

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ДОИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД

Е.В. Черноусенко¹, И.Н. Вишнякова¹, Ю.С. Каменева¹, Ю.Н. Нерадовский²

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, e-mail: chern@goi.kolasc.net.ru

² Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Аннотация: Колоссальные объемы отходов предприятий горнопромышленного комплекса создают серьезные экономические и экологические проблемы. Для поддержания существующих отвалов и хвостохранилищ необходимы значительные капитальные и материальные затраты. Особую угрозу для окружающей среды представляют сульфидсодержащие отходы, относящиеся к группе наиболее экологически опасных. Изучена возможность использования флотационных и магнитных методов обогащения для доизвлечения цветных металлов из лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд, отобранных с дамбы хвостохранилища АО «Кольская ГМК». Выполненным комплексом минералого-технологических исследований и оценки раскрытия сульфидных минералов определена оптимальная крупность измельчения и режимы флотации. Флотационным методом получен обогащенный продукт с содержанием никеля 0,39% и меди 0,20% при извлечении 44 и 59% соответственно. Степень концентрации полезных компонентов составила 1,8 для никеля и 2,4 для меди. Использование магнитной сепарации позволило получить более высокое извлечение никеля (49—60%) и более низкие по содержанию никеля хвосты. Наиболее целесообразным представляется комбинация магнитных и флотационных методов, с использованием в голове процесса магнитной сепарации.

Ключевые слова: хвосты обогащения, медно-никелевые руды, извлечение, флотация, магнитная сепарация.

Для цитирования: Черноусенко Е. В., Вишнякова И. Н., Каменева Ю. С., Нерадовский Ю. Н. Оценка возможности доизвлечения цветных металлов из лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С. 196–206. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-196-206.

Appraisal of capabilities of nonferrous metal recovery from old copper–nickel ore processing tailings

E.V. Chernousenko¹, I.N. Vishnyakova¹, Yu.S. Kameneva¹, Yu.N. Neradovskiy²

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
e-mail: chern@goi.kolasc.net.ru

² Geological Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract: The colossal volume of waste in the mineral mining and processing industry create deep ecological and economic problems. Management of existing waste dumps and tailings ponds involves much capital cost and difficulties. Specific environmental threat is imposed by sulphide-bearing waste regarded as the most ecologically destructive material. This study addresses usability of flotation and magnetic separation waste for recovery of nonferrous metals in terms of old copper–nickel ore processing tailings sampled at tailings dam of the Kola Mining and Metallurgical

© Е.В. Черноусенко, И.Н. Вишнякова, Ю.С. Каменева, Ю.Н. Нерадовский. 2019.

Company. The implemented mineralogical and technological research, as well as assessment of dissociation of sulphide minerals determines optimal milling coarseness and flotation modes. Flotation produces concentrate containing 0.39% of nickel and 0.20% at the recovery of 44 and 59%, respectively. The concentration ratio of useful components is 1.8 for nickel and 2.4 for copper. Magnetic separation offers higher recovery of nickel (49–60%) and yields tailings with lower nickel content. It is the most efficient approach to combine magnetic and flotation methods, with application of magnetic separation in the beginning of the process.

Key words: tailings, copper–nickel ore, recovery, flotation, magnetic separation.

For citation: Chernousenko E. V., Vishnyakova I. N., Kameneva Yu. S., Neradovskiy Yu. N. Appraisal of capabilities of nonferrous metal recovery from old copper–nickel ore processing tailings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(7):196-206. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-196-206.

Введение

За многолетнюю работу предприятий горнопромышленного комплекса в отвалах и хвостохранилищах на территории Мурманской области накоплены миллиарды тонн отходов добычи и обогащения руд. Согласно данным Министерства природных ресурсов и экологии Мурманской области ежегодный прирост отходов недропользования составляет около 200 млн т [1].

Огромные объемы отвалов вскрышных пород и хвостохранилищ уже сейчас создают серьезные экономические и экологические проблемы [2]. Поддержание этих объектов требует значительных капитальных и материальных затрат. К группе наиболее экологически опасных относятся сульфидосодержащие отходы. В процессе хранения таких отходов происходит окисление сульфидов и переход части цветных металлов в растворимые в воде сульфаты, что представляет серьезную опасность для окружающей среды [3–5].

Несмотря на низкое содержание ценных компонентов, перспективность использования техногенных отходов очевидна, так как позволяет одновременно решать целый ряд экономических, социальных и экологических проблем. Исходя из того, что техногенные образования располагаются в зоне действующих предприятий, не требуют вскрышных работ, оснащения транспортными и энер-

гетическими коммуникациями, обеспечены трудовыми ресурсами, требуемые затраты на их переработку могут быть значительно ниже, чем при организации эксплуатации новых месторождений.

В Российской Федерации горнопромышленные отходы используются, главным образом, как сырье для промышленности строительных материалов, в объеме не более 10% годового их образования. В то же время, за рубежом из горнопромышленных отходов с помощью нетрадиционных технологий получают более 40% годового объема меди, 35% золота и значительную долю других металлов [6].

Исследования в этой области ведутся в различных направлениях. Так, для обогащения крупнокусковых руд цветных металлов отвалов добычи и переработки металлов отвалов добычи и переработки рациональными решениями являются использование гравитационных и магнитных методов [7–9]. Тонкозернистые хвосты обогатительных фабрик целесообразно перерабатывать с применением флотационных и гидрометаллургических технологий или их комбинации. Использование технологии струйной паровоздушной флотации предложено для переработки отвальных шлаков металлургического производства [10], флотации с применением сочетания реагентов — для техногенного медьсодержащего сырья [11] и хвостов флотационного обогащения свинцово-цинковых руд [12]. Пока-

зана возможность флотационного извлечения сульфидов, с использованием селективной флокуляции при флотации шламовой фракции, из отвальных хвостов обогащения медно-никелевой руды Талнахской обогатительной фабрики [13, 14]. Флотационные методы рассмотрены для извлечения из отвальных хвостов меди, кобальта [15, 16], сфалерита [17]. В работах [18–20] предложено использование для извлечения цветных металлов гидрометаллургических технологий. Перспективность применения комбинированных флотационно-гидрометаллургических технологий показана в работах [21, 22].

В данной работе рассмотрена возможность использования флотационных и магнитных методов обогащения для доизвлечения цветных металлов из легких хвостов обогащения медно-никелевых руд, с целью последующей их гидрометаллургической переработки.

Материалы и методы

Объектом исследований являлись хвосты обогащения медно-никелевых руд, отобранные с дамбы хвостохранилища АО Кольская ГМК, г. Заполярный. По ориентировочным оценкам в отходах обогащения компании находятся запасы цветных металлов (Ni, Cu, Co) в количестве более 1250 тыс. т [23].

Минеральный состав пробы определялся в искусственных аншлифах в отраженном свете на микроскопах Ultra-phot-3 (Opton), «Labor mikroskopes» и ПОЛАМ Р-311 (ЛОМО), увеличение до 1500х, разрешение до 0,2 мкм. Измерение размеров зерен выполнялось насадкой МОВ-1-15х к оптическим микроскопам, минимальный размер измеряемого зерна составляет 0,0025 мм.

Измельчение проб хвостов для флотационных опытов осуществлялось в шаровой мельнице при соотношении Т:Ж — 1:0,6. Оценка флотационной обогатимо-

сти отвальных хвостов проводилась во флотомашинах механического типа. Схема включала основную и контрольную операции флотации. Опыты осуществлялись в открытом цикле на водопроводной воде. Необходимое значение pH среды создавалось добавлением кальцинированной соды (Na_2CO_3). В качестве собирателей использовались бутиловый ксантогенат калия (Кх), и бутиловый аэрофлот натрия (Аф), для активации сульфидных минералов — медный купорос.

Исследование обогатимости отвальных хвостов с использованием магнитных методов проводилось на лабораторном электромагнитном сепараторе для сухого обогащения слабомагнитных руд марки СЭ-138 Т.

Результаты и обсуждение

Минералогические исследования показали, что основными породообразующими минералами пробы хвостов являются серпентин, пироксен, амфиболы, оливин и тальк. Главные рудные минералы представлены сульфидами — пирротин, пентландитом, халькопиритом; и оксидами — магнетитом, хромшпинелидом, ильменитом. Содержание основных компонентов в материале пробы составило: Ni — 0,22%, Cu — 0,08%, Co — 0,01%, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ — 13,64%, S — 0,90%.

Исследуемая проба на 50% представлена материалом крупностью — 0,071 мм (табл. 1). Во всех классах крупности отмечаются близкие содержания Ni и Cu, концентрации цветных металлов в каком-либо классе не наблюдается. Для $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и S характерно увеличение содержания с уменьшением класса крупности, что обусловлено увеличением количества пирротина и магнетита в более мелких классах.

Оценка раскрытия минералов показала, что во фракции более 0,071 мм из общей массы сульфидов раскрыто около 5%. С уменьшением класса крупности доля

Таблица 1

Гранулометрический состав пробы хвостов и распределение компонентов по классам крупности

Granulometric composition of tailing samples and the distribution of components by size class

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %					Распределение, %				
		Ni	Cu	Co	Fe _{общ.}	S	Ni	Cu	Co	Feобщ.	S
+0,16	9,03	0,24	0,100	0,010	9,87	0,56	9,76	10,93	9,53	6,53	5,67
-0,16+0,10	20,43	0,23	0,094	0,010	10,37	0,57	21,50	23,17	21,57	15,53	13,03
-0,10+0,071	20,87	0,23	0,088	0,010	11,35	0,67	21,70	22,07	21,87	17,37	15,53
-0,071+0,05	11,03	0,22	0,081	0,010	12,40	0,76	10,97	10,83	11,00	10,03	9,33
-0,05+0,020	23,30	0,21	0,070	0,010	15,34	1,06	21,90	19,70	22,10	26,20	27,47
-0,020	15,33	0,20	0,072	0,009	21,65	1,70	14,17	13,30	13,93	24,33	28,97
Итого	100,0	0,22	0,083	0,010	13,64	0,90	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

свободных зерен сульфидов увеличивается и достигает в классе $-0,05+0,02$ мм — 50%, в классе $-0,02$ мм — 80%. Возрастает также количество свободного маг-

нетита. В раскрытой форме присутствуют все сульфиды и оксиды. Среди сульфидов преобладает пирротин, среди оксидов — магнетит (рис. 1).

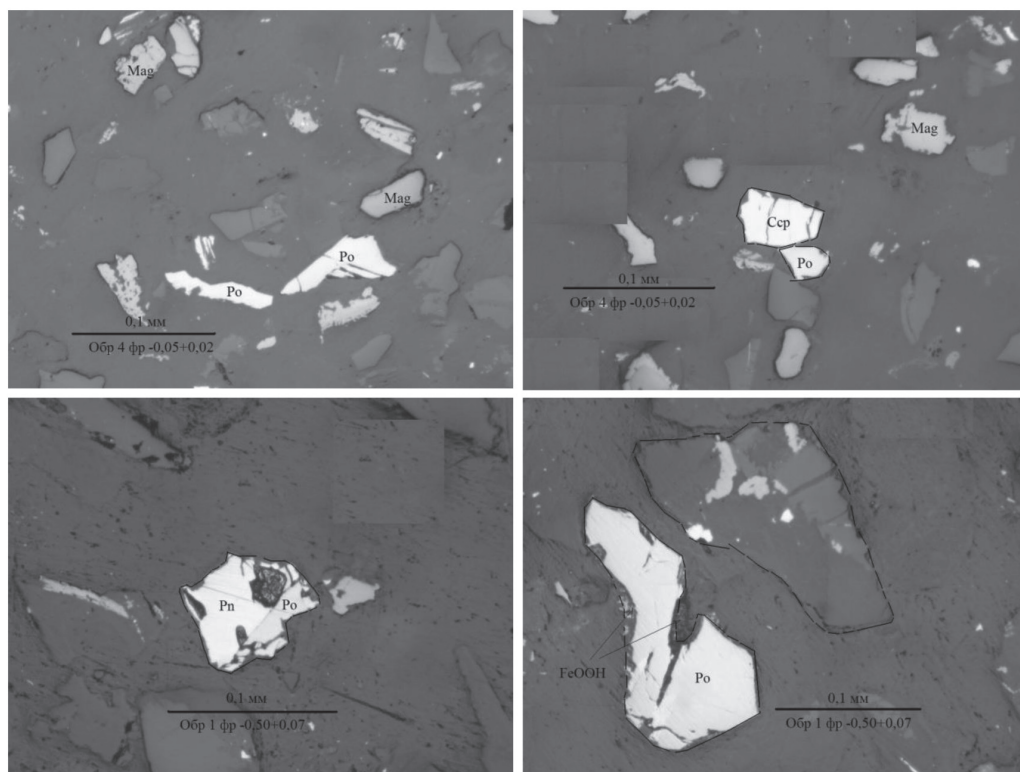


Рис. 1. Морфология раскрытых частиц сульфидов и магнетита; Pn — пентландит, C_{cp} — халькопирит, Po — пирротин, Mag — магнетит

Fig. 1. Morphology of liberated particles of sulphides and magnetite; Pn — pentlandite, C_{cp} — chalcopyrite, Po — pyrrhotite, Mag — magnetite

Признаки окисления сульфидов наблюдаются во всех фракциях хвостов. Окисление представлено каемками вокруг сульфидов, прожилками в силикатах и цементом между зернами минералов гидроокисла железа типа гетита. К окислению можно отнести также развитие виоларита по пентландиту. В целом объеме замещения незначителен, но развитие окисления в виде пленочных образований, возможное на всех зернах сульфидов, может отрицательно повлиять на результаты флотации.

Сростки сульфидов представлены четырьмя основными типами (рис. 2) [24].

К сросткам 1 типа относятся сростки сульфидов и магнетита с чешуйчатыми минералами, относящимся к антигориту и хлориту. По морфологии частицы срост-

ков чаще изометрические, реже линзовидные, по внутреннему строению сетчатые. Сростки преимущественно сульфидно-силикатные, но может присутствовать в небольшом количестве магнетит. Сростки 2 типа представляют неправильные по форме срастания сульфидов с тонкозернистыми разностями серпентина, амфиболов и талька. Морфология сростков относительно простая, границы ровные, ступенчатые. Внутреннее строение характеризуется разнообразной вкрапленностью и прожилками сульфидов в серпентине, нередко присутствует магнетит. Сростки 3 типа представлены сростками сульфидов с магнетитом. В составе сростков присутствуют все сульфиды, но преимущественно пирротин и пентландит. Сростки 4 типа представляют

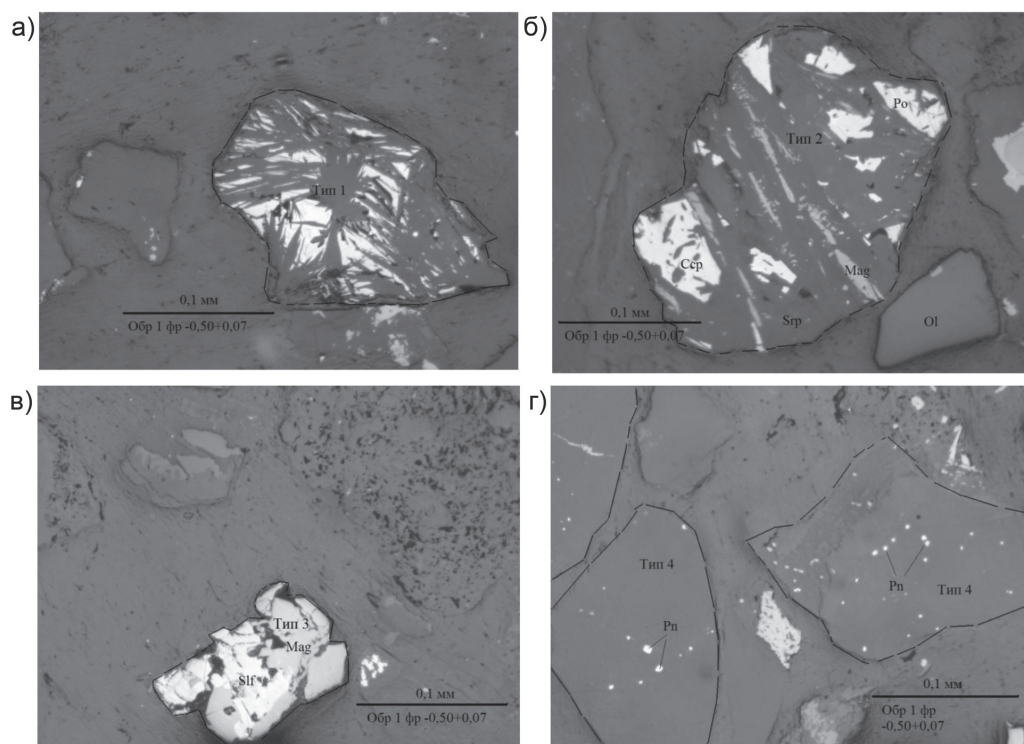


Рис. 2. Типовые сростки сульфидных минералов: Тип 1 (а), Тип 2 (б), Тип 3 (в), Тип 4 (г); Sif – сульфиды, Mag – магнетит, Pn – пентландит, Po – пирротин, C_{cp} – халькопирит, Srp – серпентин, Ol – оливин

Fig. 2. Typical intergrowths of sulphide minerals: Type 1 (a), Type 2 (b), Type 3 (c), Type 4 (d); Sif – sulphides, Mag – magnetite, Pn – pentlandite, Po – pyrrhotine, C_{cp} – chalcopyrite, Srp – serpentine, Ol – olivine

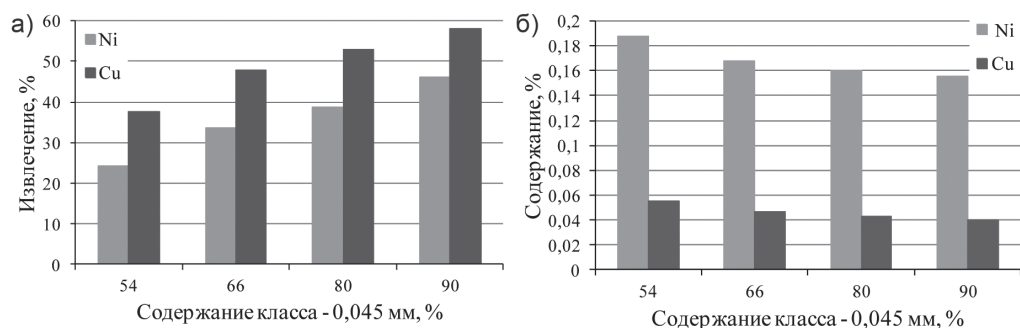


Рис. 3. Извлечение цветных металлов в пенный продукт основной флотации (а) и содержание цветных металлов в хвостах флотации (б) при различной крупности измельчения

Fig. 3. Extraction of non-ferrous metals into the froth product of rough flotation (a) and content of non-ferrous metals in the flotation tails (b) at different grinding size

включения пентландита в серпентине. Вкрапления пентландита очень мелкие, обычно 1–2 мкм. В составе включений могут присутствовать халькопирит, пирротин и магнетит, но в основном они состоят из пентландита. В материале хвостов присутствуют также сростки магнетита с силикатами, в которых не исключены редкие зерна сульфидов разного состава.

Присутствие сростков 1–3 типа в крупных фракциях хвостов (более 0,05 мм) предопределяет возможность раскрытия сульфидов при доизмельчении материала до этой крупности, 4 тип относится к нераскрываемым сросткам и неизбежным потерям.

Изучение флотационной обогатимости отвальных хвостов проводилось при изменении крупности измельчения от 54 до 90% класса –0,045 мм. Результаты флотационных экспериментов подтвердили возможность раскрытия сростков при измельчении, с уменьшением крупности питания флотации происходит увеличение извлечения никеля и меди в пенный продукт (рис. 3). Наибольшее извлечение цветных металлов в пенный продукт основной флотации при наименьшем их содержании в камерном получено при крупности измельчения 90% класса –0,045 мм.

На данной флотационной крупности проведены исследования в щелочной

Таблица 2

Результаты флотации в щелочной и кислой средах
Results of flotation in alkaline and acidic environments

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %		Расход реагентов, г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
pH = 6,3; H₂SO₄ – 1,5 кг/т						
Пенный продукт	22,03	0,418	0,216	41,69	56,62	Kx – 135 Af – 95 CuSO ₄ – 30
Камерный продукт	77,97	0,165	0,047	58,31	43,38	
Исходный	100,0	0,221	0,084	100,0	100,0	
pH = 9,8; Na₂CO₃ – 3 кг/т						
Пенный продукт	24,46	0,392	0,199	44,21	59,36	Kx – 135 Af – 95 CuSO ₄ – 30
Камерный продукт	75,54	0,160	0,044	55,79	40,64	
Исходный	100,0	0,217	0,082	100,0	100,0	

(рН = 9,8) и слабокислой (рН = 6,3) средах, для создания рН последней использовалась серная кислота (табл. 2). Исследования проводились при одинаковом расходе собирателей.

Оценка результатов показала, что лучшие технологические показатели достигнуты в щелочной среде. Извлечение никеля и меди в пенный продукт в этом случае получено на 2,5% и 2,7% выше, чем в кислой среде при близком качестве продуктов. Также в щелочной среде отмечается более низкое содержание металлов в камерном продукте (хвостах флотации).

Таким образом, при крупности измельчения 90% класса –0,045 мм получен продукт с содержанием Ni – 0,39% и Cu – 0,2%, при извлечении 44 и 59% соответственно. Степень концентрации полезных компонентов составила 1,8 для никеля и 2,4 для меди. Полученный продукт в дальнейшем может быть направлен на гидрометаллургическую переработку [20].

Введение двух последовательных перемешивающих операций без добавления ре-

агентов позволило повысить содержание никеля и меди до 0,65% и 0,46% после I перемешивания и до 0,96% и 0,94% после II.

Магнитная сепарация осуществлялась на материале исходной крупности. Сепарацию проводили стадийно с направлением немагнитной фракции на последующую стадию обогащения при увеличении напряженности магнитного поля от 30 до 510 кА/м (табл. 3). Класс –0,045 мм сепарации не подвергался, ввиду низкой эффективности его разделения на данном оборудовании. Выход этого класса составил 34%, при содержании в нем Ni 0,203% и Cu 0,069%.

Анализ результатов разделения показал, что в магнитную фракцию уже при невысокой напряженности магнитного поля переходит 59% материала, при ее увеличении до 260 и 510 кА/м выход магнитной фракции от операции уже составляет 78 и 95% соответственно. Несмотря на то, что извлечение цветных металлов в обогащенную (магнитную) фракцию выше, чем во флотационных исследованиях, максимальное содержание цветных металлов в этой фракции

Таблица 3

Результаты сухой электромагнитной сепарации
Results of dry electromagnetic separation

Наименование продукта	Выход, %		Содержание, %		Извлечение от операции, %		Извлечение от руды, %	
	от опер.	от руды	Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
H = 30 кА/м								
Магнитная фракция	59,17	39,07	0,268	0,105	72,33	71,23	48,99	50,59
Немагнитная фракция	40,83	26,96	0,149	0,061	27,67	28,77	18,74	20,43
Итого по ЭМС	100,0	66,03	0,220	0,087	100,0	100,0	67,73	71,02
H = 260 кА/м								
Магнитная фракция	78,22	51,65	0,248	0,097	88,26	86,81	59,78	61,65
Немагнитная фракция	21,78	14,38	0,118	0,053	11,74	13,19	7,95	9,37
Итого по ЭМС	100,0	66,03	0,220	0,087	100,0	100,0	67,73	71,02
H = 510 кА/м								
Магнитная фракция	95,47	63,04	0,226	0,089	98,08	97,31	66,43	69,11
Немагнитная фракция	4,53	2,99	0,093	0,052	1,92	2,69	1,30	1,91
Итого по ЭМС	100,0	66,03	0,220	0,087	100,0	100,0	67,73	71,02

в 1,5–2 раза ниже. Полученные результаты обусловлены тем, что исследуемая проба содержит сильномагнитный минерал магнетит, который присутствует в ней не только в раскрытом виде и сростках с силикатами, но и во включениях в большинстве сульфидных сростков. Также часть содержащегося в хвостах пирротина представлена его магнитной разнородностью.

Самое низкое содержание цветных металлов в немагнитной фракции наблюдается при напряженности магнитного поля 510 кА/м, но при незначительном выходе этой фракции. При более высоких значениях напряженности выход продукта в немагнитную фракцию от руды составляет 14,4 и 27%. Причем эти фракции характеризуются более низким содержанием никеля, чем хвосты флотации.

Заключение

Показано, что использование флотационных методов с традиционным реа-

гентным режимом обеспечивает получение из лежалых хвостов медно-никелевых руд продукта с содержанием никеля около 0,4% и меди около 0,2% при извлечении 44 и 59% соответственно.

Использование магнитной сепарации позволяет получить более высокое извлечение никеля (49–60%) и более низкие по содержанию никеля хвосты, но при меньшем качестве обогащенного продукта.

Так как основная масса сульфидов в исходном материале находится в сростках, в которых присутствуют включения магнетита, целесообразным в данном случае представляется использование комбинации магнитных и флотационных методов, с использованием в голове процесса магнитной сепарации для вывода продукта с более низким содержанием никеля, чем флотационные хвосты. Также это будет способствовать снижению затрат на измельчение, так как магнитной сепарации подвергается материал исходной крупности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2017 году // Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области: [сайт]. URL: https://gov-murman.ru/upload/iblock/a35/Doklad_za-2017-god_ITOG_1.pdf.
2. Крупская Л. Т., Ионкин К. В., Крупский А. В., Дербенцева А. М., Гула К. Е. К вопросу оценки хвостохранилища как источника загрязнения объектов природной среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 55. — С. 234–241.
3. Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 3. — С. 138–153.
4. Чантурия В. А., Макаров В. Н., Макаров Д. В. Классификация горнопромышленных отходов по типу минеральных ассоциаций и характеру процессов окисления сульфидов // Геоэкология. — 2000. — № 2. — С. 136–143.
5. Lindsay M. B. J., Moncur M. C., Bain J. G., Jambor J. L., Ptacek C. J., Blowes D. W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings // Applied geochemistry, 2015, Vol. 57, pp. 157–177. DOI:10.1016/j.apgeochem.2015.01.009.
6. Аксенов Е. М., Садыков Р. К., Алискеров В. А., Киперман Ю. А., Комаров М. А. Техногенные месторождения — проблемы и перспективы вовлечения в хозяйственный оборот // Разведка и охрана недр. — 2010. — № 2. — С. 17–20.
7. Селезнев С. Г. Нетрадиционные эффективные способы обогащения сульфидных медно-никелевых руд на примере Аллареченского техногенного месторождения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2011. — № 8. — С. 118–125.
8. Ракаев А. И., Черноусенко Е. В., Рухленко Е. Д., Алексеева С. А. Минералого-технологическая оценка возможности переработки отвалных хвостов Аллареченского месторождения медно-никелевых руд / Материалы Международного совещания «Современные методы комплекс-

ной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья». Плаксинские чтения—2007. — Апатиты: КНЦ РАН, 2007. — С. 476—478.

9. Ракаев А. И., Черноусенко Е. В., Алексеева С. А. Минералого-технологическая оценка возможности переработки забалансовых медно-никелевых руд / Материалы Международного совещания «Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья». Плаксинские чтения—2014. — Алматы, Республика Казахстан, 2014. — С. 82—83.

10. Евдокимов С. И., Евдокимов В. С. Переработка руд и техногенного Cu — Ni — сырья с применением технологии струйной паровоздушной флотации // Известия вузов. Цветная металлургия. — 2015. — № 2. — С. 3—8. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-2-3-8.

11. Абдыкирова Г. Ж., Дюсенова С. Б., Тойланбай Г. А., Сугурбекова А. К. Флотация медьсодержащего техногенного сырья с применением двух вспенивателей / Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья. Плаксинские чтения—2017. — Красноярск. — С. 360—362.

12. Семушкина Л. В., Турысбеков Д. К., Рулев Н. Н., Нарбекова С. М. Флотация хвостов обогащения свинцово-цинковых руд комбинированным собирателем с использованием микромульгирования // Обогащение руд. — 2017. — № 2. — С. 26—31. DOI: 10.17580/or.2017.02.05.

13. Лавриненко А. А., Саркисова Л. М., Шрадер Э. А., Чихладзе В. В., Шимкунас Я. М. Исследование возможности флотационного извлечения сульфидов из хвостов обогащения медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 2. — С. 98—102.

14. Чантурия В. А., Козлов А. П., Матвеева Т. Н., Лавриненко А. Ф. Инновационные технологии и процессы извлечения ценных компонентов из нетрадиционного, труднообогатимого и техногенного минерального сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 5. — С. 144—156.

15. Michel S. L., Maloba B. Recovery of cobalt and copper through reprocessing of tailings from flotation of oxidised ores // Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, Vol. 1, Issue 4, pp. 1085—1090. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.08.025>.

16. Yin Z., Sun W., Hu Y., Zhang Ch., Guan Q., Wu K. Evaluation of the possibility of copper recovery from tailings by flotation through bench-scale, commissioning, and industrial tests // Journal of Cleaner Production, 2018, Vol. 171, pp. 1039—1048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.020>.

17. Babel B., Penz M., Schach E., Boehme S., Rudolph M. Reprocessing of a Southern Chilean Zn Tailings by Flotation—A Case Study // Minerals, 2018, no 8, pp. 295. DOI: 10.3390/min8070295.

18. Falagan C., Grail B. M., Johnson D. B. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings // Minerals Engineering, 2017, Vol. 106, pp. 71—78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.008>.

19. Ahmadi A., Khezri M., Abdollahzabeh A. A., Askari M. Bioleaching of copper, nickel and cobalt from the low grade sulfidic tailing of Golgohar Iron Mine, Iran // Hydrometallurgy, 2015, Vol. 154, pp. 1—8. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.006>.

20. Денисова Ю. Л., Светлов А. В. Хвосты обогащения медно-никелевых руд АО «Кольская ГМК» и возможные пути использования // Труды Кольского научного центра РАН. — 2018. — Т. 9. — № 2-2. — С. 821—824. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.821-824.

21. Magwaneng R. S., Batnasan A., Haga K., Shibayama A.. Development of a Combined Flotation and High Pressure Leaching Process for Copper and Nickel Recovery from Mine Tailing // Chemistry & Materials Science, 2017, Vol.5, no 5, pp. 118—131. DOI:10.4236/jmmce.2017.53010.

22. Горлова О. Е., Юн А. Б., Синянская О. М., Медяник Н. Л. Разработка и опытно-промышленные испытания комбинированной технологии переработки отвала труднообогатимых смешанных медных руд месторождения Таскора // Цветные металлы. — 2018. — № 12. — С. 14—21. DOI: 10.17580/tsm.2018.12.02.

23. Бусырев В. М., Чуркин О. Е. Оценка стоимости запасов и эффективности освоения техногенных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 6. — С. 106—114.

24. Лихачева С. В., Нерадовский Ю. Н. К вопросу о типизации сростков сульфидных минералов во вкрапленных рудах Печенги / Материалы Международного совещания «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья». Плаксинские чтения—2013. — Томск. — С. 64—67. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Governmental report on the state and protection of the environment of the Murmansk region in 2017. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Murmansk region. URL: https://gov-murman.ru/upload/iblock/a35/Doklad_za-2017-god_ITOG_1.pdf.
2. Krupskaya L. T., Ionkin K. V., Krupskiy A. V., Derbentseva A. M., Gula K. E. On the issue of assessing a tailing as an environment pollution source. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no S5, pp. 234–241. [In Russ].
3. Masloboev V. A., Seleznev S. G., Makarov D. V., Svetlov A. V. Assessment of the environmental hazard of storing waste from mining and processing of copper-nickel ores. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no 3, pp. 138–153. [In Russ].
4. Chanturiya V. A., Makarov V. N., Makarov D. V. Classification of mining wastes by the type of mineral associations and the nature of sulphide oxidation processes. *Geoekologiya*. 2000, no 2, pp. 136–143. [In Russ].
5. Lindsay M. B. J., Noncur M. C., Bain J. G., Jambor J. L., Ptacek C. J., Blowes D. W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied geochemistry*, 2015, Vol. 57, pp. 157–177. DOI:10.1016/j.apgeochem.2015.01.009.
6. Aksenov E. M., Sadykov R. K., Aliskerov V. A., Kiperman Yu. A., Komarov M. A. Mining-induced deposits – problems and prospects of involvement in the economic turnover. *Razvedka i okhrana nedr*. 2010, no 2, pp. 17–20. [In Russ].
7. Seleznev S. G. Non-traditional efficient methods of sulphide copper-nickel ore processing on the example of the Allarechenskoe mining-induced deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2011, no 8, pp. 118–125. [In Russ].
8. Rakaev A. I., Chernousenko E. V., Ruhlenko E. D., Alekseeva S. A. Mineralogical and technological assessment of the possibility of processing the tailings of the Allarechenskocopper-nickel deposit. *Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya «Sovremennye metody kompleksnoy pererabotki rud i netraditsionnogo mineral'nogo syr'ya»*. Plaksinskie chteniya–2007. Apatity, KNTS RAN, 2007, pp. 476–478. [In Russ].
9. Rakaev A. I., Chernousenko E. V., Alekseeva S. A. Mineralogical and technological assessment of the possibility of processing unpayable copper-nickel ores. *Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya «Progressivnye metody obogashcheniya i kompleksnoy pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya»*. Plaksinskie chteniya–2014. Almaty, Kazakhstan, 2014, pp. 82–83. [In Russ].
10. Evdokimov S. I., Evdokimov V. S. Processing of ores and mining-induced Cu – Ni – raw materials using the technology of vapor-air jet flotation. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2015, no 2, pp. 3–8. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-2-3-8. [In Russ].
11. Abdykirova G. ZH., Dyusenova S. B., Toylyanbay G. A., Sugurbekova A. K. Flotation of copper-containing mining-induced raw materials with the use of two frothers. *Sovremennye problemy kompleksnoy pererabotki trudnoobogatimyykh rud i tekhnogennogo syr'ya. Plaksinskie chteniya–2017*. Krasnoyarsk, pp. 360–362. [In Russ].
12. Semushkina L. V., Turysbekov D. K., Rulev N. N., Narbekova S. M. Flotation of lead-zinc processing tailings by a combined collector using microemulsification. *Obogashchenie rud*. 2017, no 2, pp. 26–31. DOI: 10.17580/or.2017.02.05. [In Russ].
13. Lavrinenko A. A., Sarkisova L. M., Shrader E. A., Chihladze V. V., Shimkunas Ya. M. Study of the possibility of flotation extraction of sulphides from the tailings of copper-nickel ore processing. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 2, pp. 98–102. [In Russ].
14. Chanturiya V. A., Kozlov A. P., Matveeva T. N., Lavrinenko A. F. Innovative technologies and processes of recovery of valuable components from non-traditional, hard-to-process and mining-induced mineral raw materials. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no 5, pp. 144–156. [In Russ].
15. Michel S. L., Maloba B. Recovery of cobalt and copper through reprocessing of tailings from flotation of oxidised ores. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2013, Vol. 1, Issue 4, pp. 1085–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.08.025>.
16. Yin Z., Sun W., Hu Yu., Zhang Ch., Guan Q., Wu K. Evaluation of the possibility of copper recovery from tailings by flotation through bench-scale, commissioning, and industrial tests. *Journal of Cleaner Production*, 2018, Vol. 171, pp. 1039–1048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.020>.

17. Babel B., Penz M., Schach E., Boehme S., Rudolph M. Reprocessing of a Southern Chilean Zn Tailing by Flotation—A Case Study. *Minerals*, 2018, no 8, pp. 295. DOI: 10.3390/min8070295.
18. Falagan C., Grail B. M., Johnson D. B. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering*, 2017, Vol. 106, pp. 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.008>.
19. Ahmadi A., Khezri M., Abdollahzabeh A.A., Askari M. Bioleaching of copper, nickel and cobalt from the low grade sulfidic tailing of Golgohar Iron Mine, Iran. *Hydrometallurgy*, 2015, Vol. 154, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.006>.
20. Denisova Yu. L., Svetlov A. V. Tailings of copper—nickel ore processing from JSC «Kolskaya GMK» and possible ways of use. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2018. Vol. 9, no 2–2, pp. 821–824. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.821-824.
21. Magwaneng R. S., Batnasan A., Haga K., Shibayama A.. Development of a Combined Flotation and High Pressure Leaching Process for Copper and Nickel Recovery from Mine Tailing. *Chemistry & Materials Science*, 2017, Vol.5, no 5, pp. 118–131. DOI:10.4236/jmmce.2017.53010.
22. Gorlova O.E., Yun A.B., Sinyanskaya O.M., Medyanik N.L. Combined processing of dumped complex copper ores of the Taskora deposit: process development and field trials. *Tsvetnye metally*. 2018, no 12, pp. 14–21. DOI: 10.17580/tsm.2018.12.02. [In Russ].
23. Busyrev V.M., Churkin O.E. Estimation of the value of reserves and the efficiency of mining-induced deposit development. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 6, pp. 106–114. [In Russ].
24. Likhacheva S.V., Neradovskiy Yu. N. On the question of the typification of intergrowths of sulphide minerals in the disseminated ores of Pechenga. *Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya «Innovatsionnye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineral'nogo syr'ya». Plaksinskie chteniya—2013*. Tomsk, pp. 64–67. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черноусенко Елена Владимировна¹ — научный сотрудник,
e-mail: chern@goi.kolasc.net.ru,

Вишнякова Ирина Николаевна¹ — младший научный сотрудник,

Каменева Юлия Сергеевна¹ — младший научный сотрудник,

Нерадовский Юрий Николаевич — канд. геол.-минерал. наук,

ведущий научный сотрудник, Геологический институт

Кольского научного центра РАН,

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН.

Для контактов: Черноусенко Е.В., e-mail: chern@goi.kolasc.net.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.V. Chernousenko¹, Researcher, e-mail: chern@goi.kolasc.net.ru,

I.N. Vishnyakova¹, Junior Researcher,

Yu.S. Kameneva¹, Junior Researcher,

Yu.N. Neradovskiy¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Leading Researcher,

Geological Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,

184209, Apatity, Murmansk region, Russia,

¹ Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,

184209, Apatity, Murmansk region, Russia.

Corresponding author: E.V. Chernousenko, e-mail: chern@goi.kolasc.net.ru.

