

УДК 553.43'481:622.7(470.21)

## Минералого-технологические исследования бедных серпентинитовых медно-никелевых руд Печенгского рудного поля

А.И. Ракаев<sup>1</sup>, Ю.Н. Нерадовский<sup>2</sup>, Е.В. Черноусенко<sup>1</sup>, Т.А. Морозова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Горный институт КНЦ РАН

<sup>2</sup> Геологический институт КНЦ РАН

**Аннотация.** В статье изложены результаты изучения вещественного и минерального состава нового типа сульфидного медно-никелевого оруденения в Печенгском рудном поле, представленного бедными тонковкрапленными рудами в серпентинизированных перидотитах. Выявлены особенности вещественного состава руд, влияющие на их технологические свойства. На основе минералого-петрографических исследований разработана технологическая схема флотационного обогащения, по которой в условиях замкнутого цикла получен медно-никелевый концентрат с содержанием никеля более 4 % при извлечении около 60 %.

**Abstract.** The paper presents the investigation results of the material and mineral composition of a new type of sulphide copper-nickel mineralization in the Pechenga ore field represented by lean finely disseminated ores in serpentized peridotites. The peculiarities of the material composition of ores affecting their processing properties have been identified. Basing on the mineralogical and petrographic research flotation concentration flow sheet has been developed; in locked cycle conditions it helps to obtain copper-nickel concentrate with content of nickel over 4 % with recovery about 60 %.

**Ключевые слова:** медно-никелевые руды, серпентиниты, вкрапленность, пентландит, измельчение, флотация  
**Key words:** copper-nickel ore, serpentinites, dissemination, pentlandite, grinding, flotation

### 1. Введение

Интенсивное освоение медно-никелевых руд Печенги привело в настоящее время к необходимости разработки более бедных руд и глубоких горизонтов месторождений, где значительно изменяются технологические свойства и типы руд. Вместо традиционных хорошо изученных вкрапленных и брекчиевидных руд (Горбунов, 1968; Справочник..., 1984), в качестве альтернативных в Печенгском рудном поле можно рассматривать и тонковкрапленные руды в серпентинизированных перидотитах. Целью настоящих исследований являлось изучение вещественного состава и технологических свойств таких руд одного из массивов центральной части Печенгского рудного поля.

Печенгское рудное поле сложено туфогенно-осадочными и вулканогенно-осадочными породами четвертой (Пильгуярвинской) 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. 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). Они различаются количеством минералов, текстурами и структурами (табл. 1).

Исследования состава сульфидного оруденения в интрузивах Печенги (Нерадовский, 1985) показали, что в серпентинитах развивается различная сульфидная минерализация, являющаяся результатом постмагматических изменений перидотитов. 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

Таблица 1. Минеральный состав главных текстурных типов руд Печенгского рудного поля, % об.

Минералы	Рассеянно-вкрапленные	Густо-вкрапленные	Брекчиевидные	Сплошные	Прожилково-вкрапленные
<b>Сульфиды:</b> пирротин, пентландит, халькопирит	3.6-10.7 (6.4)	24.5-39.8 (33.6)	24.4-43.8 (36.0)	84.5-96.4 (91.9)	10.4-11.1 (10.7)
<b>Оксиды:</b> магнетит, ильменит, титаномагнетит, хромшпинелид	1.8-9.0 (3.9)	0.5-9.0 (3.4)	-	0.4-1.9 (1.0)	-

(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, это крупное месторождение с низким содержанием никеля.

**2. Минералого-петрографические исследования**

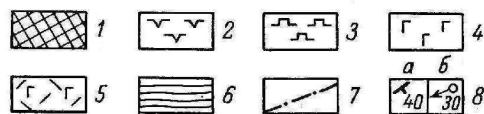
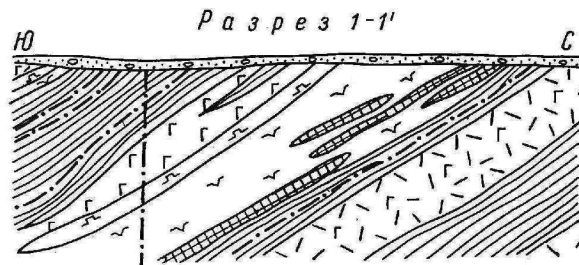
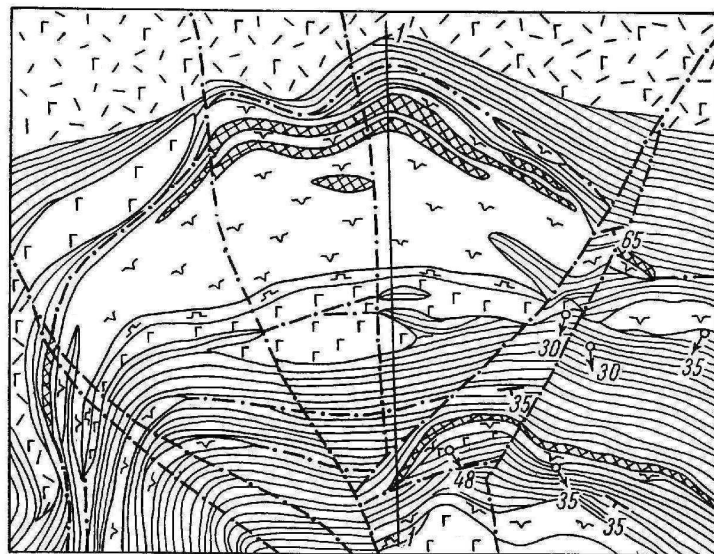
Настоящими исследованиями изучены руды в серпентинитах одного из массивов в средней части Печенгского рудного поля. Он представляет расслоенное интрузивное тело, в составе которого присутствуют габбро, пироксениты и верлиты.

Рудоносными породами в разрезе массива являются серпентиниты, развитые по оливинитам (<5 % Срх), пироксеновым оливинитам (5-10 % Срх) и верлитам (>10 % Срх) (рис. 1).

Эти породы часто перемежаются, максимальные мощности оливинитов и верлитов достигают 50-60 м. 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 %. В отдельных зонах по верлитам развиты талькиты, но мощности этих зон невелики, не более 1-2 м.

Рис. 1. Схематическая геологическая карта и разрез массива (Горбунов и др., 1978)

- 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



В породах неравномерно, по зонам, отмечается развитие хризотил-асбеста в виде тонких параллельных и широких прожилков, часто ветвящихся и как бы пропитывающих породу. Прожилки различные по мощности, от очень тонких, параллельных, до широких. Размеры волокон составляют 1-3 мм.

Главными рудными минералами являются пентландит, халькопирит, пирротин. Пентландит и халькопирит развиты повсеместно, а пирротин встречен в 50 % образцов. В серпентинитах пирротин часто отсутствует, а встречается в основном в породах, обогащенных пироксеном. Второстепенные рудные минералы: миллерит, хизлевудит, борнит, самородная медь. Из них 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 %, изредка концентрация повышается до 5 %. Ильменит присутствует в объеме до 2 % в оливинитах, до 10 % в приконтактных 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 %.

Основные породообразующие минералы представлены серпентином, клинопироксеном (авгитом), оливином, биотитом и хлоритом.

Распространение разновидностей руд в массиве подчинено, вероятно, первичной расслоенности и серпентинизации. Анализ их развития позволяет предполагать, что контролирующими факторами являются распределение пироксена и оливина, а также структура зон серпентинизации пород.

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. 2).

Пентландит в сульфидной массе типичных руд составляет 17-43 %, а во вкрапленной руде в серпентините 52-89 %, или вкрапленность чисто миллеритовая.

Особенностью руд в серпентинитах является развитие двух типов рудной вкрапленности, которые определяют распределение минералов и технологические особенности.

Вкрапленность первого типа представлена в основном магнетитом с включениями сульфидов до 20-30 % (рис. 2). В составе сульфидной массы содержится 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 этой 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, но в основном замещен серпентином (рис. 2). Классическое название текстуры такой вкрапленности – сидеронитовая вкрапленность. Она относится к первичной сингенетической сульфидной ассоциации. Как показали опыты, эта вкрапленность легко раскрывается и измельчается, поскольку сложена двумя хрупкими минералами – магнетитом и пентландитом, а при длительном измельчении переизмельчается. Поэтому целесообразно ее выводить из технологического процесса при первых признаках раскрытия. Первичная вкрапленность интересна тем, что магнетит в ней содержит примесь никеля.

Вкрапленность второго типа представлена зернами пентландита, миллерита и халькопирита в серпентине, здесь около 80 % составляет пентландит, а 20 % – халькопирит, борнит и миллерит (рис. 3).

Таблица 2. Минеральный состав вкрапленных руд в серпентинитах и типичных руд Печенги, % об.

Тип руд	Пирротин	Пентландит	Халькопирит	Миллерит	Сумма окислов
<b>Типичные вкрапленные руды Печенги</b>					
Густо-вкрапленная	27	43	30	-	7
Рассеянно-вкрапленная	73	17	10	-	5
<b>Вкрапленные руды в серпентинитах</b>					
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

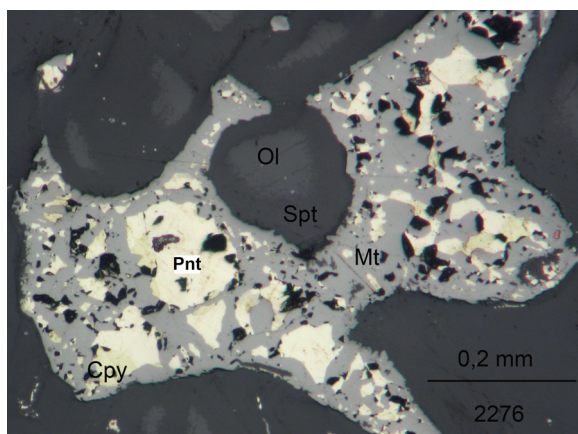


Рис. 2. Первый тип вкрапленности в серпентинитах. Главным минералом является магнетит (Mt), в нем включения сульфидов – пентландита (Pnt) и халькопирита (Spy). Вкрапленник расположен в серпентине (Spt), в котором видны реликты оливина (Ol)

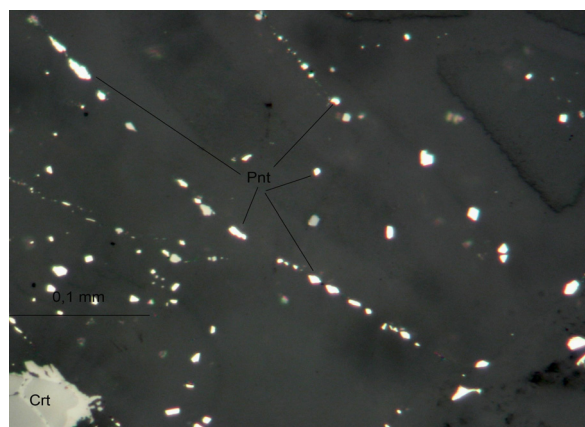


Рис. 3. Второй тип вкрапленности в серпентинитах. Характерны реликты хромшпинелида с каймой магнетита (Crt) и тонкая вкрапленность никелевых сульфидов – пентландита (Pnt)

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. С этим типом вкрапленности часто ассоциирует магнетит, но в отличие от вкрапленности 1-го типа он не замещает сульфиды, а образуется вместе с ними. Генезис этого типа вкрапленности связан с серпентинизацией ультраосновных пород. Эта вкрапленность относится к эпигенетической (метаморфогенной), является следствием замещения оливина серпентином. В процессе замещения из оливина выделяется избыток никеля и железа, которые не входят в структуру серпентина и поэтому "сбрасываются" среди серпентина в виде различных форм зерен пентландита и магнетита. Выделения 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.

Эти особенности вкрапленности второго типа 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.

Таким образом, на основе изучения минерального состава установлено, что 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;
- присутствие никельсодержащих фаз, доля силикатного никеля в руде составляет около 8 %;
- развитие в руде тонковолокнистой разновидности серпентина – хризотила-асбеста.

### 3. Технологические исследования

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

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

Использование стержневой мельницы в голове процесса позволяет с более высокой скоростью измельчать исходную руду без переизмельчения при одновременном обеспечении в питании шаровой мельницы равномерного распределения частиц руды по крупности. Это является необходимым фактором для достижения высокой скорости раскрытия ценных минералов руды в шаровой мельнице при минимальном их переизмельчении.

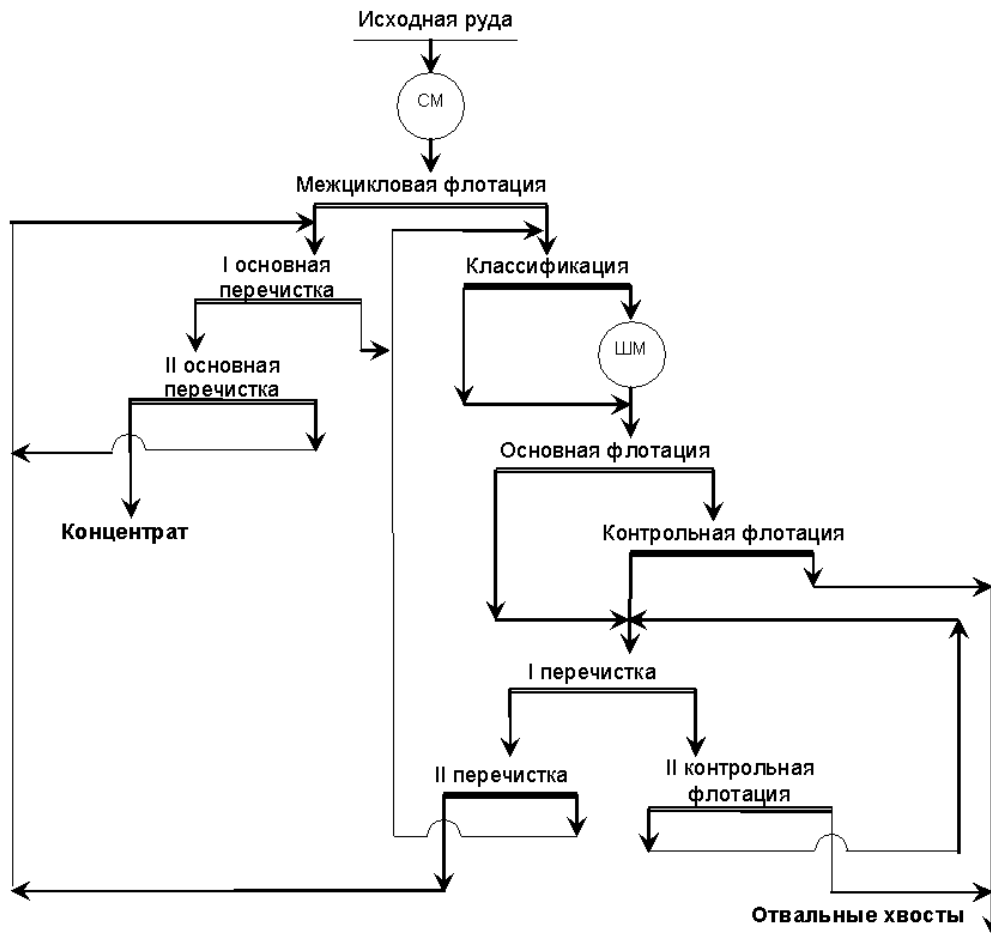


Рис. 4. Принципиальная схема флотационного обогащения бедных серпентинитовых медно-никелевых руд

В стержневой мельнице при относительно грубом измельчении раскрывается крупная (сингенетическая) вкрапленность, а во второй стадии при шаровом измельчении достаточно эффективно вскрываются частицы эпигенетической вкрапленности.

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.

Проведенными исследованиями на оталькованных медно-никелевых рудах Печенги было установлено, что повышенные расходы кальцинированной соды и медного купороса улучшают селективность флотации данного сорта руды, ослабляя отрицательное воздействие на флотацию силикатов (Посыпкин и др., 1979).

Оценка влияния данных реагентов на флотацию руды со значительным развитием хризотил-асбеста показала, что увеличение расхода соды и медного купороса положительно влияет на флотационный процесс, при снижении выхода пенного продукта увеличивается его качество и снижается массовая доля металла в хвостах флотации.

Применение при обогащении медно-никелевых руд солей фосфора (полифосфатов, гексаметафосфатов) интенсифицирует процесс флотации, что объясняется их депрессирующим действием на силикаты, а также повышением флотоактивности сульфидных минералов (Алексеева, 1961; Шубов и др., 1990). Использование гексаметафосфата при обогащении исследуемых руд значительно стабилизирует флотационный процесс, снижая пенообразование и увеличивая селективность флотации, с одновременным снижением расхода депрессора КМЦ в перечистных операциях. Избирательность флотации повышается при введении предварительной агитации пульпы.

По результатам проведенных исследований разработана двухстадиальная схема флотации в щелочной среде (рис. 4). Стадиальность флотации обусловлена присутствием в руде различных видов вкрапленности сульфидов. В концентрат межциклового флотации, после измельчения до 50 % класса -0.07 мм, достаточно эффективно извлекаются минералы первого вида вкрапленности. Для извлечения сульфидов второго типа вкрапленности руда доизмельчается во II стадии до 85-90 % класса -0.07 мм и направляется на основную и контрольную флотации. В дальнейшем концентраты основной и контрольной флотаций после двух перечистных операций направляются в цикл перечистки концентрата межциклового флотации с получением готового продукта.

В результате флотационных испытаний в условиях замкнутого цикла по разработанной схеме получен концентрат с содержанием никеля более 4 % при извлечении около 60 %. Содержание никеля в хвостах флотации составило 0.12 %. По данным минералогической оценки потери никеля с хвостами обогащения связаны с присутствием в руде тонкой пылевидной практически нераскрываемой вкрапленности сульфидов и силикатного никеля.

#### 4. Выводы

1. 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 и силикатным никелем, 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.

2. Разработана технологическая схема обогащения тонковкрапленных руд в серпентинизированных перидотитах, включающая двухстадиальную 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.

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

#### Литература

- Алексеева Р.К. Лабораторные испытания гексаметафосфата натрия при флотации медно-никелевой руды. *Цветная металлургия*, № 22, с.27-28, 1961.
- Горбунов Г.И. Геология и генезис сульфидных медно-никелевых месторождений Печенги. М., Недра, 352 с., 1968.
- Горбунов Г.И., Астафьев Ю.А., Бартенев И.С., Гончаров Ю.В., Яковлев Ю.Н. Структуры медно-никелевых рудных полей и месторождений Кольского полуострова. Л., Наука, 160 с., 1978.
- 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, КФ АН СССР*, с.25-33, 1985.
- Посыпкин Л.Д., Арсентьев В.А., Климов Э.Н., Блатов И.А., Иевлев Ю.В., Зеленская Л.В. Совершенствование технологии обогащения вкрапленных медно-никелевых руд. *Обогащение руд*, № 1, с.3-7, 1979.
- Справочник по обогащению руд. Обогащительные фабрики. М., Недра, с.52-69, 1984.
- Шубов Л.Я., Иванков С.И., Щеглова Н.К. Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья. М., Недра, кн.1, с.312, 1990.