатого, 90% $C$ , – 451-522 USD/т.

В России качество товарного графита оценивается по ГОСТ 17022-81 не только по наличию углерода и гранулометрическому составу, но и с учетом других нормируемых показателей, например, *по наличию зольности и содержанию некоторых химических элементов, к которым причислены медь, железо, сера и др.* Возможные марки графита, которые можно получить при обогащении графитовых руд месторождения Чебере, приведены в табл. 6.

Таблица 6. Марки графита из графитовых концентратов +0,2 мм, -0,2+0,0 мм и неклассифицированных с учетом требований ГОСТ 17022-81

Графит	Марки графита из графитовой руды пробы №			
	Т-1	Т-2	Т-3	В целом
Аккумуляторный	-	-	ГAK-3	ГAK-3
Карандашный	ГK-3	ГK-3	ГK-2, ГK-3	ГK-2, ГK-3
Смазочный	ГC-4	ГC-4	ГC-3, ГC-4	ГC-3, ГC-4
Пороховой	-	-	П	П
Электроугольный	-	ЭУН	ЭУЗ-11, ЭУЗ-111; ЭУТ-1, ЭУТ-11, ЭУТ-111; ЭУН	ЭУЗ-11, ЭУЗ-111; ЭУТ-1, ЭУТ-11, ЭУТ-111; ЭУН
Тигельный	ГТ-1, ГТ-2, ГТ-3	ГТ-1, ГТ-2, ГТ-3	ГТ-1, ГТ-2, ГТ-3	ГТ-1, ГТ-2, ГТ-3
Элементный	ГЭ-1, ГЭ-2, ГЭ-3, ГЭ-4	ГЭ-1, ГЭ-2, ГЭ-3, ГЭ-4	ГЭ-1, ГЭ-2, ГЭ-3, ГЭ-4	ГЭ-1, ГЭ-2, ГЭ-3, ГЭ-4
Литейный	ГЛ-1, ГЛ-2, ГЛ-3; ГЛС-1, ГЛС-2, ГЛС-3, ГЛС-4			
Всего марок	16	17	26	26

По нормируемым показателям для графита различных марок можно судить о том, что графитовые руды проявления Чебере в зависимости от их вещественного состава можно разделить на такие технологические сорта, как руды с высоким содержанием вредных примесей и руды рядовые с нормальным (допустимым) содержанием вредных примесей, которые целесообразно выделять в процессе технологического картирования объекта, что в дальнейшем будет способствовать повышению эффективности его эксплуатации [8]. К рудам с высоким содержанием вредных примесей следует относить те, из которых при обогащении невозможно получать наиболее престижные марки графита по ГОСТ по наличию вредных примесей (например, серы, меди, железа и др.). К рудам с нормальным содержанием вредных примесей следует относить те, из которых при обогащении получают высокосортные марки графита, отвечающие требованиям ГОСТ по содержанию вредных примесей.

В целом обогащенный графит отвечает требованиям ГОСТ 17022-81 “Графит. Типы, марки и общие технические требования”. Он может использоваться: для производства аккумуляторов и карандашей; для изготовления графитовых смазок; применяться в качестве ингредиента электропроводящей резины, изделий порошковой металлургии, графитовых смазочных карандашей и паст, электропроводящих полимерных пленок; для изготовления консистентных смазок, изделий специального назначения, огнеупорных графитокерамических изделий, противопопригарных покрытий при получении отливок, тормозных колодок; в качестве припыла рабочих поверхностей форм и стержней при получении отливок сложной конфигурации, требующих особо чистой поверхности и не требующих высокой чистоты; в производстве электроугольных изделий и первичных химических источников тока; в металлургическом производстве; в качестве пигментов для изготовления красок и т.д.

## **Применение твердых отходов переработки графитовых руд в производстве строительных материалов**

Объединенные твердые отходы основной флотации совместно с отходами пересортичных операций обогащения сложены полиминеральным зернистым сыпучим продуктом, максимальный размер частиц которого не превышает 0,315 мм. Минеральный состав отходов представлен графитом, кварцем, биотитом, полевым шпатом, хлоритом, пироксеном, пирротинном, тальком и другими минералами. На ограниченном количестве проведенных испытаний была установлена возможность использования их в качестве заполнителя бетонов (например, марки 150 по ГОСТ 6133-84 “Камни бетонные стеновые”), а также в производстве керамического кирпича (например, марки 250 по ГОСТ 530-2007 “Кирпич и камни керамические”). Прочность на сжатие полученного керамического кирпича (28,0 МПа) с заполнителем из отходов обогащения графитовой руды в 2,3 раза больше, чем керамического кирпича (12,4 МПа), изготовленного из сырьевой смеси (глина+кварцевый песок). Следовательно, эти отходы могут служить альтернативой заполнителю из кварцевого песка, стоимость 1 т которого на международном рынке составляет в среднем 16 USD. Дополнительные затраты на получение такого состава и качества минерального заполнителя не потребуются, так как расходы на добычу и переработку полиминерального сырья будут отнесены на производство основного полезного ископаемого, т.е. графита. Кроме того, они могут найти применение в производстве рубероида при условии предварительного отсева фракции  $-0,05+0,0$  мм. Согласно ГОСТ 10923-82 “Рубероид. Технические условия” величина зерен песчаного материала должна быть от 0,05 до 0,63 мм.

**Технико-экономические показатели переработки руд месторождения Чебере** сопоставимы с таковыми переработки руд, Надеждинского, Тайгинского и других месторождений, а некоторые показатели даже находятся в более выгодном положении. Например, как показывают расчеты, стоимость графитовой продукции, вырабатываемой из 1 т руды, на месторождении Чебере составляет 53,27 USD, на Надеждинском месторождении 20,32 USD, на Тайгинском – 13,22 USD. При этом расход руды на производство 1 т графита на месторождении Чебере не превышает 9,14 т, на Надеждинском месторождении – 27,40 т и на Тайгинском – 37,04 т. При полной отработке месторождения Чебере будет произведено графита ориентировочно на сумму 215 млн. USD. Для открытия нового горно-обогатительного предприятия необходимо провести оценочные работы по переводу прогнозных ресурсов и запасов категории  $C_2$  в запасы категорий  $C_1 + C_2$ .

Использование отходов обогащения позволит не только значительно повысить эффективность эксплуатации графитового объекта Чебере, но и сохранить экологическую обстановку на территории предполагаемого горно-обогатительного предприятия.

Приведенные данные исследований показывают, что месторождение графитовых руд Чебере перспективно для отработки, комплексного освоения и является привлекательным для инвесторов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Петрография. Часть 1. М.: Изд-во Московского университета, 1976. 384 с.
2. Пат. 2139529 Российская Федерация, С1. Способ определения природных разновидностей слюды / Лузин В.П., Лузина Л.П. № 97115866; заявл. 11.09.97; опубл. 10.10.99, Бюл. № 28. 6 с
3. *Евстигнеева А.А.* Совершенствование технологии обогащения графитовых руд (на примере Тайгинского месторождения): автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Л., 1989. 22 с.
4. *Веселовский В.С.* Требования промышленности к качеству минерального сырья. Графит // Справочник для геологов. М.: Госгеолиздат, 1946. 48 с.
5. Инструкция по применению классификации запасов к месторождениям графита. М.: ГКЗ СССР, 1984. 36 с.
6. Графит // Минеральные ресурсы промышленно развитых капиталистических и развивающихся стран. М.: Союзгеолфонд, 1979. С. 435-444.
7. *Лузин В.П.* Эффективность определения содержания графита в рудах с применением технологических приемов // Матер. межд. совещания “Современные проблемы обогащения и глубокой комплексной переработки минерального сырья” (Плаксинские чтения – 2008): Владивосток, 16-21 сентября 2008 г. Владивосток: Изд-во Тихоокеанской АН экологии и безопасности жизнедеятельности, 2008. С. 135-137.
8. *Лузин В.П., Кузнецов О.Б.* Геолого-технологическое картирование месторождений графита / Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений – достижения и перспективы. Сб. тез. докл. науч.-практич. конференц. (20-22 мая 2008 г., Москва, ЦНИГРИ). М.: ЦНИГРИ, 2008. С.125-126.