

В заключение необходимо подчеркнуть, что на Тимане существует два разных минералогических типа бокситов – каолинит-гипсированный бессернистый и каолинит-бемитовый сернистый. При существующих технологиях бокситы первого типа могут вводиться в технологические схемы без предварительной подготовки, тогда как большая часть бокситов второго типа в вышеуказанных отраслях производства возможна лишь после удаления серы по ГОСТу. Разрабатываемые новые методы и подходы позволят более эффективно использовать алюминиевое сырье при глубокой комплексной переработке и расширить сферы потребления как самого сырья, так и утилизацию отходов.

Работа выполняется в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН в рамках программы ОНЗ-3 проекта “Развитие научных основ эффективных технологий глубокой и комплексной переработки труднообогатимых руд и углей” 09-Т-5-1012 в тесном сотрудничестве с ООО «Боксит Тимана», часть исследований выполнена в «ВИМСе» и МИСиСе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляев В.В.* Минерально-сырьевая база алюминиевой промышленности России: состояние и перспективы. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 1999. 66 с.
2. *Беляев В.В.* Маложелезистые белосветные бокситы: распространение, состав, промышленное использование // Научные достижения – практике. Вып. 126. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2009. 44 с.
3. *Демина В.Н.* Бокситовые месторождения Среднего Тимана // В сб.: Генетическая классификация и типы бокситовых месторождений СССР. М., Наука, 1974.
4. *Вахрушев А.В., Любинский И.Ф., Котова О.Б.* Новые методы и средства комплексной переработки алюминиевого сырья Республики Коми // Материалы XV Геологического съезда РК: Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С. 349-351.
5. *Голдин Б.А., Секушин Н.А., Рябков Ю.И.* Электропроводящая керамика на основе маложелезистых бокситов Среднего Тимана. Сыктывкар, 1992. 13 с.
6. Кучное выщелачивание благородных металлов. М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. 647 с.
7. Север: наука и перспективы инновационного развития / Отв. ред. В.Н. Лаженцев. Сыктывкар, 2006. 400 с.
8. *Котова О.Б., Понарядов А.В., Вахрушев А.В., Шушков Д.А.* Адсорбционные процессы и рентгенометрия минеральных наносистем // Материалы Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2008. С. 50–51.
9. *Котова О.Б., Шушков Д.А.* Аналицимсодержащие породы Тимана как потенциальный источник получения алюминиевого сырья // Материалы второго российского семинара по технологической минералогии: Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья. Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН, 2007. С. 21–24.
10. Девон в минерально-сырьевом потенциале Тимано-Североуральского региона / Н. П. Юшкин, И. Н. Бурцев, Б. А. Остащенко, Н. А. Малышев, В. В. Беляев. Сыктывкар: Геопринт, 2003. 40 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД В СЕРПЕНТИНИТАХ (НА ПРИМЕРЕ ПЕЧЕНГИ)

Ракаев А.И.¹, Нерадовский Ю.Н.², Черноусенко Е.В.¹, Морозова Т.А.¹

¹ Учреждение Российской академии наук Горный институт Кольского научного центра РАН, г.Апатиты

² Учреждение Российской академии наук Геологический институт Кольского научного центра РАН, г.Апатиты

Введение

Вкрапленные руды в серпентинизированных перидотитах являются основным сырьем для перерабатывающих предприятий Печенгского района. Интенсивное освоение медно-никелевых руд Печенги привело в настоящее время к необходимости разработки более бедных руд, в которых значительно изменяются технологические свойства. Вместо традиционных хорошо изученных вкрапленных и брекчиевидных руд [1, 2], в качестве альтернативных в Печенгском рудном районе рассматриваются и тонковкрапленные руды в серпентинизированных перидотитах [3]. Руды такого типа распространены во многих массивах серпентинитов в Печенгском рудном поле [4]. Целью настоящих исследований являлось изучение вещественного состава и технологических свойств таких руд одного из массивов центральной части Печенгского рудного поля [5].

Печенгское рудное поле сложено туфогенно-осадочными и вулканогенно-осадочными породами четвертой (Пильгярвинской) толщи печенгской серии и прорывающими их интрузиями ультраосновных-основных пород, относящихся к габбро-пироксенит-перидотитовой (верлитовой) формации. Сульфидные медно-никелевые руды приурочены к ультраосновным породам, представленным в основном серпентинитами. В рудном поле установлено более 300 массивов

ультраосновных пород, в 15 из них присутствует промышленное оруденение. Главными типами руд являются вкрапленные руды в ультраосновных породах и жильные руды в тектонических нарушениях [6]. Среди вкрапленных руд выделяются рассеянно-вкрапленные и густо-вкрапленные, среди жильных руд – брекчиевидные и сплошные. Незначительное развитие имеют также гнездово-вкрапленные руды в ультраосновных породах и прожилково-вкрапленные в туфогенно-осадочных породах. Промышленные руды в основном располагаются в придонных частях массивов и в экзоконтакте. Типичные промышленные руды Печенги характеризуются высоким содержанием сульфидов (6.5-92% масс.), среди которых одним из главных минералов является пирротин (30-75% в сульфидной массе).

В рудоносных массивах объем вторичной сульфидной минерализации приближается к бедным промышленным рудам. Минеральный состав и технологические свойства таких руд не изучены и могут представлять интерес в перспективе. К таким рудам относятся, например, вкрапленные руды массива Соукер. По сообщению компании Kola Mining (Интернет-сайт) это месторождение содержит 103 млн. т подтвержденных запасов руды с содержанием 0.26% Ni и 0.06% Cu и 261 млн.т предполагаемых запасов с содержанием 0.24% Ni и 0.06% Cu, что в сумме составляет 898 тыс.т Ni. Таким образом, в серпентинитах сосредоточены крупные запасы руд с низким содержанием никеля. Это обуславливает необходимость создания новой технологии переработки руд в серпентинитах, как нового вида сырья для предприятий Печенги.

Минералого-петрографические исследования

Рассматриваемый массив представляет расслоенное интрузивное тело, в составе которого присутствуют габбро, пироксениты и верлиты (рис.1). Габбро и пироксениты слагают висячий бок массива, верлиты – лежащий. Верлиты в разрезе массива перемежаются с оливинитами и пироксеновыми оливинитами, мощности оливинитов и верлитов достигают 50-60 м. Все эти породы превращены в серпентиниты.

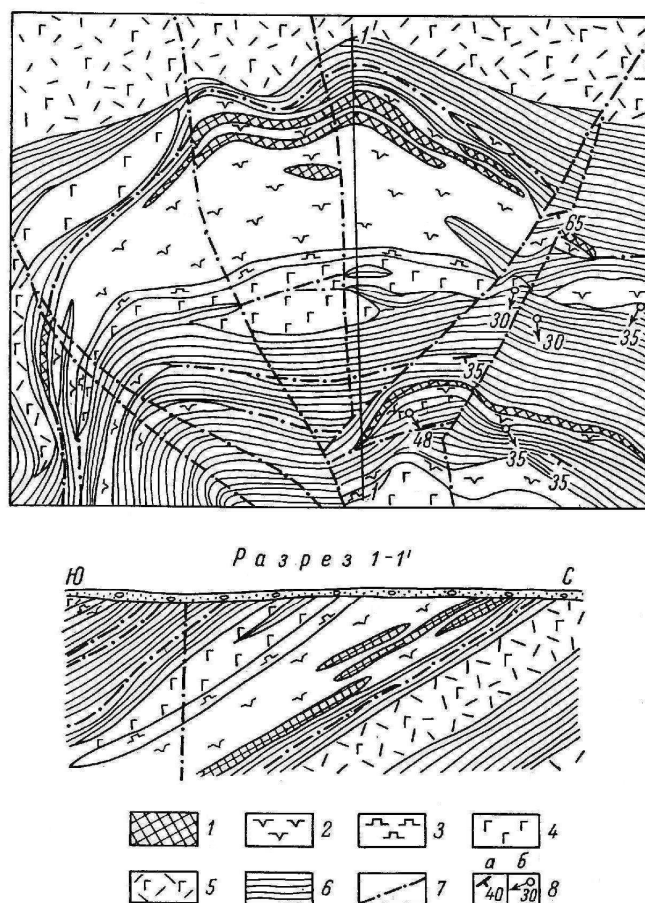


Рис. 1. Схематическая геологическая карта и разрез массива

- 1 – вкрапленные руды в серпентинитах; 2 – серпентинизированные перидотиты; 3 – пироксениты;
4 – габбро; 5 – габбро-диабазы; 6 – туфогенно-осадочные породы; 7 – разрывные нарушения;
8 – элементы залегания пород и складок

Серпентинизация проявлена неравномерно, наблюдаются значительные колебания содержания пироксена и оливина, в некоторых участках мощностью до 10-15 м серпентиниты содержат реликты оливина до 20-30%.

Главные породообразующие минералы представлены серпентином, клинопироксеном (авгитом), оливином, биотитом и хлоритом. В серпентинитах повсеместно отмечается широкое развитие прожилков хризотил-асбеста, в локальных секущих зонах развиты талькиты.

Главными рудными минералами являются пентландит, халькопирит, пирротин. В серпентинитах пирротин часто отсутствует, а встречается в основном в породах, обогащенных пироксеном. Второстепенные рудные минералы: миллерит, хизлевудит, борнит, самородная медь. Из этих минералов миллерит местами образует мономинеральную вкрапленность, особый тип оруденения – миллеритовый, медь самородная встречается повсеместно, но эпизодически, борнит и хизлевудит отмечаются реже двух предыдущих минералов, но везде. В качестве примесей присутствуют: макинавит, пирит, графит, титанит, валлериит, сфалерит. Акцессорные минералы: хромшпинелиды и ильменит. Хромшпинелиды рассеяны равномерно, около 3%, кое-где концентрация повышается до 5%. Ильменит присутствует в объеме до 2 % в оливинитах, до 10% в приконтактовых пироксенитах. Широко развит поздний магнетит, метаморфического происхождения, наложенный на силикаты, хромшпинелиды и сульфиды. Вариации содержания магнетита в руде достаточно широкие, в отдельных зонах он составляет до 20%, но преимущественно 3-10%.

В отличие от типичных руд Печенги содержание сульфидов в руде из серпентинитов низкое 1.5-3.5%, вкрапленность обогащена пентландитом и обеднена пирротинном. В типичных рудах содержание пирротина в сульфидной массе составляет от 27 до 73%, а в серпентинитах менее 35%, или он полностью отсутствует (табл. 1).

Таблица 1. Минеральный состав вкрапленных руд в серпентинитах и типичных руд Печенги, % об.

Тип руд	Пирротин	Пентландит	Халькопирит	Миллерит	Сумма окислов
Типичные вкрапленные руды Печенги					
Густо-вкрапленная	27	43	30	-	7
Рассеянно-вкрапленная	73	17	10	-	5
Вкрапленные руды в серпентинитах					
Пирротин-пентландит-халькопиритовая	0.64(35)	0.95(52)	0.25(13)	-	9
Халькопирит-пентландитовая	-	1.2(89)	0.15(11)	+	9
Миллеритовая				1.35(100)	11

Главной специфической особенностью руд в серпентинитах является широкое развитие эпигенетической вкрапленности пентландита, миллерита и магнетита, за счет изменения сингенетической вкрапленности и метаморфизма первичных силикатных минералов. Эта особенность обусловлена присутствием в первичных породах небольшого количества первичной сульфидной вкрапленности и никеленосного оливина, реликты которого встречаются в серпентинитах. Содержание примеси никеля в оливине составляет в виде NiO в среднем 0,267, а в серпентине 0,056%, что в пересчете на металл Ni составляет в оливине – 0,21%, в серпентине – 0,044%. В процессе замещения из оливина выделяется избыток никеля и железа, которые не входят в структуру серпентина, и поэтому «сбрасываются» среди серпентина в виде зерен пентландита, миллерита и магнетита. Выделения сульфидов характеризуются большим разнообразием форм от равномерной пылевидной вкрапленности до гнездообразной и прожилков, в которых пентландит ассоциирует, прежде всего, с магнетитом, а также с халькопиритом, пирротинном, борнитом, халькозином, валлериитом и другими минералами. В отдельных участках вместо пентландита активно развит миллерит в аналогичных формах.

Наиболее распространена тонкая вкрапленность пентландита (рис. 2) и магнетита (рис. 3), реже развита вкрапленность миллерита (рис. 4). Тонкая вкрапленность спорадически насыщает серпентинизированные породы с локальными перепадами содержания, в пределах псевдоморфоз серпентина по оливину или вдоль тектонических трещин. Пентландит, миллерит и магнетит преимущественно образуют мономинеральную вкрапленность, но иногда образуют и сростки, как во вкрапленниках, так и в жилках (рис. 5).

В балансе тонкой вкрапленности около 80% составляет пентландит, а 20% -халькопирит, борнит и миллерит. В миллеритовой вкрапленности — 100% миллерита. Размеры зерен минералов в этой вкрапленности составляют 0.001-0.2 мм. Содержание вкрапленности варьирует от 1.1 до 2.7 % в объеме руды.

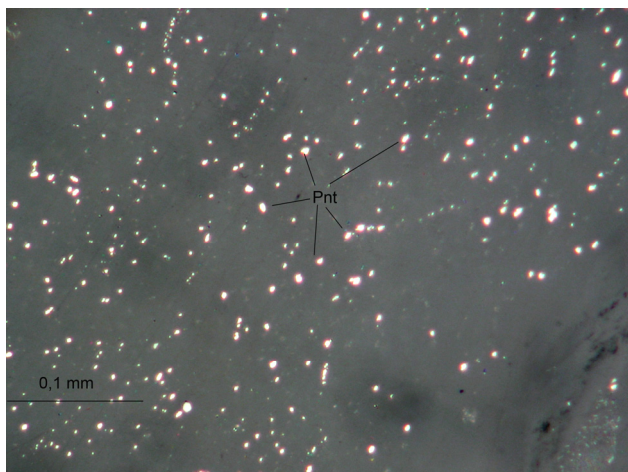


Рис. 2. Пылевидная вкрапленность пентландита в серпентине

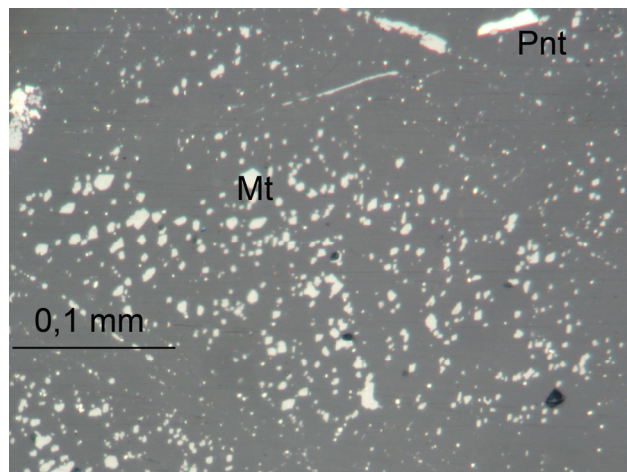


Рис. 3. Пылевидная вкрапленность магнетита в серпентине

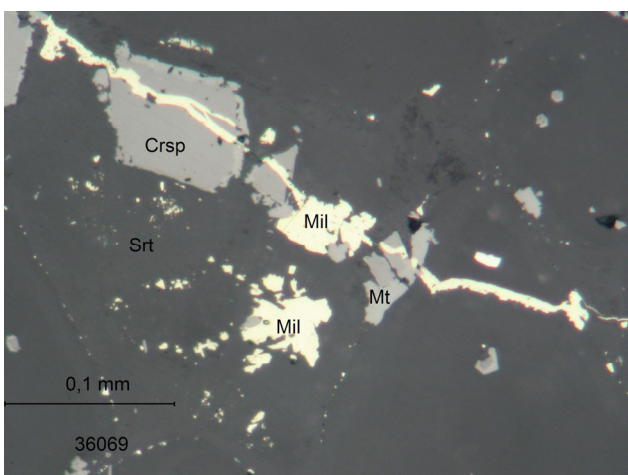


Рис. 4. Миллеритовая вкрапленность и жилки с магнетитом

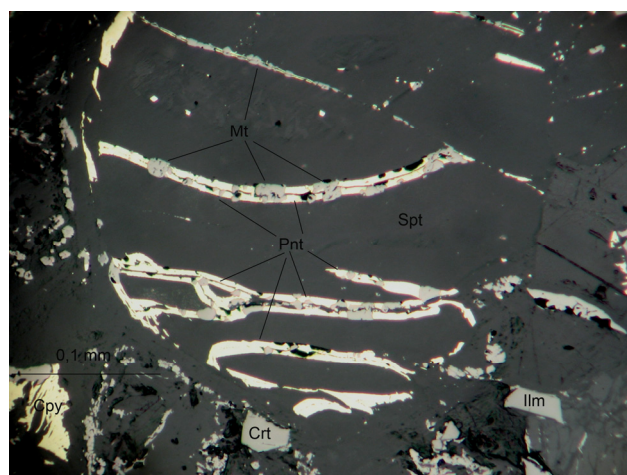


Рис. 5. Магнетит-пентландитовые прожилки в серпентине

Эти особенности вкрапленности обуславливают сложности обогащения руды, поскольку эффективность раскрытия минералов зависит от формы выделения. К наиболее труднообогатимой руде относится руда с широким развитием равномерной пылевидной вкрапленности пентландита. Раскрытие рассматриваемой вкрапленности механическими способами представляет большую сложность.

Наряду с тонкой эпигенетической вкрапленностью пентландита и магнетита в серпентине руды в серпентинитах содержат реликты сингенетической вкрапленности, представляющей комплексную минеральную ассоциацию пирротин + пентландит + халькопирит + магнетит, в которой магнетит является поздней фазой и замещает сульфиды (рис. 6). Состав вкрапленности широко варьирует, но в основном магнетитовый с включениями сульфидов до 20-30%. Замещению подвержен преимущественно пирротин, поэтому сульфидная масса содержит 70-80% пентландита, 10-20% халькопирита, первые % пирротина. Размеры этой вкрапленности составляют 0.1-1.0 мм. Содержание ее в руде варьирует от 0.9 до 2.5%. Генезис вкрапленности связан с магматическим этапом, она относится к сингенетической вкрапленности, метаморфизованной в условиях зеленосланцевой фации. В процессе метаморфизма первичная сульфидная вкрапленность была замещена магнетитом. Морфологически вкрапленность представляет собой неправильные угловатые вкрапления сульфидно-магнетитового состава среди первичных силикатов – оливина и пироксена, во вкрапленниках сульфиды в разной степени замещены магнетитом, в среднем замещение около 80%. Оливин нередко сохранен в ядрах зерен серпентина (рис. 6). Классическое название текстуры такой вкрапленности – сидеронитовая вкрапленность [1]. Она относится к первичной сингенетической сульфидной ассоциации.

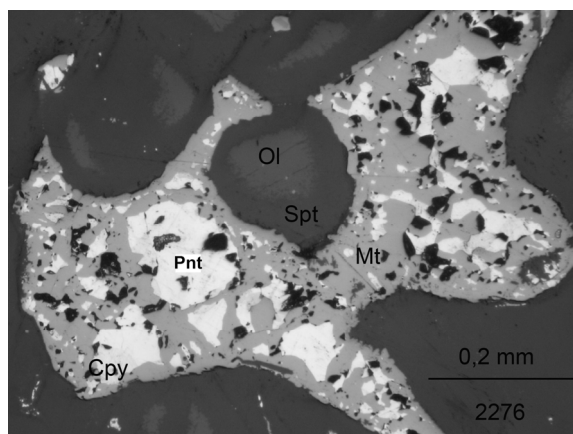


Рис. 6. Вкрапленность с тесным сростанием сульфидов и магнетита

Таким образом, главными особенностями руд в серпентинитах являются:

- широкое развитие никелевых минеральных фаз в виде самостоятельной вкрапленности;
- мелкий размер сульфидной вкрапленности: около 15% сульфидов находится в зернах размером менее 2-5 мкм, представляет нано- и микрочастицы, которые относятся к труднораскрываемой вкрапленности, состав ее преимущественно пентландитовый или миллеритовый;
- присутствие никельсодержащих силикатных фаз, доля силикатного никеля в руде составляет около 8%;
- развитие в руде тонковолокнистой разновидности серпентина – хризотил-асбеста.

Технологические исследования

Технологические исследования осуществлялись на частных пробах руды, отличающихся содержанием ценных компонентов и различной интенсивностью развития хризотил-асбеста, и основной технологической пробе, характеризующей оруденение в целом.

Отмеченные особенности оруденения обусловили проведение детальных исследований закономерностей измельчения руды и раскрытия сульфидов никеля и меди. Показано, что руду целесообразно измельчать в две стадии: в I стадии – до крупности 50% кл. -0.07 мм при использовании стержневой мельницы, а во II стадии – до крупности 85-90% класса -0.07 мм при использовании шаровой мельницы.

В соответствие с выбранным направлением развития рудоподготовки проведены исследования по флотационному обогащению руды. Для флотации в качестве собирателя применялся бутиловый ксантогенат калия, вспенивателя – бутиловый аэрофлот натрия, регулятора среды – кальцинированная сода, активатора сульфидных минералов – медный купорос, депрессора пустой породы – карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ). Для улучшения селективности разделения в качестве дополнительного депрессора использовался гексаметафосфат натрия.

Сравнительные флотационные испытания проб руды с различным содержанием хризотил-асбеста показали отрицательное влияние этого минерала на флотационный процесс. Флотация руды с повышенным содержанием хризотил-асбеста характеризуется снижением селективности процесса в основных и перечистных операциях, значительным увеличением выхода пенного продукта. Так, выход черного концентрата при обогащении такой руды в два раза превышает выход, полученный при флотации руды с незначительным содержанием хризотила, что приводит к снижению качества концентрата и повышенному расходу депрессора силикатов (КМЦ) в перечистных операциях.

Установлено, что использование гексаметафосфата при флотации в щелочной среде значительно стабилизирует флотационный процесс, уменьшая пенообразование и повышая селективность флотации, с одновременным снижением расхода КМЦ в перечистных операциях.

Показано, что при флотации руды в кислой среде, с использованием в качестве регулятора среды серной кислоты, заметно повышается селективность процесса, за счет снижения пенообразования и лучшей депрессии силикатов.

По результатам выполненных исследований разработана технологическая схема обогащения руд массива Соукер, включающая двухстадийную флотацию при крупности измельчения в I стадии 50%, во II стадии 85-90% класса -0.07 мм (рис. 7).

На основе разработанной схемы обогащения проведены опыты по моделированию непрерывного процесса флотации руды в щелочной и кислой средах. Независимо от pH среды получен концентрат с содержанием никеля 4.4% при извлечении около 60%. Содержание никеля в отвальных хвостах составило 0.12-0.13%.

Выводы:

Изучен вещественный и минеральный состав нового типа сульфидного оруденения в Печенгском рудном поле, представленного тонковкрапленными рудами в серпентинизированных перидотитах. Выявлены особенности вещественного состава исследуемых руд, влияющие на их технологические свойства:

- руды в серпентинитах представлены в основном вкрапленным типом, содержание сульфидов в руде низкое 1.5-3.5%, вкрапленность обогащена пентландитом и обеднена пирротинном;
- в руде присутствуют два типа вкрапленности сульфидных минералов – сингенетическая и эпигенетическая, различающиеся минеральным составом и размерами;
- значительная часть никеля связана с тонкой и микроскопической труднораскрываемой вкрапленностью (около 15%) и силикатным никелем (8%), изоморфно входящим в структуру силикатных минералов и переходящим с ними в хвосты обогащения;
- развитие в породах жильного серпентина, представленного хризотил-асбестовой разновидностью, который значительно осложняет технологический процесс.

Разработана технологическая схема обогащения тонковкрапленных руд в серпентинизированных перидотитах (рис. 7), включающая двухстадийную флотацию с крупностью измельчения в I стадии 50%, во II стадии 85-90% класса -0.07 мм, с использованием в качестве дополнительного депрессора силикатов гексаметафосфата натрия.

По разработанной схеме получен медно-никелевый концентрат с содержанием никеля более 4% при извлечении около 60%. Содержание никеля в хвостах составило 0.12%.

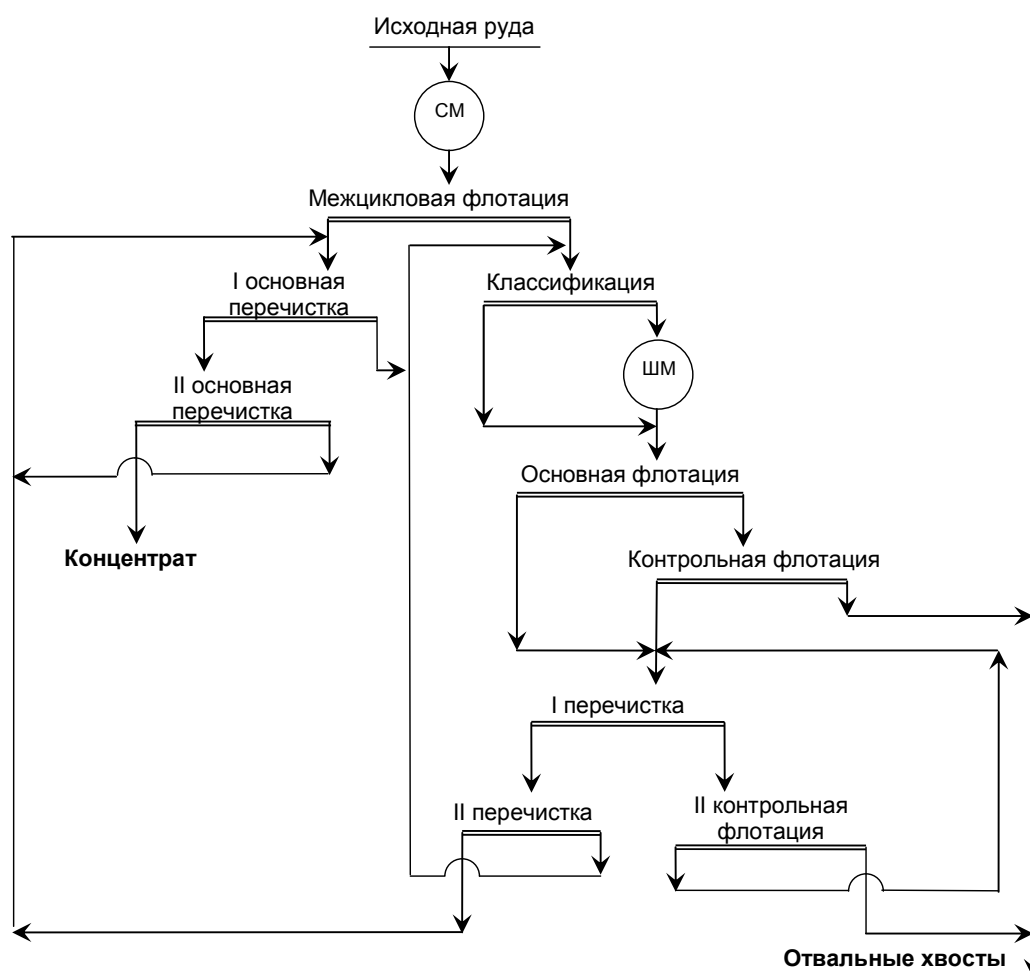


Рис. 7. Принципиальная схема флотационного обогащения бедных серпентинитовых медно-никелевых руд

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов, Г.И. Геология и генезис сульфидных медно-никелевых месторождений Печенги. М.: Недра, 1968. 352 с.
2. Справочник по обогащению руд. Обогащательные фабрики. М.: Недра. 1984. С.52-69.

3. <http://seligdar.ru/news/news-of-market/2009/8/527.html>
4. *Нерадовский Ю.Н.* О прогнозировании промышленного оруденения в интрузивах Печенги по составу сульфидной минерализации в серпентинитах // В кн.: Прогнозирование месторождений полезных ископаемых на Кольском полуострове. Апатиты: изд. Кольского филиала АН СССР, 1985. С. 25-33.
5. *Астафьев Ю.А., Гончаров Ю.В., Веселовский Н.Н., Филимонов Ю.И.* Структура и медно– никелевое оруденение участка Соукер // Новые данные по месторождениям никеля Кольского полуострова. Апатиты: изд. Кольского филиала АН СССР, 1984. С. 28-33.
6. Атлас текстур и структур сульфидных медно-никелевых руд Кольского полуострова / Горбунов Г.И., Яковлев Ю.Н., Астафьев Ю.А., Гончаров Ю.В., Бартенев И.С., Нерадовский Ю.Н. Л.: Изд-во «Наука», Ленингр. Отд., 1973. 177 с.

СТРУКТУРА ПЕРЕДУТОГО МАЛОСЕРНИСТОГО ФАЙНШТЕЙНА И ОСТАТКОВ ЕГО КАРБЕНИЛИРОВАНИЯ

Сорокин В.А.¹, Нерадовский Ю.Н.², Касиков А.Г.³

¹ОАО «Кольская ГМК» г. Мончегорск

² Учреждение Российской академии наук Геологический институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты

³ Учреждение Российской академии наук Институт химии Кольского научного центра РАН, г. Апатиты

Введение

В настоящее время более 100 тыс.т никеля в мире производится по карбонильной технологии [1]. Данная технология основана на извлечении никеля из никельсодержащих материалов в виде летучего тетракарбонила с последующим его разложением на металлический никель и оксид углерода. Достоинством карбонильной технологии по сравнению с другими способами является высокая чистота продукции и возможность производства различных порошков этого металла. Однако это производство по сравнению с электролизной технологией является более затратным. Для снижения себестоимости производства карбонильного никеля на комбинате «Североникель» Кольской ГМК ранее было предложено использовать для получения никеля более дешевый исходный полупродукт – малосернистый передутый файнштейн [2]. В данной работе получение опытной партии малосернистого файнштейна осуществлялось по схеме: дробление рядового файнштейна комбината «Печенганикель», расплавление дроблёного продукта и продувка расплава кислородом в вертикальном конвертере. В результате конвертирования получен крупнукусковой материал со средним содержанием серы ~ 8%.

Структуры исходного файнштейна

Минераграфический анализ малосернистого файнштейна, выполненный в лаборатории минералогии Геологического института КНЦ РАН, показал, что основными компонентами в нем являются, в %: сплав (Co,Cu,Ni) ~ 54, сульфид меди (Cu₂S) – ~ 35, сульфид никеля (Ni₃S₂) – ~ 6, магнетит (Fe₃O₄) – ~ 4, медь (Cu) – ~ 1, платиноид – единичные зерна.

Структуры относятся к дендритовым и гипидиоморфнозернистым (рис. 1). В кобальт-медно-никелевом сплаве содержится около 5% включений сульфида меди и весь сульфид никеля. Платиноид расположен в сульфиде меди. Магнетит частично приурочен к сульфиду меди, но в общем не зависит от главных минералов.

Полученный малосернистый файнштейн, небольшими (5-6 тонн) порциями переплавляли в одноэлектродной дуговой печи постоянного тока. Расплав, выдаваемый из печи, подвергался водной грануляции и направлялся на карбонильное производство. При расплавлении и водной грануляции фазовый состав малосернистого файнштейна не изменился, но отмечено количественное перераспределение основных структурных составляющих. Минеральный состав грансплава, в %: кобальт-медно-никелевый сплав (Co, Cu, Ni) – 55-65, сульфид меди (Cu₂S) – 20-25, сульфид никеля Ni₃S₂ – 10-15, оксид железа – 2-4, медь металлическая – менее 1.

Гранулированный сплав представляет собой грубозернистый порошок с мелкими частицами преимущественно в виде шаров до 3-5 мм (рис. 2), и более крупными – в виде капель, гантелей и прочих сложных овальных форм. Среди гранул металлического сплава присутствуют гранулы на силикатной основе. Наличие силикатной составляющей обусловлено, по-видимому, розливом малосернистого файнштейна после конвертирования в песчаный прудок.