

А. В. Светлов, Д. В. Макаров, С. С. Потапов,
Д. А. Некипелов, С. Г. Селезнев, В. А. Маслобоев

Исследование выщелачивания вкрапленных медно-никелевых руд при их взаимодействии с шахтными водами

Значительные объемы накопленных отходов горной промышленности уже в настоящее время создают серьезные экономические и экологические проблемы в горнопромышленных районах. Перемещения горной массы нарушают сложившееся геологическое равновесие, попадание реагентов и тяжелых металлов в природные поверхностные и подземные воды отрицательно воздействует на сложившиеся экосистемы и здоровье человека. Особенно опасно их воздействие в районах с экстремальными климатическими условиями, где вблизи горнодобывающих предприятий возникают обширные техногенные пустыни. В зарубежной научной литературе используют термины "acid mine drainage" (AMD) и "acid rock drainage" (ARD), обозначившие проблему закисления вод с объектов горнорудной промышленности, при котором происходит загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами. AMD может происходить под влиянием следующих объектов горной промышленности: дренаж при подземных разработках полезных ископаемых; природные обнажения сульфидсодержащих пород и др. Изучены процессы, протекающие при взаимодействии шахтных вод с тонкодисперсными пылевыми частицами, а также при фильтрации вод через толщу сульфидсодержащих горных пород. Показано, что снижение потенциальной экологической опасности шахтных вод рудника "Северный" АО "Кольская ГМК" достигается осаждением тяжелых металлов гидроксидами железа и гидросиликатами магния. Выполнена предварительная оценка возможности гидрометаллургической переработки вкрапленных медно-никелевых руд.

Ключевые слова: медно-никелевые руды, шахтные воды, выщелачивание.

Введение

Одна из важнейших экологических проблем в деятельности предприятий горной промышленности – сброс больших объемов не достаточно очищенных сточных вод. Их основными загрязнителями являются тяжелые металлы, повышенная кислотность (acid mine drainage), щелочность, соли, оксиды, взвешенные вещества и т. д. [1]. Загрязнение карьерных, подотвальных и шахтных вод связано с окислением неустойчивых в гипергенных условиях минералов, прежде всего сульфидов железа и цветных металлов. Активация поверхности минералов, протекающая при их дроблении и измельчении в процессе добычи и подготовки к обогащению, существенно интенсифицирует процессы гипергенеза [2–4]. Объектами загрязнения поверхностных вод выступают действующие и заброшенные горные выработки; хвостохранилища; отвалы, в том числе терриконы угольной отрасли; природные обнажения сульфидсодержащих пород и др. [3–10]. Одним из наиболее значимых факторов, определяющих скорость и последствия окислительных процессов в сульфидсодержащих отходах, является тип минеральных ассоциаций [2–4].

В этой связи авторами проведены исследования выщелачивания проб трех образцов медно-никелевых руд рудника "Северный" АО "Кольская ГМК" в условиях моделирующих их контакт с шахтными водами. Кроме потенциальной экологической опасности шахтных вод эти эксперименты позволяют оценить возможность применения на данном объекте физико-химических геотехнологий (кучного и подземного выщелачивания).

Материалы и методы

Пробы медно-никелевых руд отобраны в мае 2016 г. сотрудниками геологической службы АО "Кольская ГМК" в соответствии с требованиями ГОСТ 14180–80 "Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги". Отбор проб произведен из бортов орта –290 м в интервале 12–6 м от устья выработки и из бортов выработки БЛ горизонта –310 м в интервале 8–6 м рудника "Северный".

Микроскопические исследования образцов медно-никелевой руды выполнены на полированных аншлифах с использованием рудного микроскопа AxioPlan 2 imaging.

Полный силикатный анализ медно-никелевой руды выполнен в ОАО "Кольский геологический информационно-лабораторный центр" (КГИЛЦ). Содержания цветных металлов Ni, Cu и Co в образцах руды определяли методом атомной абсорбции согласно НСАМ-155ХС "Атомно-абсорбционное пламенно-фотометрическое определение меди, цинка, кадмия, висмута, сурьмы, свинца, кобальта, никеля, железа и марганца в горных породах, рудах и технологических растворах". Определение содержаний Ti, Si, Al и Fe в рудах проведено в соответствии с НСАМ 138-Х "Ускоренные химические методы определения пороодообразующих элементов в горных породах и рудах". Содержания Ca, Mg и Mn установлены согласно НСАМ 172-С "Атомно-абсорбционное пламенно-фотометрическое определение кремния, магния, кальция

и марганца в силикатных горных породах". Содержания щелочных металлов определяли методом пламенной фотометрии в соответствии с НСАМ 44-Х "Определение натрия и калия в силикатных породах на пламенных фотометрах". Содержания FeO в образцах руд определены по ГОСТ Р 53657–2009 "Метод определения двухвалентного железа в пересчете на закись железа". Фосфор в образцах руд был определен фотометрическим методом согласно требованиям НСАМ 197-Х "Фотометрическое определение фосфора в горных породах и рудах в виде восстановленного фосфомолибденового комплекса". Содержания стронция установлены в соответствии с НСАМ 60-С "Пламенное спектрофотометрическое определение стронция в горных породах и минералах". Содержание в образцах руд гигроскопической и связанной воды определено в соответствии с НСАМ 120Х "Определение гигроскопической и связанной воды в горных породах и минералах". Потери при прокаливании образцов медно-никелевых руд установлены согласно НСАМ 118-Х "Определение потери при прокаливании (п.п.п.) в бокситах, некоторых силикатных и карбонатных породах".

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов медно-никелевых руд проведен на дифрактометре ДРОН-2.0, CuK_α -излучение – в лаборатории физических методов анализа минерального сырья Института минералогии Уральского отделения РАН (ИМин УрО РАН), г. Миасс, оператор Е. Д. Зенович. Расшифровка дифрактограмм выполнена инженером лаборатории минералогии техногенеза и геоэкологии ИМин УрО РАН Н. В. Паршиной с использованием эталонов сравнения картотеки рентгеновских данных JCPDS и ASTM, а также электронной базы данных WWW-Минкрисст: http://database.iem.ac.ru/mincryst/rus/s_full.php.

Исследования выщелачивания медно-никелевых руд вели в статическом и динамическом режимах. Статический режим моделирует взаимодействие шахтных вод с тонкодисперсными пылеватыми частицами, образующимися при проведении буровых и взрывных работ. Перед опытами образцы руды измельчали до крупности –100 мкм. Исследования вели с использованием шахтных вод рудника "Северный" с содержаниями, мг/дм³: SO_4^{2-} – 596.6; Ni – 0.012; Cu – 0.0041. Опыты при соотношении Т : Ж = 1 : 10 продолжали в течение 1, 3, 5 и 10 суток при периодическом перемешивании. По окончании опытов растворы анализировали на никель, медь и сульфат-ион, определяли pH. Концентрации металлов определены в соответствие с РД 52.24.377–2008 методом атомной абсорбции с прямой электротермической атомизацией проб. Для определения концентрации сульфатов использован гравиметрический метод согласно РД 52.24.483–2005.

Динамический режим моделирует взаимодействие шахтных вод с горными породами в процессе фильтрации. Опыты вели в перколяторах высотой 300 мм и диаметром 25 мм с образцами руды, измельченными до –3...+2 мм в течение 36 суток при температуре 18 ± 2 °С с использованием модельного раствора, содержащего 160 мг/л SO_4^{2-} , величина pH которого составляла 5.59. Загрузка руды составляла 200 г. Перед выщелачиванием проводили предварительное влагонасыщение руды дистиллированной водой в течение 8 суток в количестве 400 мл. Выщелачивающий раствор подавали раз в сутки по 50 мл. Растворы на выходе из колонок анализировали на никель, медь и сульфат-ион, определяли pH.

Исследование вещественного состава медно-никелевых руд

Данные микроскопических исследований шлифов представлены на рис. 1. В образце 1 рудную часть слагают магнетит Fe_3O_4 , пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ и пирротин Fe_{1-x}S . Пентландит и пирротин, как правило, образуют сростания в крупных зернах магнетита (рис. 1, а, б). Отличительной особенностью данного образца является наличие большого количества эмульсионных вкраплений рудных минералов в силикатах (рис. 1, в). Образец 2 аналогичен вышеописанному по содержанию основных рудных минералов – магнетит, пирротин, пентландит (рис. 1, д, е), но отличается присутствием виоларита $(\text{Fe}, \text{Ni})_5\text{S}_4$, замещающего пентландит (рис. 1, ж). В образце 3 наблюдаются крупные зерна халькопирита CuFeS_2 (рис. 1, з, и). Пентландит и пирротин наблюдаются в виде включений в этих зернах или в сростаниях с ними.

По результатам минералогического анализа образцов медно-никелевых руд основная часть нерудных минералов представлена серпентинами, содержание которых во всех трех образцах превышает 60 %. Вторым по распространенности нерудным минералом является оливин. Его содержание значительно ниже в образце 3, в котором на втором месте по распространенности представлены амфиболы. В составе сульфидных минералов всех образцов преобладает пирротин, содержание которого варьирует от 3.45 до 5.75 %. Также присутствуют пентландит, халькопирит и пирит.

Результаты силикатного анализа образцов представлены в таблице. Наибольшими содержаниями в порядке убывания во все трех образцах характеризуются кремнезём, оксиды магния и железа (FeO и Fe_2O_3). Содержание никеля и меди максимально в образце 2, минимально – в образце 3.

Для проведения РФА образцы руды предварительно измельчали до фракции –0.05 мм. По данным РФА в составе проб преобладают рефлексы следующих силикатов: лизардит $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, антигорит $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, энстатит $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ и оливин $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$. Диагностированы рудные минералы: магнетит Fe_3O_4 , пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$, халькопирит CuFeS_2 и миллерит NiS (рис. 2).

Таким образом, по результатам вещественного анализа образцов медно-никелевых руд, отобранных с различных горизонтов рудника "Северный", можно заключить, что руды являются типичными рядовыми вкрапленными рудами, составляющими основную часть рудной базы АО "Кольская ГМК" [4].

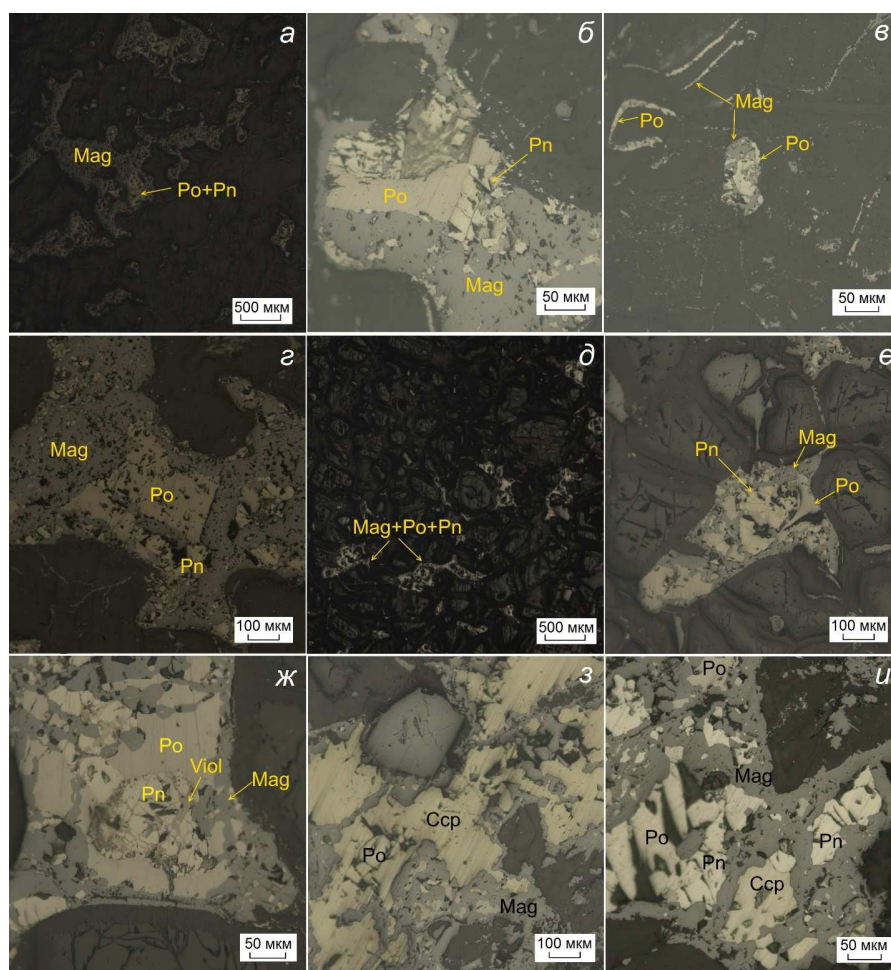
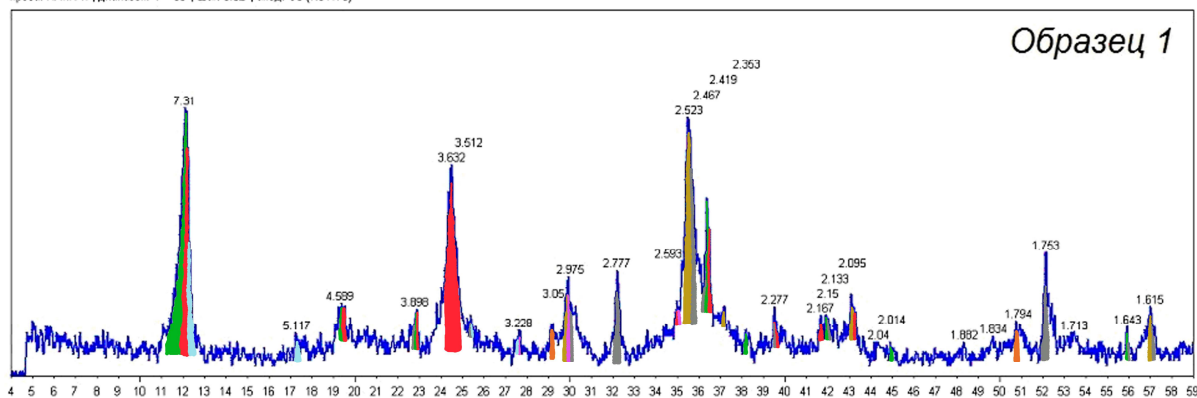


Рис. 1. Микрофотографии образцов руды. Образец 1 (а–з); образец 2 (д–ж); образец 3 (з–и).
Po – пирротин, Pn – пентландит, Viol – виоларит, Ccp – халькопирит, Mag – магнетит
Fig. 1. Photomicrographs of ore samples. Example 1 (a–z); sample 2 (d–j); sample 3 (z–i).
Po – pyrrhotite, Pn – pentlandite, Viol – violarite, Ccp – chalcopyrite, Mag – magnetite

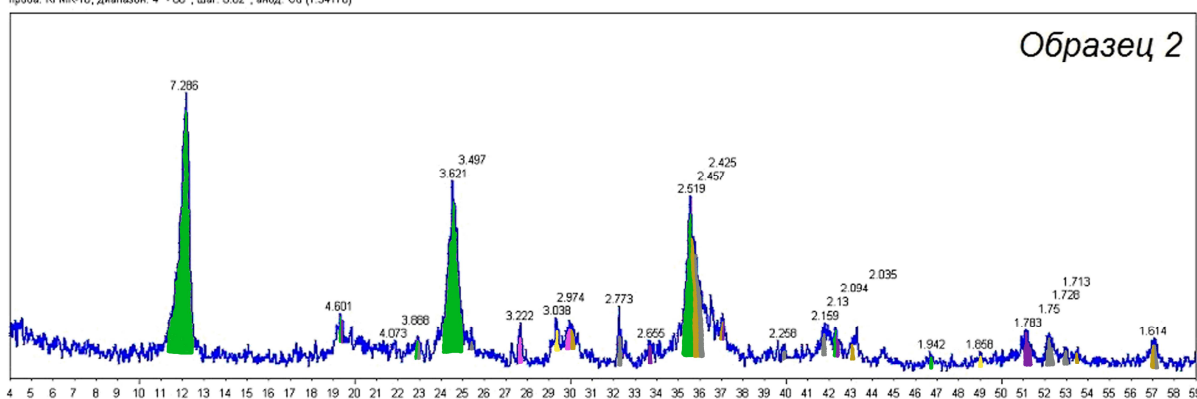
Таблица. Результаты силикатного анализа образцов медно-никелевых руд
Table. The results of silicate analysis of samples of copper-nickel ores

Номер образца	1	2	3
Компонент	Содержание, %		
SiO ₂	35.83	35.41	35.81
TiO ₂	0.68	0.80	0.96
Al ₂ O ₃	2.69	2.78	3.30
Fe ₂ O ₃	6.14	6.43	8.59
FeO	12.51	13.67	12.23
MnO	0.21	0.20	0.21
CaO	2.22	2.16	2.69
MgO	29.90	27.86	26.54
K ₂ O	0.13	0.14	0.24
Na ₂ O	0.080	0.10	0.22
SrO	<0.10	<0.10	<0.10
P ₂ O ₅	0.060	0.10	0.093
NiO	0.65	0.91	0.52
CuO	0.19	0.41	0.24
CoO	0.028	0.030	0.024
SO ₃	3.47	5.67	3.60
H ₂ O ⁻	0.20	0.18	0.23
ппп	8.21	8.10	8.22
Сумма	99.76	99.74	100.04

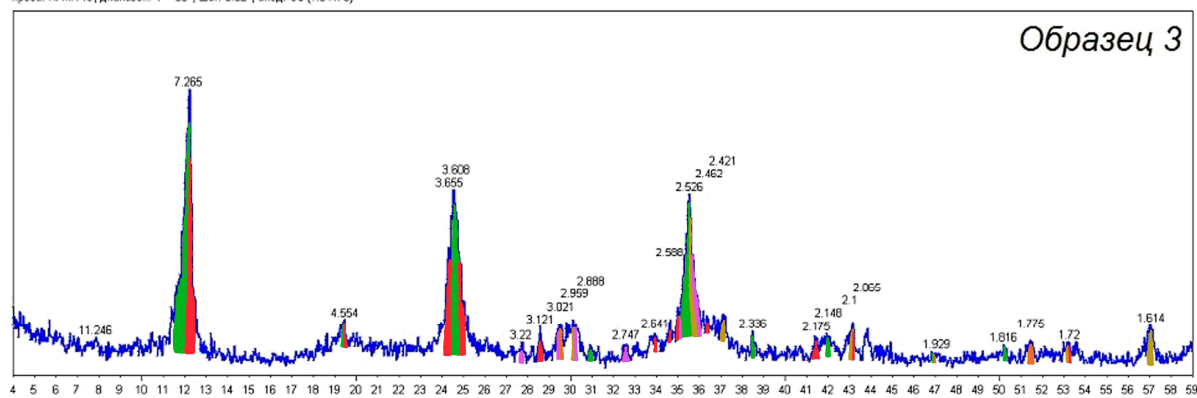
проба: КГМК-17, диапазон: 4° - 60°, шаг: 0.02°, анод: Cu (1.54178)



проба: КГМК-18, диапазон: 4° - 60°, шаг: 0.02°, анод: Cu (1.54178)



проба: КГМК-19, диапазон: 4° - 60°, шаг: 0.02°, анод: Cu (1.54178)



● 1 ● 2 ● 3 ● 4 ● 5 ● 6 ● 7 ● 8 ● 9

Рис. 2. Диффрактограммы проб медно-никелевой руды:
 1 – лизардит; 2 – магнетит; 3 – антигорит; 4 – энстатит; 5 – форстерит; 6 – ловозерит;
 7 – пентландит; 8 – халькопирит; 9 – миллерит
 Fig. 2. Diffractograms of copper-nickel ore samples:
 1 – lizardite; 2 – magnetite; 3 – antigorite; 4 – enstatite; 5 – forsterite; 6 – lovozerite;
 7 – pentlandite; 8 – chalcopyrite; 9 – millerite

Результаты и обсуждение

Исследование выщелачивания руд в статических и динамических условиях

Статический режим. Результаты проведенных экспериментов иллюстрируют рис. 3–5. Концентрации цветных металлов и сульфат-иона в воде после взаимодействия с образцами 1–3 медно-никелевой руды в течение 1–10 суток представлены на рис. 3.

Как видно, для всех опытов характерен рост концентраций никеля, меди и сульфат-иона в растворе после взаимодействия с образцами руды. Наибольшие концентрации никеля, меди и сульфат-иона характерны для раствора после взаимодействия с образцом 1 (рис. 3, а, б).

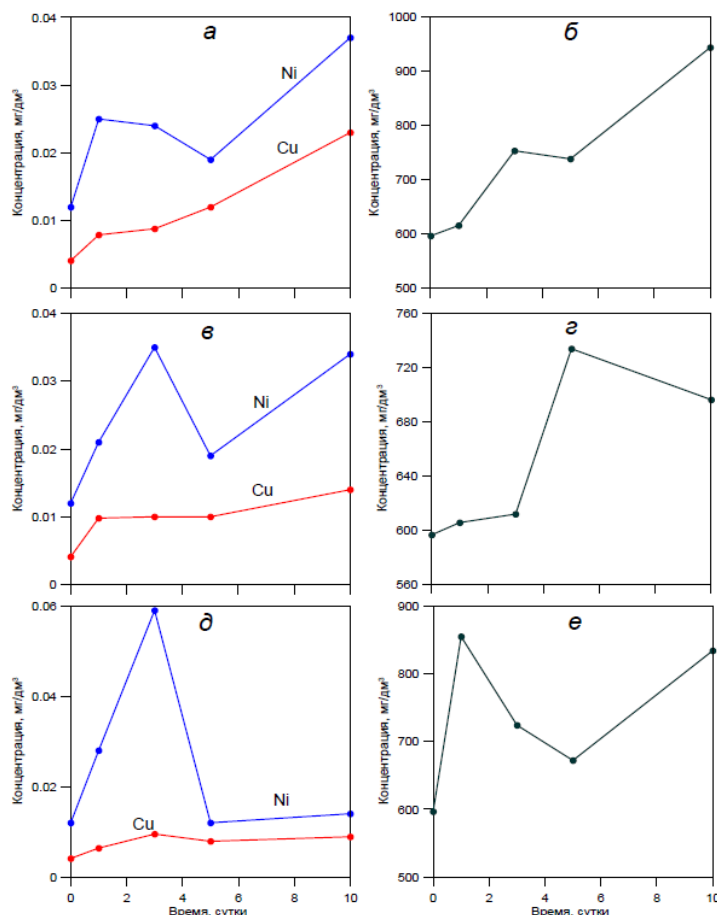


Рис. 3. Концентрации никеля, меди (а, в, д) и сульфат-иона (б, з, е) в растворе при взаимодействии с образцами 1 (а, б), 2 (в, з) и 3 (д, е) руды в статическом режиме
Fig. 3. Concentrations of nickel, copper (а, в, д) and sulphate ions (б, з, е) in solution during interaction with samples 1 (а, б), 2 (в, з) and 3 (д, е) ore in the static mode

Извлечения металлов и серы из образцов 1–3 медно-никелевой руды в раствор в зависимости от продолжительности взаимодействия приведены на рис. 4.

Значительное отличие извлечений (на два-три порядка) в раствор при выщелачивании образцов медно-никелевой руды в пользу серы по сравнению с никелем и медью обусловлено величиной pH раствора, которая находится в щелочной области на протяжении эксперимента и максимальна после 1 суток (рис. 5). Отметим, что величина водородного показателя шахтной воды до начала взаимодействия также находилась в щелочной области и составляла около 9 единиц.

Очевидно, что в этих условиях осаждаются аморфные гидроксиды железа, которые являются сорбентами тяжелых металлов [11]. Кроме того, происходят ионообменные реакции с серпентинами (антигорит, лизардит) с образованием никель- и медьсодержащих гидросиликатов [12; 13]. Эти процессы приводят к резкому снижению концентраций тяжелых металлов (никеля и меди). Вследствие низкого содержания сульфидов в руде окисление минералов, например по реакции $Fe_{1-x}S + (2-0.5x)O_2 + xH_2O = (1-x)Fe^{2+} + SO_4^{2-} + 2xH^+$ [4], сопровождающееся образованием серной кислоты, не способно перевести величину pH в кислую область. Хотя следствием такой реакции является снижение величины водородного показателя воды, наблюдающееся для всех образцов руды после 3, 5 и 10 суток взаимодействия (рис. 5).

Таким образом, состав нерудных минералов определяет концентрацию тяжелых металлов в откачиваемых шахтных водах рудника "Северный" и их потенциальную экологическую опасность. Ее уровень существенно ниже, чем на рудниках, осуществляющих добычу медно-цинковых руд на Урале, где концентрации меди и цинка, например, в шахтных водах АО "Учалинский ГОК" составляют 67 и 189 мг/дм³ соответственно [14]. В то же время концентрации сульфат-иона остаются высокими.

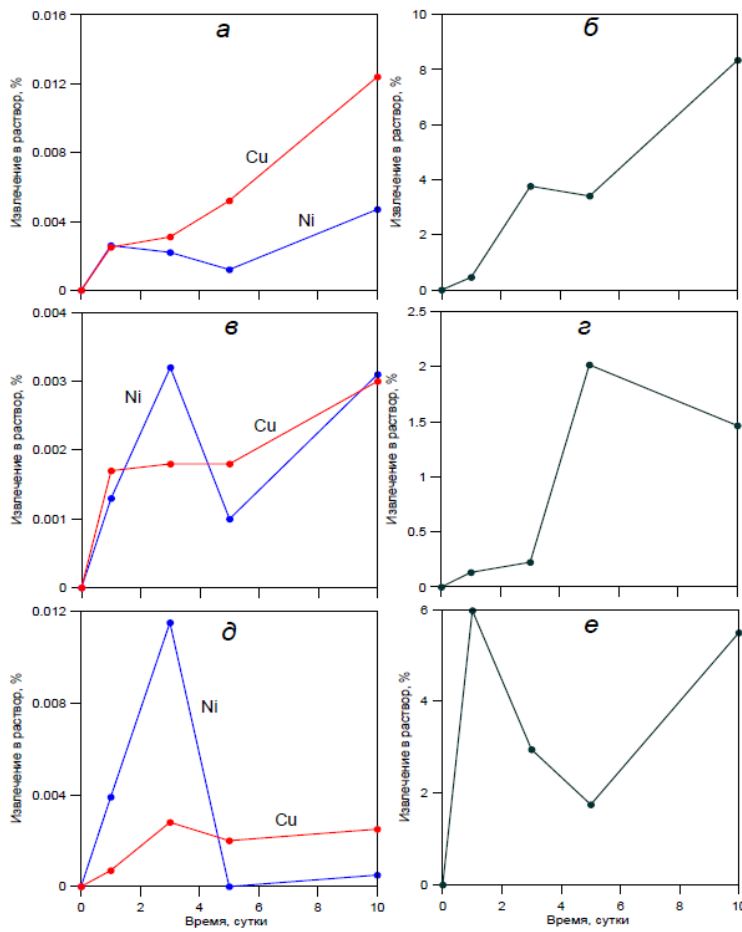


Рис. 4. Извлечения металлов (а, в, д) и серы (б, г, е) в раствор после взаимодействия с образцами 1 (а, б), 2 (в, г) и 3 (д, е) руды в статическом режиме
 Fig. 4. The extraction of metals (а, в, д) and sulfur (б, г, е) in solution after interaction with samples 1 (а, б), 2 (в, г) and 3 (д, е) of ore in the static mode

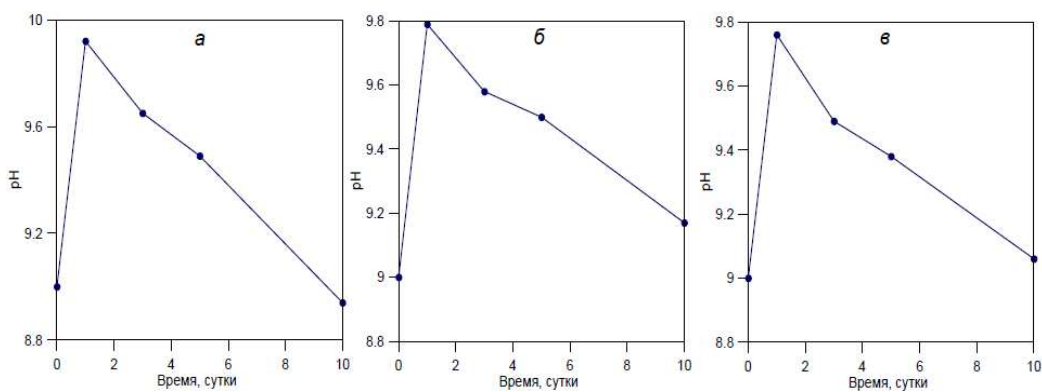


Рис. 5. Изменение pH растворов после взаимодействия с образцами 1 (а), 2 (б) и 3 (в) медно-никелевой руды в статическом режиме
 Fig. 5. The change of pH solutions after the interaction with sample 1 (а), 2 (б) and 3 (в) of copper-nickel ore in the static mode

Динамический режим. Динамический режим моделирует взаимодействие шахтных вод с горными породами в процессе фильтрации. Опыты в этом режиме вели с использованием модельного раствора, содержащего 160 мг/л SO_4^{2-} . Результаты проведенных экспериментов показаны на рис. 6–8.

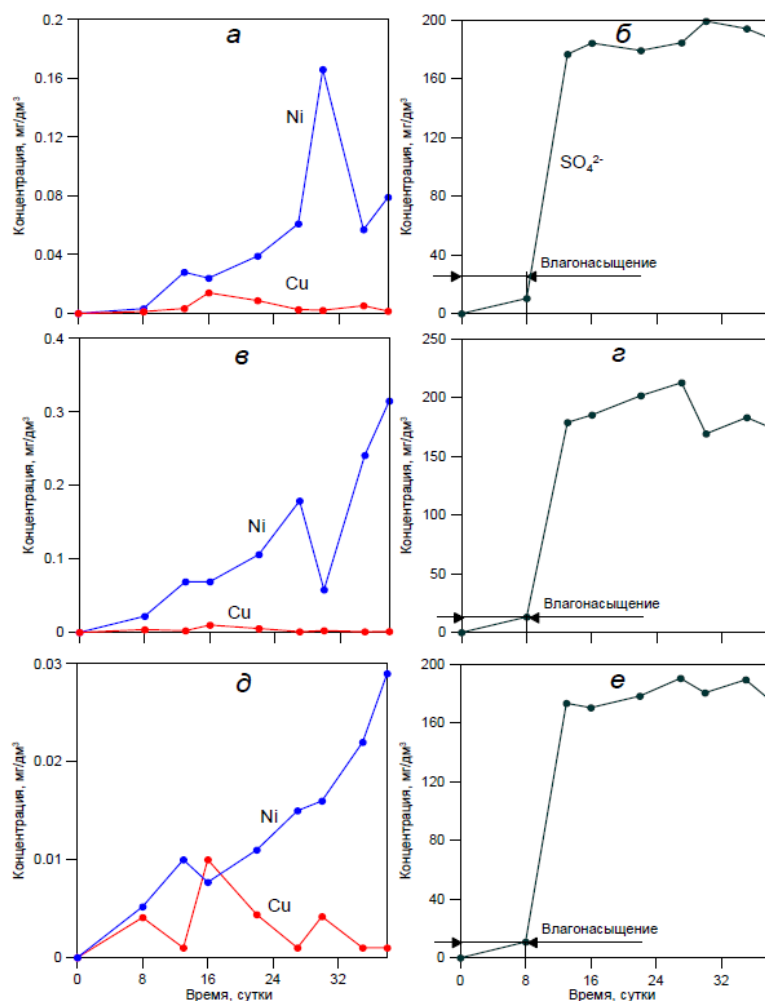


Рис. 6. Концентрации никеля, меди (а, в, д) и сульфат-иона (б, з, е) в растворе при взаимодействии с образцами 1 (а, б), 2 (в, з) и 3 (д, е) руды в динамическом режиме
Fig. 6. Concentrations of nickel, copper (а, в, д) and sulphate ions (б, з, е) in solution during interaction with samples 1 (а, б), 2 (в, з) and 3 (д, е) of ore in the dynamic mode

Концентрации цветных металлов и сульфат-иона в воде после взаимодействия с образцами 1–3 медно-никелевой руды в течение 8 суток влагонасыщения дистиллированной водой и 30 суток взаимодействия с модельным раствором представлены на рис. 6. Как видно, концентрации всех компонентов, за исключением меди, растут. При этом, как и в опытах в статическом режиме, концентрации сульфат-иона значительно превышают концентрации никеля и, в особенности, меди. Такое поведение ионов также можно объяснить осаждением металлов на гидроксиды железа и обменными реакциями с химически активными серпентинами [11–13], чему способствует величина pH растворов (рис. 8).

Извлечения металлов и серы из образцов 1–3 медно-никелевой руды в раствор при взаимодействии в динамическом режиме приведены на рис. 7.

Следует отметить, что при влагонасыщении величина водородного показателя воды повышается на 3.5–4 единицы, переходя в щелочную область. При фильтрации модельного раствора pH несколько снижается, оставаясь при этом выше 7 (рис. 8).

Опыты в динамическом режиме выявили ту же тенденцию, что и в статическом. Извлечения серы оказались на два порядка выше извлечений никеля и меди. Более низкие по сравнению со статическим режимом извлечения серы, очевидно, обусловлены крупностью руды и непродолжительностью контакта модельного раствора с рудой за счет высокого коэффициента фильтрации – десятки метров в сутки (рис. 7). Тем не менее концентрации SO_4^{2-} в растворе повышаются за счет взаимодействия с образцами руды при фильтрации

на 10–50 мг/дм³ в течение эксперимента (рис. 6). Низкое извлечение меди связано с ее нахождением в составе медленно окисляющегося халькопирита [15].

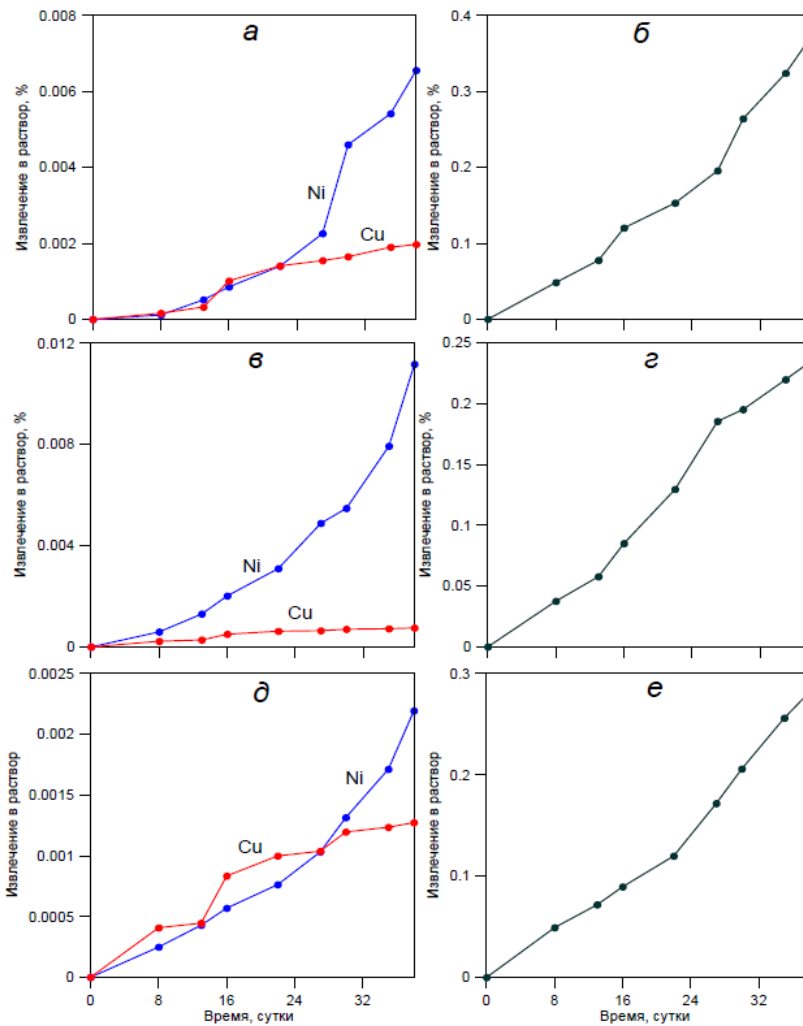


Рис. 7. Извлечения никеля, меди (а, в, г) и серы (б, г, е) в раствор при взаимодействии с образцами 1 (а, б), 2 (в, г) и 3 (д, е) руды в динамическом режиме
 Fig. 7. The extraction of nickel, copper (а, в, г) and sulfur (б, г, е) in solution during interaction with samples 1 (а, б), 2 (в, г) and 3 (д, е) of ore in the dynamic mode

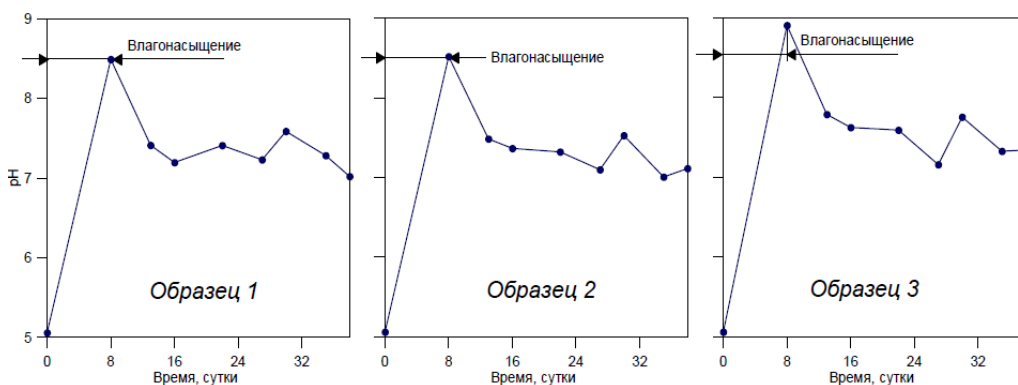


Рис. 8. Изменения рН растворов после взаимодействия с образцами 1–3 медно-никелевой руды в динамическом режиме
 Fig. 8. The change of pH solutions during interaction with samples 1–3 of copper-nickel ore in the dynamic mode

Заключение

Таким образом, исследованиями в статическом и динамическом режимах установлено, что даже кратковременный контакт шахтной воды с медно-никелевой рудой приводит к окислению сульфидных минералов и сопровождается интенсивным образованием сульфатов. Очевидно, что эти процессы могут протекать как за счет взаимодействия шахтных вод с тонкодисперсными пылеватыми частицами, образующимися при проведении буровых и взрывных работ, так и при фильтрации вод через толщу сульфидсодержащих горных пород. Химически активные нерудные минералы и устойчивая щелочная реакция растворов обуславливают осаждение тяжелых металлов гидроксидами железа и гидросиликатами магния, что существенно снижает потенциальную экологическую опасность шахтных вод рудника "Северный" АО "Кольская ГМК".

Эксперименты показали, что исследованные вкрапленные медно-никелевые руды не вполне благоприятны для гидрометаллургической переработки. Для окончательных выводов о применимости физико-химических геотехнологий в дальнейшем будут проведены эксперименты по сернокислотному выщелачиванию медно-никелевых руд, как это было сделано ранее для отвальных шлаков медно-никелевого производства [16].

Благодарности

Авторы признательны сотрудникам ИМин УрО РАН Е. Д. Зенович и Н. В. Паршиной за съемку и расшифровку дифрактограмм.

Исследования выполнены в рамках программы РАН № I.4П "Месторождения стратегического минерального сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче" и при частичной поддержке РФФИ (проект № 14-05-98804р_север_а).

Библиографический список

1. Чантурия В. А., Макаров В. Н., Макаров Д. В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья. Апатиты : КНЦ РАН, 2005. 218 с.
2. 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.
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. Amos R. T., Blowes D. W., Bailey B. L., Sego D. C., Smith L., Ritchie A., Ian M. Waste-rock hydrogeology and geochemistry // *Applied Geochemistry*. 2015. V. 57. P. 140–156.
5. Olías M., Cánovas C. R., Nieto J. M., Sarmiento A. M. Evaluation of the dissolved contaminant load transported by the Tinto and Odiel rivers Basin (South West Spain) // *Applied Geochemistry*. 2006. V. 21. P. 1733–1749.
6. Butler B. A., Ranville J. F., Ross P. E. Observed and modeled seasonal trends in dissolved and particulate Cu, Fe, Mn, and Zn in a mining-impacted stream // *Water Research*. 2008. V. 42. P. 3135–3145.
7. Moncur M. C., Jambor J. L., Ptacek C. J., Blowes D. W. Mine drainage from the weathering of sulfide minerals and magnetite // *Applied Geochemistry*. 2009. V. 24. P. 2362–2373.
8. Moncur M. C., Ptacek C. J., Hayashi M., Blowes D. W., Birks S. J. Seasonal cycling and mass-loading of dissolved metals and sulfate discharging from an abandoned mine site in northern Canada // *Applied Geochemistry*. 2014. V. 41. P. 176–188.
9. Doulati Ardejani F., Shokri Jodeiri B., Bagheri M., Soleimani E. Investigation of pyrite oxidation and acid mine drainage characterization associated with Razi active coal mine and coal washing waste dumps in the Azad shahr-Ramian region, Northeast Iran // *Environmental Earth Sciences*. 2010. V. 61. P. 1547–1560.
10. Nordstrom D. K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // *Applied Geochemistry*. 2011. V. 26. P. 1777–1791.
11. Filip J., Zboril R., Schneeweiss O., Zeman J., Cernik M., Kvapil P., Otyepka M. Environmental applications of chemically pure natural ferrihydrite // *Environmental Science & Technology*. 2007. V. 41. P. 4367–4374.
12. Макаров В. Н., Макаров Д. В., Васильева Т. Н., Кременецкая И. П. Взаимодействие природных серпентинов с разбавленными сульфатными растворами, содержащими ионы никеля // *Журнал неорганической химии*. 2005. Т. 50, № 9. С. 1418–1429.
13. Chanturiya V., Masloboev V., Makarov D., Mazukhina S., Nesterov D., Men'shikov Yu. Artificial geochemical barriers for additional recovery of non-ferrous metals and reduction of ecological hazard from the mining industry waste // *J. Environmental Science and Health. Part A*. 2011. V. 46, N 13. P. 1579–1587.

14. Орехова Н. Н., Зубчук М. И., Серопян М. П. Разработка технологической классификации медьсодержащих техногенных вод горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ. 2008. № 3. С. 285–287.

15. Светлов А. В., Кравченко Е. А., Селиванова Е. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Исследование возможности кучного выщелачивания цветных металлов из сульфидного сырья природных и техногенных объектов Мурманской области // Экология промышленного производства. 2015. № 3. С. 65–70.

16. Светлов А. В., Потапов С. С., Потапов Д. С., Кравченко Е. А., Ерохин Ю. В., Потокин А. С., Селиванова Е. А., Суворова О. В., Кумарова В. А., Нестеров Д. П., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Исследование возможности извлечения цветных металлов и производства строительных материалов из шлаков медно-никелевого производства // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 2. С. 335–344.

References

1. Chanturiya V. A., Makarov V. N., Makarov D. V. Ekologicheskie i tehnologicheskie problemy pererabotki tehnogenogo sulfidsoderzhaschego syrya [Ecological and engineering issues of processing of sulfide-containing mining waste]. Apatity : KNTs RAN, 2005. 218 p.

2. Chanturiya V. A., Makarov V. N., Makarov D. V. Klassifikatsiya gornopromyshlennykh othodov po tipu mineralnykh assotsiatsiy i harakteru protsessov okisleniya sulfidov [Classification of mine waste by the type of mineral associations and oxidation behavior of sulfides] // Geoekologiya. 2000. N 2. P. 136–143.

3. Masloboev V. A., Seleznev S. G., Makarov D. V., Svetlov A. V. Otsenka ekologicheskoy opasnosti hraneniya othodov dobychi i pererabotki medno-nikelevykh rud [Assessment of eco-hazard of copper-nickel ore mining and processing waste] // Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2014. N 3. P. 138–153.

4. Amos R. T., Blowes D. W., Bailey B. L., Segó D. C., Smith L., Ritchie A., Ian M. Waste-rock hydrogeology and geochemistry // Applied Geochemistry. 2015. V. 57. P. 140–156.

5. Olías M., Cánovas C. R., Nieto J. M., Sarmiento A. M. Evaluation of the dissolved contaminant load transported by the Tinto and Odiel rivers Basin (South West Spain) // Applied Geochemistry. 2006. V. 21. P. 1733–1749.

6. Butler B. A., Ranville J. F., Ross P. E. Observed and modeled seasonal trends in dissolved and particulate Cu, Fe, Mn, and Zn in a mining-impacted stream // Water Research. 2008. V. 42. P. 3135–3145.

7. Moncur M. C., Jambor J. L., Ptacek C. J., Blowes D. W. Mine drainage from the weathering of sulfide minerals and magnetite // Applied Geochemistry. 2009. V. 24. P. 2362–2373.

8. Moncur M. C., Ptacek C. J., Hayashi M., Blowes D. W., Birks S. J. Seasonal cycling and mass-loading of dissolved metals and sulfate discharging from an abandoned mine site in northern Canada // Applied Geochemistry. 2014. V. 41. P. 176–188.

9. Doulati Ardejani F., Shokri Jodeiri B., Bagheri M., Soleimani E. Investigation of pyrite oxidation and acid mine drainage characterization associated with Razi active coal mine and coal washing waste dumps in the Azad shahr-Ramian region, Northeast Iran // Environmental Earth Sciences. 2010. V. 61. P. 1547–1560.

10. Nordstrom D. K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // Applied Geochemistry. 2011. V. 26. P. 1777–1791.

11. Filip J., Zboril R., Schneeweiss O., Zeman J., Cernik M., Kvapil P., Otyepka M. Environmental applications of chemically pure natural ferrihydrite // Environmental Science & Technology. 2007. V. 41. P. 4367–4374.

12. Makarov V. N., Makarov D. V., Vasileva T. N., Kremenetskaya I. P. Vzaimodeystvie prirodnykh serpentinov s razbavlenymi sulfatnymi rastvorami, sodержaschimi iony nikelya [Interaction of natural serpentines with dilute sulfate solutions containing nickel ions] // Zhurnal neorganicheskoy himii. 2005. V. 50, N 9. P. 1418–1429.

13. Chanturiya V., Masloboev V., Makarov D., Mazukhina S., Nesterov D., Men'shikov Yu. Artificial geochemical barriers for additional recovery of non-ferrous metals and reduction of ecological hazard from the mining industry waste // J. Environmental Science and Health. Part A. 2011. V. 46, N 13. P. 1579–1587.

14. Орехова Н. Н., Зубчук М. И., Серопян М. П. Разработка технологической классификации медьсодержащих техногенных вод горных предприятий [Development of technological classification of copper-containing industrial waste waters for mining enterprises] // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ. 2008. N 3. P. 285–287.

15. Svetlov A. V., Kravchenko E. A., Selivanova E. A., Seleznev S. G., Makarov D. V., Masloboev V. A. Issledovanie vozmozhnosti kuchnogo vychelachivaniya tsvetnykh metallov iz sulfidnogo syrya prirodnykh i tehnogennykh ob'ektov Murmanskoy oblasti [Perspectives for heap leaching of non-ferrous metals from natural and technogenic objects in the Murmansk Region] // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2015. N 3. P. 65–70.

16. Svetlov A. V., Potapov S. S., Potapov D. S., Kravchenko E. A., Erohin Yu. V., Potokin A. S., Selivanova E. A., Suvorova O. V., Kumarova V. A., Nesterov D. P., Makarov D. V., Masloboev V. A. Issledovanie vozmozhnosti izvlecheniya tsvetnykh metallov i proizvodstva stroitelnykh materialov iz shlakov medno-nikelevogo proizvodstva [Investigation of possibility of recovery nonferrous metals and producing building materials from copper-nickel smelterslag] // Vestnik MGTU. 2015. V. 18, N 2. P. 335–344.

Сведения об авторах

Светлов Антон Викторович – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: svetlov@inep.ksc.ru

Svetlov A. V. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: svetlov@inep.ksc.ru

Макаров Дмитрий Викторович – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук, зав. лабораторией; e-mail: makarov@inep.ksc.ru

Makarov D. V. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Head of Laboratory; e-mail: makarov@inep.ksc.ru

Потапов Сергей Сергеевич – Ильменский заповедник, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, 456317; Институт минералогии Уральского отделения РАН, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: spot@ilmeny.ac.ru

Potapov S. S. – Il'men reserve, Miass, Chelyabinsk region, Russia, 456317; Institute of Mineralogy of the Ural Branch of RAS, Cand. of Geol. & Miner. Sci., Senior Researcher; e-mail: spot@ilmeny.ac.ru

Некипелов Дмитрий Александрович – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, лаборант; e-mail: rokishkis@yandex.ru

Nekipelov D. A. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Assistant; e-mail: rokishkis@yandex.ru

Селезнев Сергей Геннадьевич – ул. Швецова, 38, г. Санкт-Петербург, Россия, 198095; ООО "Координационный Центр ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА", канд. геол.-мин. наук, вед. геолог; e-mail: seleznev.s.ek@mail.ru

Seleznev S. G. – 38, Shvetsova Str., St. Petersburg, Russia, 198095; "Coordination Center GEOLOGICAL EXPLORATION" Ltd., Cand. of Geol. & Miner. Sci., Leading Geologist; e-mail: seleznev.s.ek@mail.ru

Маслобоев Владимир Алексеевич – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук, директор; e-mail: masloboev@ksc.ru; Апатитский филиал Мурманского государственного технического университета, кафедра геоэкологии, профессор; e-mail: masloboev@ksc.ru

Masloboev V. A. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Director; e-mail: masloboev@ksc.ru; Apatity Branch of Murmansk State Technical University, Department of Geoecology, Professor; e-mail: masloboev@ksc.ru

A. V. Svetlov, D. V. Makarov, S. S. Potapov,
D. A. Nekipelov, S. G. Seleznev, V. A. Masloboev

Research of leaching of disseminated copper-nickel ores in their interaction with mine waters

A great amount of mine waste creates serious problems for economy and ecology in mining regions. Keeping of dumps and tailings storages requires huge capital costs and material inputs. Removal of overburden volumes cause ecological disequilibrium, ingress of chemical agents and heavy metals in ground and surface water have an adverse influence on eco-systems and human health. These hazards are particularly high under extreme climatic conditions, when mines create vast desert lands around themselves. Foreign researchers use the terms "acid mine drainage" (AMD) and "acid rock drainage" (ARD) when speaking on mine water oxidation and contamination of the environment with heavy metals. AMD is induced by underground mine drainage, natural sulfide-bearing rock exposures, etc. The processes occurring in the interaction the mine water with fine dust particles, as well as water filtering through the thick sulfide rocks have been studied. It has been shown that the reduction in potential environmental hazard of mine water of JSC "Kola MMC" is achieved through precipitation of heavy metals by iron hydroxide and magnesium hydrosilicate. Preliminary assessment of the feasibility of hydrometallurgical processing of disseminated copper-nickel ores has been made.

Key words: copper-nickel ore, mine water, leaching.