

УДК 622.765 : 622.765.061.2

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ
ТРУДНООБОГАТИМЫХ СУЛЬФИДНЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД
ПЕЧЕНГСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ**

**Е. В. Черноусенко, Ю. Н. Нерадовский, Ю. С. Каменова,
И. Н. Вишнякова, Г. В. Митрофанова**

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: chern@goi.kolasc.net.ru,
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Представлены результаты исследований, проведенные на бедной труднообогатимой медно-никелевой руде. На основе минералого-технологического анализа выявлены особенности вещественного состава руды, негативно влияющие на ее технологические свойства — мелкая первичная вкрапленность, значительная серпентинизация и замещение вкрапленников магнетитом, а также существенная доля тонкой труднораскрываемой эпигенетической вкрапленности. Установлены основные причины недостаточного извлечения никеля при принятых режимах переработки. С целью повышения эффективности обогащения исследуемой руды рассмотрены различные режимы измельчения и флотации. Определены пути повышения технологических показателей обогащения для руд данного типа.

Медно-никелевые руды, раскрытие минералов, режим рудоподготовки, флотация

DOI: 10.15372/FTPRPI20180617

Сульфидные медно-никелевые месторождения составляют основу минерально-сырьевой базы ведущих стран производителей никеля. В России запасы таких руд сосредоточены в Норильском рудном районе и на Кольском полуострове. Перерабатываемые руды Печенгского рудного поля, в отличие от норильских, характеризуются более низким содержанием сульфидов и относительно стабильным составом рудных и силикатных минералов [1, 2]. Вместе с тем показатели обогащения в значительной мере предопределяются не только исходным содержанием сульфидов, но и соотношением рудных и силикатных минералов, их взаимосвязью, метасоматическими замещениями и другими минералого-технологическими параметрами [3].

Высокая степень промышленного освоения балансовых запасов сульфидных медно-никелевых руд диктует необходимость вовлечения в переработку более бедных труднообогатимых руд, характеризующихся низким содержанием и тонкой вкрапленностью ценных минералов. При переработке таких руд традиционно используемые технологические схемы и реагентные режимы не обеспечивают получение необходимых показателей обогащения.

Цель настоящей работы — изучение минералого-технологических особенностей бедной труднообогатимой медно-никелевой руды Печенгского рудного поля и рассмотрение возможных путей повышения эффективности ее обогащения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения минералогических исследований использованы основные оптические методы минералогического анализа — минераграфический и петрографический. Исследования проводили в отраженном свете на микроскопах Ultraphot-3 (Opton), “Labor mikroskopes” и ПОЛАМ Р-311 (ЛОМО), увеличение до $1500\times$, разрешение до 0.2 мкм. Минеральный состав исходной руды определен методом рентгенофазового анализа на порошковом рентгеновском дифрактометре D2 PHASER производства компании Bruker AXS GmbH.

Измельчение руды для флотационных опытов осуществляли в шаровой мельнице объемом 7 л при соотношении Т : Ж = 1 : 0.6. Флотационные опыты выполняли во флотомашине механического типа с объемом камер от 0.5–3.0 л. Флотацию проводили в открытом цикле на свежей воде при Т : Ж = 1.0 : 2.5. Время основной флотации составляло 10 мин, контрольной — 15 мин. Полученный в результате основной и контрольной флотаций черновой концентрат подвергали двум последовательным перечистным операциям в течение 3 и 2 мин.

В качестве собирателей использовали бутиловый ксантогенат калия Kx, подаваемый в измельчение, и бутиловый аэрофлот натрия Af, для активации сульфидных минералов — медный купорос, в качестве депрессора порообразующих минералов в перечистных операциях — карбоксиметилцеллюлоза КМЦ.

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Минералого-петрографическая оценка руды показала, что основными породами являются существенно серпентинизированные перидотиты (от начальной стадии серпентинизации 20–30 % до полного их замещения), доля которых в исследуемой руде составляет 80–85 %. Породообразующие минералы представлены серпентином, пироксеном, амфиболами, тальком и оливином, основные рудные минералы — пирротин, пентландит, халькопирит, магнетит. Сульфидная вкрапленность в перидотитах относится к двум генетическим типам оруденения: сингенетическому и эпигенетическому. Первичная (сингенетическая) вкрапленность рассеянная, средне-мелковкрапленная, неравномерная. Преимущественный размер вкрапленников составляет 0.4–0.6 мм. Состав вкрапленников чаще всего полиминеральный: пентландит-пирротин, халькопирит-пентландит-пирротин, халькопирит-пентландит. Сульфидные вкрапленники в различной степени замещены магнетитом от 10–20 до 75–80 %, что на порядок уменьшает размер сингенетической вкрапленности (рис. 1а–в).

При процессах аутометаморфизма перидотитов первичная вкрапленность замещается чешуйками серпентина, реже талька или хлорита. Значительная степень серпентинизации пород приводит к почти полному замещению первичных вкрапленников игольчатым серпентином, с уменьшением размера зерен сульфидов на один-два порядка — до 5–50 мкм (рис. 1з), и существенному развитию в таких измененных перидотитах эпигенетической вкрапленности. Для сульфидов эпигенетического генезиса характерны субмикроскопические точечные, цепочечные выделения в сильно измененных породах, каемки вокруг зерен оливина и пироксенов (рис. 2а, б).

Содержание туфогенно-осадочных пород в составе исследуемой пробы руды составляет 10–15 %. Сульфидная минерализация изменяется от убогой тонковкрапленной (средний размер зерен 0.05–0.15 мм) до богатой, с неправильно-прожилковыми или пятнисто-сетчатыми формами выделения сульфидов. По составу она преимущественно пирротин-халькопиритовая, пентландит встречается реже. Доля метагаббро в руде 5–8 %. Сульфидная минерализация бедная, тонко-мелковкрапленная.

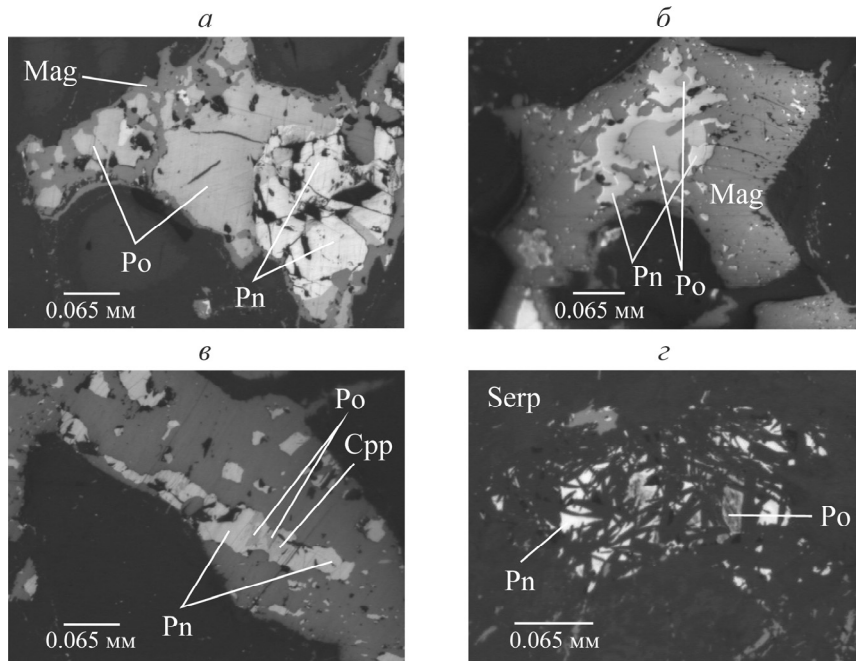


Рис. 1. Виды сингенетической вкрапленности в исследуемой пробе медно-никелевой руды: *а* — слабо замещенная магнетитом первичная сульфидная вкрапленность; *б, в* — существенно замещенная магнетитом пентландит-пирротиновая вкрапленность; *г* — замещение пентландит-халькопиритовой первичной вкрапленности серпентином; Pn — пентландит; Ccp — халькопирит; Po — пирротин; Serp — серпентин; Mag — магнетит

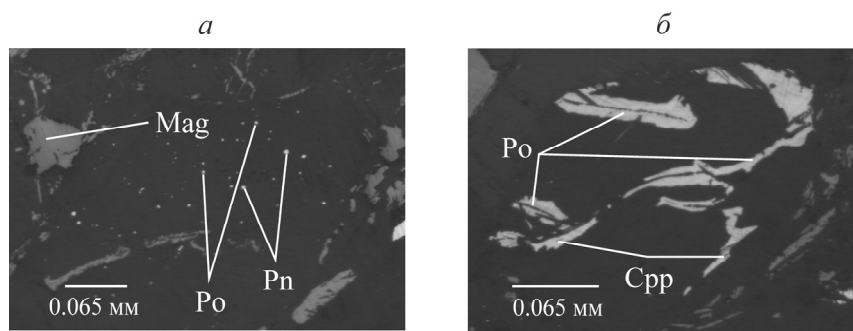


Рис. 2. Виды эпигенетической вкрапленности в исследуемой пробе медно-никелевой руды: *а* — эпигенетические микровключения пентландита и пирротина; *б* — прожилковые выделения эпигенетического пирротина и халькопирита в серпентинизированном метапиротите

Минеральный состав, определенный методом РФА показал, что доля главных сульфидных минералов составляет 4.5%, в том числе пирротина — 2.6, пентландита — 1.4, халькопирита — 0.5%. По содержанию главных сульфидных минералов можно констатировать, что руда является бедной. По данным химического анализа содержание никеля в руде — 0.495%, меди — 0.211%.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Флотация — основной способ обогащения вкрапленных медно-никелевых руд. Распространенной схемой является коллективная флотация никель- и медьсодержащих сульфидов в щелочной среде (pH 9.5–9.8), создаваемой кальцинированной содой [4, 5]. Такая схема используется и при обогащении руд Печенги. Измельчение руды осуществляется до крупности 80% класса –0.071 мм. При проведении флотационных исследований по традиционному режиму извлечение в черновой концентрат составило Ni — 69.96, Cu — 75.86% (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Результаты флотации руды по традиционной технологии обогащения, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение		Расход реагентов, г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Черновой концентрат	17.42	1.990	0.913	69.96	75.86	Kx 135
Хвосты	82.58	0.180	0.061	30.05	24.14	Af 95
Исходный	100.00	0.495	0.210	100.00	100.00	—

Как показывает практика обогащения вкрапленных медно-никелевых руд, такое извлечение никеля в черновой концентрат не обеспечивает в дальнейшем получение готового концентрата необходимого качества при достаточном извлечении. По данным минералогического анализа руда, измельченная до флотационной крупности, характеризуется низким раскрытием сульфидов (~60%). Во фракциях +0.071 и -0.071 + 0.045 мм раскрытие составляет ~10 и 40% соответственно. Наибольшее раскрытие отмечается во фракции -0.045 мм и оценивается в 80%. Значительный объем сульфидов находится в различных сростках, среди которых можно выделить четыре основных типа (рис. 3) [6]. Сростки типа 1 и 4 — самые сложные и в большинстве своем нераскрываемые. В крупных фракциях преобладают сростки сульфидов с силикатами типа 2. Включения сульфидов в этих сростках достигают 50 мкм и, скорее всего, могут быть раскрыты при более тонком измельчении.

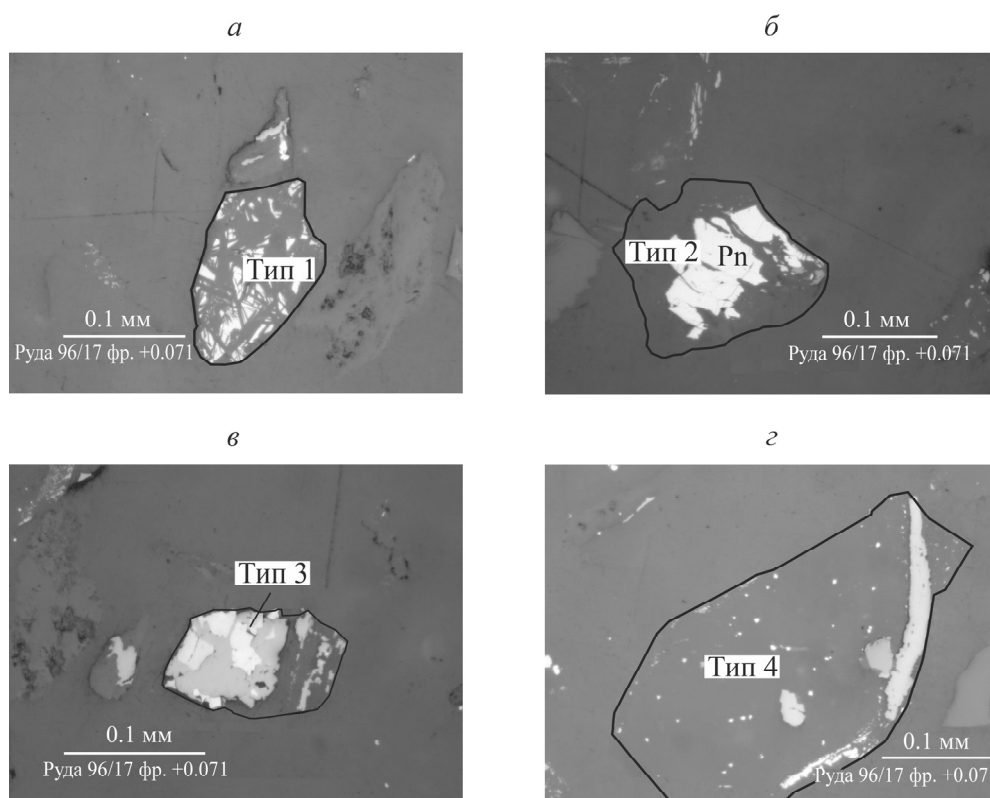


Рис. 3. Типовые сростки сульфидов с породообразующими минералами и магнетитом: *а* — тип 1, сетчатые сростки сульфидов с серпентином; *б* — тип 2, сростки сульфидов с тонкозернистыми разностями серпентина в крупных фракциях; *в* — тип 3, сростки сульфидов с магнетитом; *з* — тип 4, эмульсионная вкрапленность сульфидов в серпентине; Pn — пентландит

Снижение крупности измельчения руды до 97 % класса –0.071 мм (88 % класса –0.045 мм) подтвердило возможность увеличения степени раскрытия сульфидов. По минералогическим данным раскрытие сульфидов в этом случае составило ~90 %, что дало возможность увеличить извлечение никеля в черновой концентрат до 74.28 % при снижении его массовой доли в хвостах флотации с 0.18 % (при крупности 80 % класса –0.071 мм) до 0.158 % (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Результаты флотации руды при крупности измельчения 97 % класса –0.071 мм, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение		Расход реагентов, г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Черновой концентрат	23.19	1.510	0.770	74.28	83.47	Kx 135
Хвосты	76.81	0.158	0.046	25.72	16.53	Af 95
Исходный	100.00	0.472	0.214	100.00	100.00	—

Известно, что при снижении крупности измельчения руды возрастает поглотительная способность пульпы по отношению к реагентам, что приводит к необходимости повышения их расхода [7]. Увеличение расхода Kx и Af на 30 % позволило повысить извлечение никеля в черновой концентрат до 78.32 % при снижении его содержания в хвостах флотации до 0.149 % (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Результаты флотации руды при крупности измельчения 97 % класса –0.071 мм с повышенным расходом реагентов, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение		Расход реагентов г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Черновой концентрат	27.21	1.440	0.612	78.32	85.45	Kx 175
Хвосты	72.79	0.149	0.039	21.68	14.55	Af 123
Исходный	100.00	0.500	0.195	100.00	100.00	—

Для повышения селективности разделения частиц в тонкодисперсных пульпах используются реагенты-диспергаторы, такие как жидкое стекло, фосфаты, крахмал и т. д. [8]. Показано, что использование гексаметафосфата в рудном цикле флотации при обогащении бедных серпентинитовых медно-никелевых руд Печенгского рудного поля стабилизирует процесс и улучшает селективность разделения, в том числе и в перечистных операциях [9]. Применение реагента-диспергатора этилцеллозольва при флотации медно-никелевых руд повышает извлечение никеля в концентрат [10]. Известно использование в качестве диспергатора ультратонкого пентландита полимерных соединений на основе этиленоксидов этилена и пропилена [11].

Для пептизации шламов и повышения селективности разделения исследованы реагенты карбоксиметилцеллюлоза КМЦ, гексаметафосфат натрия ГМФ, жидкое стекло ЖС (табл. 4). Реагенты-диспергаторы подавали в цикл рудной флотации (основную и контрольную). Полученный черновой концентрат подвергали двум последовательным перечистным операциям с использованием КМЦ в качестве депрессора пустой породы.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования реагентов КМЦ, ГМФ и ЖС в качестве диспергаторов в рудном цикле флотации при обогащении исследуемой руды, измельченной до крупности 97 % класса –0.071 мм. Применение данного типа реагентов способствует не только повышению извлечения цветных металлов в черновой концентрат, но и увеличению извлечения в готовый концентрат никеля на 1.2–2.1 %, меди на 0.4–2.1 % при близком качестве и расходе КМЦ в перечистных операциях.

ТАБЛИЦА 4. Результаты обогащения с использованием различных реагентов-диспергаторов в рудном цикле флотации, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение		Расход реагентов, г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Концентрат	3.15	6.970	3.720	43.92	60.09	Без реагентов
Объединенный промпродукт	24.06	0.715	0.206	34.40	25.36	—
Черновой концентрат	27.21	1.440	0.612	78.32	85.45	—
Хвосты	72.79	0.149	0.039	21.68	14.55	—
Исходный	100.00	0.500	0.195	100.00	100.00	—
Концентрат	3.41	6.840	3.650	45.77	60.94	КМЦ 130
Объединенный промпродукт	30.12	0.611	0.181	36.10	26.69	—
Черновой концентрат	33.53	1.240	0.533	81.87	87.63	—
Хвосты	66.47	0.139	0.038	18.13	12.37	—
Исходный	100.00	0.510	0.204	100.00	100.00	—
Концентрат	3.21	7.280	3.830	45.12	60.51	ГМФ 130
Объединенный промпродукт	34.12	0.576	0.171	37.92	28.38	—
Черновой концентрат	37.33	1.150	0.490	83.04	88.89	—
Хвосты	62.67	0.140	0.036	16.96	11.11	—
Исходный	100.00	0.518	0.206	100.00	100.00	—
Концентрат	3.35	6.820	3.790	46.00	62.18	ЖС 130
Объединенный промпродукт	30.75	0.566	0.174	35.03	26.18	—
Черновой концентрат	34.10	1.180	0.529	81.03	88.36	—
Хвосты	65.90	0.143	0.036	18.97	11.64	—
Исходный	100.00	0.497	0.204	100.00	100.00	—

ВЫВОДЫ

Исследуемая медно-никелевая руда является труднообогатимой, о чем свидетельствует мелкая первичная вкрапленность (0.4–0.6 мм), значительная серпентинизация и замещение вкрапленников магнетитом, а также существенная доля тонкой труднораскрываемой эпигенетической вкрапленности. Основная причина потерь никеля с хвостами флотации при обогащении исследуемой руды по традиционному режиму заключается в недостаточном раскрытии сульфидов при измельчении до крупности 80 % класса –0.071 мм, что связано с более мелкой вкрапленностью ценных минералов по сравнению с рядовыми рудами. Снижение крупности измельчения до 97 % класса –0.071 мм и увеличение расхода собирателей позволяет повысить извлечение никеля в черновой концентрат не менее чем на 8 %, при снижении его массовой доли в хвостах флотации с 0.180 до 0.149 %. Использование реагентов-диспергаторов при обогащении тонкоизмельченной руды улучшает селективность разделения не только в рудном цикле флотации, но и благоприятно сказывается на ходе перемешивающих операций, что делает возможным повысить извлечение никеля в готовый концентрат на 1.2–2.1 % при близком качестве с традиционным режимом.

Снижение крупности измельчения, увеличение расхода собирателей и введение реагента-диспергатора в рудный цикл флотации способствует увеличению извлечения цветных металлов в концентрат при снижении их массовой доли в хвостах флотации. Повышение эффективности обогащения руд данного типа должно связываться в первую очередь со снижением крупности измельчения для более полного раскрытия сростков и поиском селективных реагентов и флотационных режимов для обогащения тонкодисперсных пульп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горбунов Г. И.** Геология и генезис сульфидных медно-никелевых месторождений Печенги. — М.: Недра, 1968. — С. 352.
2. **Яковлев Ю. Н.** Минералогия сульфидных медно-никелевых месторождений Кольского полуострова. — Л.: Наука, 1981. — С. 352.
3. **Скляднева Л. Ф.** Обогащение вкрапленных бедных медно-никелевых руд. — Апатиты: ГоИ КНЦ РАН, 1994. — 105 с.
4. **Справочник** по обогащению руд. Т. 4. Обоганительные фабрики. — М.: Недра, 1984. — 360 с.
5. **Богданов О. С., Максимов И. И., Поднек А. К., Янис Н. А.** Теория и технология флотации руд. — М.: Недра, 1990. — 363 с.
6. **Лихачева С. В., Нерадовский Ю. Н.** К вопросу о типизации сростков сульфидных минералов во вкрапленных рудах Печенги // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2013): материалы Междунар. совещания, г. Томск, 16–19 сентября 2013 г. — Томск: ТПУ, 2013. — С. 64–67.
7. **Абрамов А. А.** Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. — М.: МГГУ, 2005. — 470 с.
8. **Абрамов А. А.** Собрание сочинений. Т. 7. Флотация. Реагенты-собиратели. — М.: Горная книга, 2012. — 654 с.
9. **Ракаев А. И., Нерадовский Ю. Н., Черноусенко Е. В., Морозова Т. А.** Минералого-технологические исследования бедных серпентинитовых медно-никелевых руд Печенгского рудного поля // Вестн. МГГУ. — 2009. — Т. 12. — № 4. — С. 632–637.
10. **Блатов И. А.** Обогащение медно-никелевых руд. — М.: Руда и металлы, 1998. — 224 с.
11. **Peng Y., Liu D., and Chen X.** Selective flotation of ultrafine nickel sulphide from serpentine in saline water by pluronic triblock copolymer, XXVI Int. Mineral Proc. Congr. Proceedings, New Delhi, India, 2012. — P. 4179–4190.

*Поступила в редакцию 18/V 2018
После доработки 29/X 2018
Принята к публикации 28/XI 2018*