

## ВОЗМОЖНОСТИ КУЧНОГО БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НЕКОНДИЦИОННЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

А.В. Светлов, Д.В. Макаров, В.А. Маслобоев

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,  
Россия, 184209, г. Апатиты, мкр. Академгородок, 14А, e-mail: svetlov@inper.ksc.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты лабораторных исследований, моделирующих кучное выщелачивание цветных металлов из образцов забалансовых руд месторождений Мончеплутонна: Нюд-П и Морошковое озеро, а также хвостов обогащения медно-никелевых руд и шлаков комбината «Печенганикель» АО «Кольская ГМК». Установлено, что руды и техногенное сырье могут быть переработаны методом кучного биовыщелачивания, себестоимость которого в 2 и более раз ниже чанового, при продолжительности процесса около года. Необходим поиск оптимальных технологических решений, обеспечивающих интенсификацию процессов растворения сульфидных минералов, в первую очередь, халькопирита.

**Ключевые слова:** кучное биовыщелачивание, некондиционные медно-никелевые руды, хвосты обогащения, отвальные шлаки, пирротин, пентландит, халькопирит.

### Введение

Забалансовые сульфидные руды на отработанных и разрабатываемых месторождениях, вскрышные породы, хвосты обогатительных фабрик и шлаки цветной металлургии являются одним из крупных источников цветных металлов [1]. Для переработки подобного природного и техногенного сырья перспективны методы кучного выщелачивания цветных металлов. Технология выщелачивания состоит в следующем. На поверхность кучи или внутрь нее подается раствор, содержащий серную кислоту, окислитель (кислород, ионы железа (III) и др.) и микроорганизмы (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* и др.). Раствор распределяется равномерно по поверхности и массе отвала посредством бассейнов, дренажных канав, сети перфорированных труб или разбрызгиванием. Выходящий из-под кучи обогащенный цветными металлами раствор собирается и направляется на дальнейшую переработку [2].

Зарубежная гидрометаллургическая практика свидетельствует о перспективности применения кучного выщелачивания, прежде всего, золота, меди и урана из бедных руд и отходов горного и обогатительного производств [2, 3]. Около 20 % годового мирового производства меди приходится на кучное биовыщелачивание руд и отвалов горнодобывающих производств [4]. В последнее десятилетие начаты опытно-промышленные работы по кучному биовыщелачиванию бедных медно-никелевых сульфидных руд (объ-

екты Радио Хилл, Западная Австралия; Талвиваара, Соткамо, Финляндия; Хами, Синьцзян, КНР) [3-10].

Вместе с тем, внедрение кучного биовыщелачивания цветных металлов из природных и техногенных сульфидных месторождений пока не получило широкого распространения в Российской Федерации [2].

При использовании кучного выщелачивания содержание полезных компонентов может быть существенно ниже, чем для традиционных металлургических технологий. Так, в технологии кучного биовыщелачивания, применяемой финской компанией Talvivaara Mining Company Plc на никелевом руднике месторождения полиметаллических руд, расположенном в субарктической зоне на северо-востоке Финляндии среднее содержание никеля в руде составляет 0,23, меди 0,13, кобальта 0,02 и цинка 0,51 % [11]. В случаях переработки техногенного сырья кондиционное содержание может быть еще ниже за счет того, что затраты на добычу в основном уже понесены, а затраты на транспортировку производятся в рамках статьи на рекультивацию [12].

Основным препятствием развития технологии кучного выщелачивания цветных металлов является суровость климатических условий большинства рудных районов нашей страны, в том числе Мурманской области. Зарубежные предприятия расположены преимущественно в странах с теплым климатом, что позволяет круглый год использовать гидрометаллургические процессы, включая биотехнологии [2]. Следует, однако, учитывать, что окисление сульфидов – экзотермический процесс, поэтому при относительно высоком их содержании в руде (включая сульфиды же-

леза) может наблюдаться локальный разогрев вещества отвала, благоприятствующий интенсификации выщелачивания. Для повышения интенсивности вскрытия сульфидных минералов разрабатываются новые, экологически безопасные и энергосберегающие методы на основе физических, физико-химических и механохимических воздействий [1, 13].

Разработка технологий, обеспечивающих доизвлечение полезных компонентов из некондиционных медно-никелевых руд и отходов горно-металлургического комплекса Мурманской области является актуальной научно-технической задачей. Начальным этапом, результаты которого представлены в статье, было моделирование кучного выщелачивания некондиционных руд и техногенных образований в лабораторных условиях.

### Объекты исследований

Объектами исследований были руды медно-никелевых месторождений Мончеплутона, а также отходы добычи и переработки медно-никелевых руд АО «Кольская ГМК».

#### *Медно-никелевые руды Мончеплутона*

Благодаря глубокому и всестороннему исследованию Мончегорский район является одним из наиболее изученных в пределах Мурманской области, а расположенный на его территории Мончеплутон стал классическим примером расслоенных интрузий базит-ультрабазитового состава с разнообразными типами оруденения [14].

#### *Месторождение «Нюд-П»*

Месторождение находится в средней части широтной ветви плутона на западном склоне г. Нюд. Породы «критического» горизонта различного состава от лейкократовых норитов до пироксенитов и перидотитов, а также подстилающие его верхние части оливниновых норитов содержат сульфидное оруденение. Мощность «критического» горизонта достигает 50 м, мощность рудной зоны до 20 м. Оруденение вкрапленного, прожилково-вкрапленного и гнездового типа образует линзообразные тела неправильной формы, вытянутые по простиранию «критического» горизонта. Содержание сульфидов широко варьирует. Минеральный состав преимущественно пирротинный с примесью пентландита, халькопирита, магнетита и др. Химический состав вкрапленных руд «критического» горизонта, %: Ni 0.32, Cu 0.32, Co 0.013, S 2.44, сумма PGE = 5.69 г/т [14].

#### *Месторождение Морошковое озеро*

Месторождение приурочено к тектонической зоне северо-западного направления на контакте норитов массива Нюд-Поаз с вмещающими метадиоритами. Медно-никелевое оруденение располагается в зоне расщелачивания, сложенной актинолит-хлоритовыми, актинолитовыми и кварц-хлоритовыми сланцами, рассматриваемыми как продукт динамометаморфизма

приконтактных норитов. Характерным в составе оруденения является высокое содержание в руде никеля, а в минеральном составе – пентландита и пирита с примесью никеля [14].

#### *Хвосты обогащения медно-никелевых руд АО «Кольская ГМК»*

Хвостохранилище обогатительной фабрики (ОФ) № 1 комбината «Печенганикель» АО «Кольская ГМК» в г. Заполярный Мурманской области эксплуатируется с 1965 г. Объем хвостов составляет более 250 млн. т. Гранулометрический и минеральный состав хвостов может варьировать в определенных пределах в зависимости от особенностей руды и технологического процесса. В то же время, для них характерно преобладание фракции с размером зерен -0,1 мм, во многих случаях до 50 % зерен имеет крупность -0,044 мм. В составе хвостов обогащения преобладают серпентины (~60 %) [15]. В заметных количествах присутствуют пироксены, амфиболы, тальк, хлориты, кварц, полевые шпаты. Основными рудными минералами являются магнетит, пирротин, пентландит, халькопирит. Общее содержание сульфидных минералов составляет 1-3 %.

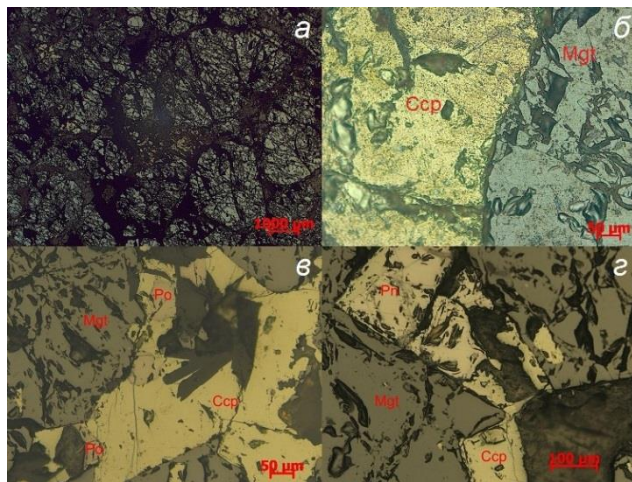
#### *Отвальные гранулированные шлаки АО «Кольская ГМК»*

Отвалы шлаков медно-никелевого производства плавильного цеха комбината «Печенганикель» АО «Кольская ГМК» в пгт. Никель, образованные в 1945 году, содержат более 45 млн. т. сырья [16]. Крупность гранул отвалных гранулированных шлаков комбината «Печенганикель» варьирует в диапазоне от +5 до -0,1 мм, однако около 80 % приходится на диапазон -3+0,5 мм, а выход класса -2+1 мм составляет более 45 %. В составе шлаков преобладает магнезиально-железистое стекло, в котором наблюдаются скелетные игольчатые кристаллы оливина, образующие структуру спинифекс [16]. Сульфиды в шлаках чаще всего округлой формы (шарики, капли), встречаются овальные выделения, также наблюдаются срастания отдельных зерен сульфидов. Размеры сульфидов варьируют от 5 до 20 мкм. Реже наблюдаются более крупные зерна ~50 мкм. Химический состав сульфидов лежалых и шлаков текущего производства удовлетворительно пересчитывается на формулу пентландита  $(\text{FeNi})_9\text{S}_8$ .

### Результаты и их обсуждение

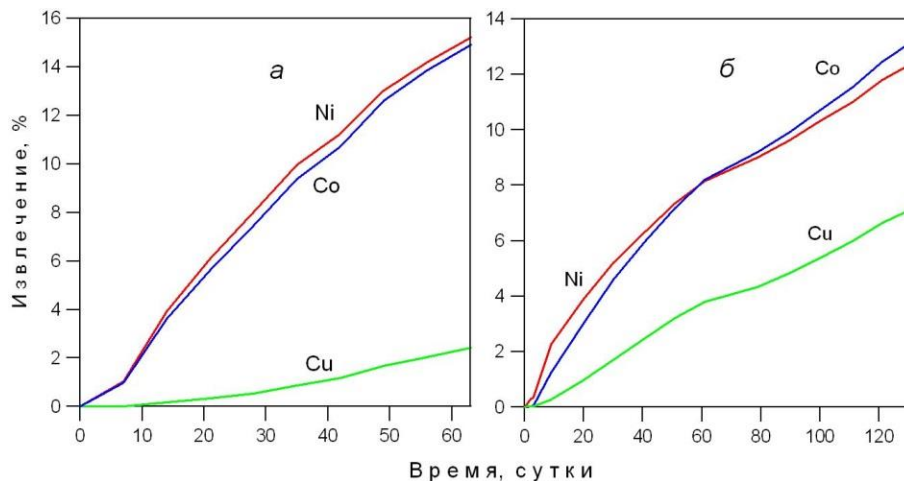
#### *Руда месторождения Морошковое озеро*

Минералогические исследования образца использованной для выщелачивания руды показали, что магнетит образует гипидиоморфные зерна серого цвета с коричневым оттенком. Слагает большую часть породы (рис. 1а). Халькопирит – минерал ярко-жёлтой окраски, образует зерна неправильной формы в интерстициях магнетита (рис. 1б); в крупных зернах халькопирита часто наблюдаются включения пирротина (рис. 1в); образует срастания с пентландитом (рис. 1г).



**Рис. 1.** Мелкосреднезернистая руда месторождения Морошковое озеро (а); включения халькопирита в магнетите (б); вросстки пирротина в халькопирите (в); сложный сросток магнетита, халькопирита и пентландита. По пентландиту развивается виоларит (г).

Исследовали взаимодействие руды фракции - 3+2 мм с выщелачивающим реагентом в динамическом режиме в колонках высотой диаметром 40 мм при температуре  $18 \pm 2$  °С в течение 65 суток. Руда содержала, %: Ni 0,72; Cu 3,09; Co 0,039. В качестве реагентов использовали 2%-ную серную кислоту. Перед выщелачиванием проводили предварительное влагонасыщение руды. Опыты вели без оборота растворов.



**Рис. 2.** Кинетика выщелачивания металлов из образцов руд

Исследовано взаимодействие руды фракции - 3+2 мм с выщелачивающим реагентом в динамическом режиме в колонках высотой диаметром 40 мм при температуре  $18 \pm 2$  °С в течение 130 суток. Руда содержала, %: Ni 1,70; Cu 0,50; Co 0,07 (для экспериментов использовали образец густовкрапленной руды). В качестве реагентов использовали 2%-ную серную кислоту. Перед выщелачиванием руды проводили ее предварительное влагонасыщение. Опыты вели в режиме аналогичном эксперименту с рудой месторождения Морошковое озеро.

На рис. 2б показана кинетика выщелачивания металлов из образцов руды. Наиболее интенсивно выщелачивается кобальт. Вероятно, это связано с тем, что в

Загрузка руды составляла 150 г. Кислоту в количестве 10 мл подавали раз в 3-4 суток. Растворы на выходе из колонок анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

На рис. 2а показана кинетика выщелачивания металлов из образцов руды. С одинаковой интенсивностью выщелачиваются никель и кобальт. Медь выщелачивается медленно. Очевидно, это связано с электрохимическими свойствами сульфидных минералов [17]. Халькопирит, находящийся в сростках с пирротинном и пентландитом, выступает в роли катодных участков, на которых происходит восстановление меди окислителей. Ожидать приемлемого извлечения меди можно после окисления сульфидов железа и никеля месторождений Морошковое озеро (а) и Нюд-II (б) [3]. Извлечения металлов составили, %: никель 15,2; кобальт 14,9; медь 2,4.

**Руда месторождения Нюд-II**

Согласно минералогическим исследованиям пирротин образует сульфидную матрицу руды и содержит вросстки пентландита. Халькопирит также широко представлен в качестве включений в пирротине. Магнетит образует гипидиоморфные зерна в пирротине. Силикаты представлены ортопироксеном, плагиоклазом. Вещество в ортопироксенах частично замещено амфиболом или хлоритом.

руде кобальт присутствует только в составе сульфидов, причем часть его содержится в пирротине. Также как и для руды месторождения Морошковое озеро более низкие показатели характерны для меди. За 130 суток извлечения металлов составили, %: никель 12,4; медь 7,2; кобальт 13,2.

**Хвосты обогащения медно-никелевых руд**

При переработке тонкодисперсных техногенных продуктов или природного сырья с высоким содержанием слоистых гидросиликатов (глинистых минералов) возникают проблемы кольматации, приводящие к ухудшению проницаемости штабеля выщелачивающими растворами и к остановке процесса. Данные

явления мы наблюдали при хранении хвостов обогащения медно-никелевых руд [15]. Появление в лежах хвостах хлоритов, а также смешанно-слоистых образований, с чередованием хлоритовых и смектитовых слоев, приводит к образованию глиноподобных искусственных грунтов и снижению коэффициента фильтрации более чем в 100 раз [18]. Одним из путей решения этой проблемы является грануляция материала с использованием вяжущих. Наиболее часто в качестве вяжущих применяют известь [19]. Однако с учетом избытка производимой предприятиями АО «Кольская ГМК» серной кислоты и проблем с ее реализацией, перспективным представляется процесс сернокислотной агломерации, в котором кислота используется в качестве связующего.

Проведены эксперименты с получением окатышей при соотношении Т:Ж=5-3:1. В качестве связующего применяли раствор  $H_2SO_4$  концентрацией 10-30 %. Диаметр гранул для испытаний – 0,8-1 см. Максимальная прочность гранул при сжатии составила 2,8-3 МПа. Дальнейшие исследования проводили с использованием в качестве связующего 10%-ной кислоты при отношении Т:Ж=3:1.

Перколяционное выщелачивание вели 1-3%-ной серной кислотой в колонках диаметром 45 мм в течение 110 суток. Предварительно проводили влагонасыщение окатышей водой. Загрузка окатышей составляла 150 г. Пауза между орошениями составляла 2-3 суток, объем подаваемой кислоты – 25 мл. Хвосты содержали, %: Ni 0,17, Cu 0,07, Co 0,01. Растворы на выходе из колонок анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Динамика выщелачивания металлов в эксперименте с 1%-ной кислотой показана на рис. 3а. Как видно, процесс протекает достаточно интенсивно. Концентрации никеля в растворе стабильны и находятся в диапазоне 0,1-0,35 г/л. Эти показатели приемлемы для промышленной реализации метода при условии оборота растворов. С учетом растворения части силикатных минералов, концентрации железа достигают 0,9 г/л. Таким образом, необходима проработка технических решений селективного удаления железа из продуктивных растворов. Обращают на себя

внимание относительно высокие концентрации меди. Показатели для кобальта также достаточно стабильны.

На рис. 3б показана кинетика выщелачивания металлов из хвостов обогащения медно-никелевых руд. Наиболее интенсивно, как и следовало ожидать, выщелачивается никель. За 110 суток в раствор перешло около 60 % содержащегося в гранулах металла. Более низкие показатели для меди (~44 %) объясняются тем, что металл присутствует в составе халькопирита [2, 3]. Относительно низкие показатели для кобальта (~41 %) связаны, вероятно, с нахождением части металла в виде изоморфной примеси в магнетите.

Отвальные гранулированные шлаки медно-никелевого производства

Ввиду того, что сульфиды цветных металлов шлака находятся внутри силикатной матрицы, для лучшего доступа выщелачивающего реагента к минералам необходимо измельчение гранул и последующее окомкование измельченного шлака в агломераторах.

Нами проведены эксперименты с получением окатышей из измельченного до -40 мкм шлака при соотношении Т:Ж=5-3:1. В качестве связующего применяли 10%-ный раствор  $H_2SO_4$ . Диаметр окатышей для испытаний составлял 0,8-1 см, прочность при сжатии от 2,3 до 2,5 МПа. Перколяционное выщелачивание вели 1-3%-ной серной кислотой в колонках диаметром 45 мм в течение 110 суток. Предварительно проводили влагонасыщение окатышей водой. Загрузка составляла 150 г. Пауза между орошениями составляла 3-5 суток, объем подаваемой кислоты – 25 мл. Исходный шлак содержал, %: Ni 0,155, Cu 0,115, Co 0,09. Растворы на выходе из колонок анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Концентрации металлов в продуктивных растворах в эксперименте с 1%-ной кислотой показаны на рис. 4а. Показатели в целом приемлемы для промышленной реализации метода при условии оборота растворов и интенсификации выщелачивания с использованием окислителей и микроорганизмов. На рис. 4б показана кинетика выщелачивания металлов из окатышей. Наиболее интенсивно выщелачивается никель. За 107 суток в раствор перешло около 17 % металла. Для кобальта показатели составили 8,6 %. Значительно хуже выщелачивается медь (~4,6 %).

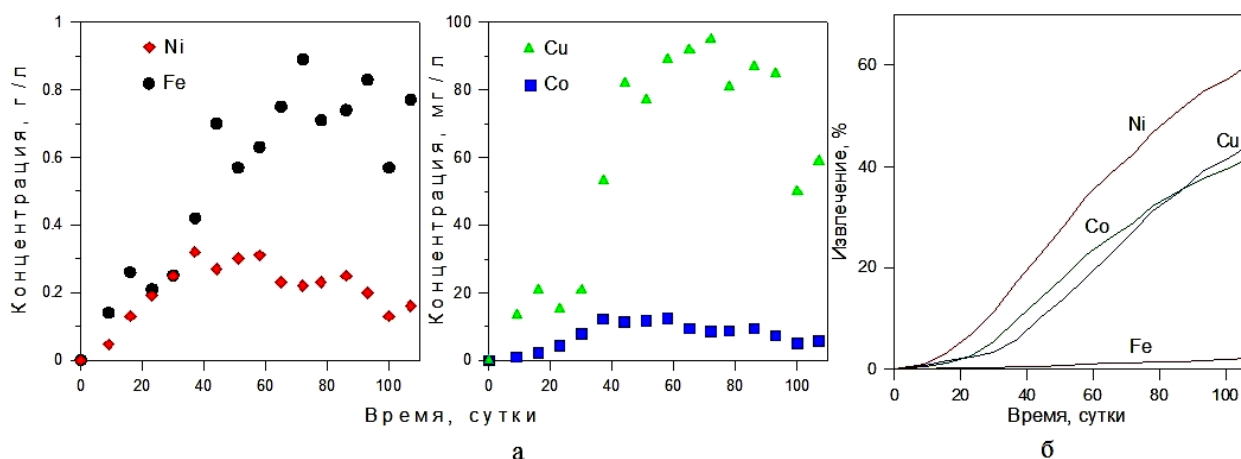


Рис. 3. Концентрации металлов в растворах выщелачивания хвостов обогащения медно-никелевых руд (а) и кинетика процесса (б).



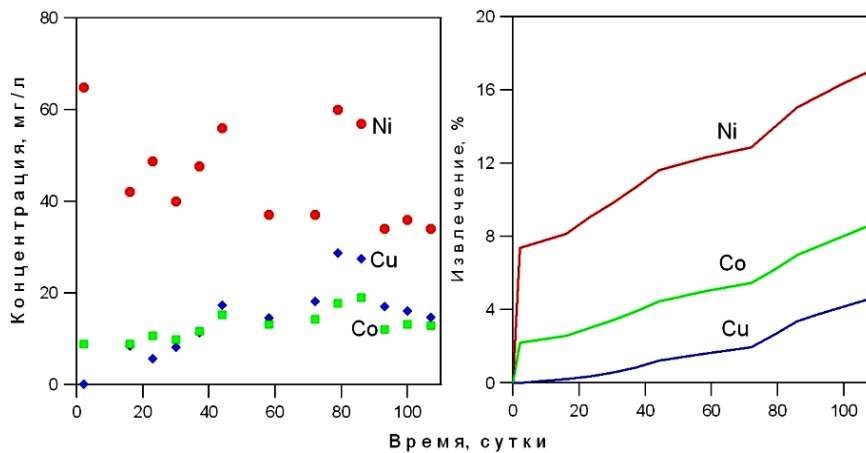


Рис. 4. Концентрации металлов в растворах выщелачивания шлаков и кинетика процесса.

### Выводы

Проведены минералого-технологические исследования бедных медно-никелевых руд Мончеплутона: месторождений Ньюд-П и Морошковое озеро. Установлено, что руды могут быть переработаны методом кучного биовыщелачивания, себестоимость которого в 2 и более раз ниже чанового, при продолжительности процесса около года.

Выполнены эксперименты по серноокислотной агломерации хвостов обогащения медно-никелевых руд и измельченных отвальных шлаков. Получены окатыши при соотношении Т:Ж=5-3:1. Оптимальная прочность составила 2,8-3 МПа для окатышей на основе хвостов, 2,3-2,5 МПа – на основе шлаков.

Проведено перколяционное выщелачивание хвостов обогащения медно-никелевых руд и шлаков серной кислотой концентрацией 1-3 %. Показано, что за 110 суток в раствор из хвостов обогащения извлекается около 60 % никеля.

Необходим поиск оптимальных технологических решений, обеспечивающих интенсификацию процессов растворения сульфидных минералов, в первую очередь, халькопирита. Очевидна целесообразность серноокислотной агломерации не только техногенных образований (хвостов и шлаков), но и руд, а также введения в раствор окислителей и адаптированных микроорганизмов.

### Библиографический список

1. **Чантурия, В.А.** Развитие физико-химических основ и разработка инновационных технологий глубокой переработки техногенного минерального сырья / В.А. Чантурия, А.П. Козлов // Горный журнал. 2014. – №7. – С. 79-84.
2. **Халезов, Б.Д.** Кучное выщелачивание медных и медно-цинковых руд: (отечественный опыт) / Б.Д. Халезов. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2013. – 346 с.
3. **Watling, H.R.** The bioleaching of nickel sulphides / H.R. Watling // Hydrometallurgy. 2008. – V.91. №1-4. – P. 70-88.
4. **Watling, H.R.** The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – A review /

H.R. Watling // Hydrometallurgy. 2006. – V.84. – №1-2. – P.81-100.

5. **Bhatti, T.M.** Chemical and bacterial leaching of metals from black schist sulfide minerals in shake flasks / T.M. Bhatti, J.M. Bigham, A. Vuorinen et al. // International Journal of Mineral Processing. 2012. – V.110-111. – P.25-29.

6. **Halinen, A-K.** Heap bioleaching of a complex sulfide ore: Part I. Effect of temperature on base metal extraction and bacterial compositions / A-K. Halinen, N. Rahunen, A.H. Kaksonen, J.A. Puhakka // Hydrometallurgy. 2009. – V.98. №1-2. – P. 92-100.

7. **Halinen, A-K.** Heap bioleaching of a complex sulfide ore: Part II. Effect of temperature on base metal extraction and bacterial compositions / A-K. Halinen, N. Rahunen, A.H. Kaksonen, J.A. Puhakka // Hydrometallurgy. 2009. V.98. N1-2. P.101-107.

8. **Watling, H.R.** Leaching of a low-grade, copper-nickel sulfide ore. 1. Key parameters impacting on Cu recovery during column bioleaching / H.R. Watling, A.D. Elliot, M. Maley, W. van Bronswijk, C. Hunter // Hydrometallurgy. 2009. – V.97. №3-4. – P.204-212.

9. **Qin, W.** Heap bioleaching of a low-grade nickel-bearing sulfide ore containing high levels of magnesium as olivine, chlorite and antigorite / W. Qin, S. Zhen, Z. Yan, M. Campbell, J. Wang, K. Liu, Y. Zhang // Hydrometallurgy. 2009. – V.98. №1-2. – P.58-65.

10. **Yang, C.** Bioleaching of a low grade nickel-copper-cobalt sulfide ore / C. Yang, W. Qin, S. Lai, J. Wang, Y. Zhang, F. Jiao, L. Ren, T. Zhuang, Z. Chang // Hydrometallurgy. 2011. – V.106. N1-2. – P.32-37.

11. **Лодейщиков, В.В.** Переработка никелесодержащих руд методом кучного бактериального выщелачивания. Опыт финской фирмы Talvivaara / В.В. Лодейщиков // Золотодобыча. 2009. – №132. – С.12-14.

12. **Кашуба, С.Г.** Кучное выщелачивание в российской практике – обзор опыта и анализ перспектив / С.Г. Кашуба, М.И. Лесков // Золото и технологии. 2014. – №1(23). – С. 10-14.

13. **Чантурия, В.А.** Обоснование эффективности использования электрохимической технологии водоподготовки в процессах кучного выщелачивания руд / В.А. Чантурия, В.Г. Миненко, Е.В. Копорулина, А.Л. Самусев, Е.Л. Чантурия // Физико-технические

- проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. – №5. – С.115-124.
14. **Припачкин, П.В.** Cu-Ni-ЭПГ и Сг месторождения Мончегорского района, Кольский п-ов, Россия. Путеводитель геологической экскурсии. / П.В. Припачкин, Ю.Н. Нерадовский, Ж.А. Федотов, Л.И. Нерович. Апатиты: Изд-во ГИ КНЦ РАН, 2013. – 44 с.
15. **Макаров, Д.В.** Изменения содержания Ni, Cu, Co, Fe, Mg в хвостах обогащения медно-никелевых руд в процессе их хранения / Д.В. Макаров, В.Н. Макаров, Т.Н. Васильева, Е.Р. Фарвазова // Инженерная экология. 2004. – №1. – С.18-28.
16. **Макаров, Д.В.** Исследование экологической опасности и потенциальной возможности извлечения полезных компонентов из гранулированных шлаков комбината «Печенганикель» АО «Кольская ГМК» / Д.В. Макаров, Д.С. Потапов, С.С. Потапов, А.В. Светлов // Экология промышленного производства. 2013. – № 2. – С. 54-58.
17. **Чантурия, В.А.** Электрохимия сульфидов: теория и практика флотации / В.А. Чантурия, В.Е. Вигдергауз. М.: Руда и металлы, 2008. – 272 с.
18. **Макаров, В.Н.** Потенциальная экологическая опасность выведенных из эксплуатации хранилищ хвостов обогащения медно-никелевых руд / В.Н. Макаров, Т.Н. Васильева, Д.В. Макаров и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. – Т.13, №1. – С.85-93.
19. **Рыльникова, М.В.** Опытнo-промышленная апробация технологии выщелачивания отходов переработки медно-колчеданных руд / М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко, А.Ф. Илимбетов, А.Н. Звягинцев // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. 2008. – №2. – С.293-301.

---

## POSSIBILITIES OF COMPACT BIOLEACHING OF SUB-STANDARD COPPER-NICKEL ORES AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

**A.V. Svetlov, D. V. Makarov, V.A. Masloboev**

There are presented results of laboratory based modeling of heap leaching of non-ferrous metals from samples low-grade copper-nickel ores of Monchepluton (Nude-II, Moroshkovoe Ozero deposits), tailings and slag of Pechanganickel Plant of the Kola MMC JSC. It was found that the ores and technogenic raw materials can be processed by heap bioleaching. The production costs of bioleaching are 2 times or more below than the vat leaching, while the duration of the process for about a year. The processes of dissolution of sulphide minerals are needed to intensify, primarily chalcopyrite.

Keywords: heap bioleaching, low-grade copper-nickel ore, copper-nickel tailings and slag, pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite.