

УДК 669.2/8

Горячев Андрей Александрович

кандидат технических наук,
младший научный сотрудник,
лаборатория природоподобных технологий и
техносферной безопасности Арктики,
Центр наноматериаловедения КНЦ РАН,
184209, г. Апатиты, мкр. Академгородок, 4А
e-mail: a.goryachev@ksc.ru

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ПЕСКОВ МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЖИГА С СУЛЬФАТОМ АММОНИЯ*

Аннотация:

Проведены исследования по обжигу медно-никелевых аллювиальных техногенных песков месторождения р. Наледная (Норильский район). Для проведения экспериментов из общей массы песков отделяли класс -100 мкм, содержания никеля и меди в классе составили 0,32 и 0,22 %, соответственно. В ходе работы был исследован вещественный состав исходных песков и экспериментальных образцов, а также подобран оптимальный режим их переработки методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония. Для этого образцы песков смешивали с сульфатом аммония, затем обожженную смесь выщелачивали в воде в течение 40 мин при постоянном перемешивании с интенсивностью 230 мин^{-1} . Для песков характерно значительное количество сростков, содержащих множественные рудные включения. Свободных от сростков сульфидов около 1 %, пирротин в значительной степени окислен. Методом рентгенофазового анализа среди сульфидов, помимо пирротина, отмечено наличие халькопирита. Максимальное извлечение металлов было достигнуто при температуре $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и массовом соотношении песков и сульфата аммония 1:3, извлечение никеля составило 73,2 %, меди – 71,6 %.

Ключевые слова: техногенные пески, сульфиды, сульфат аммония, низкотемпературный обжиг, водное выщелачивание, продуктивный раствор, цветные металлы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.115

Goryachev Andrey A.

Junior Researcher,
Candidate of Technical Sciences,
Laboratory of nature-inspired technologies and
environmental safety of the Arctic region,
Nanomaterials Research Centre, KSC of RAS,
184209 Apatity, 4A Akademgorodok
e-mail: a.goryachev@ksc.ru

RECOVERY OF NON-FERROUS METALS FROM ALLUVIAL TECHNOGENIC SANDS BY LOW-TEMPERATURE ROASTING WITH AMMONIUM SULFATE

Abstract:

Research has been conducted on the roasting of copper-nickel alluvial technogenic sands of the Nalednaya River deposit (Norilsk region). For the experiments, the $-100 \mu\text{m}$ class was separated from the sand, the nickel and copper contents in the class were 0.32 and 0.22 %, respectively. During the work, the material composition of the original sands and experimental samples was studied, as well as the optimal mode of their processing by the method of low-temperature roasting with ammonium sulfate was selected. Sand samples were mixed with ammonium sulfate, and then the roasted mixture was leached in water for 40 min with constant stirring at an intensity of 230 min^{-1} . The sands are characterized by a significant number of intergrowths containing multiple ore inclusions. Free from sulfide intergrowths, about 1 %; pyrrhotite is largely oxidized. Using the X-ray phase analysis method, among the sulfides, in addition to pyrrhotite, the presence of chalcopyrite was noted. The maximum recovery of metals was achieved at a roasting temperature of $400 \text{ }^\circ\text{C}$ and a mass ratio of sand and ammonium sulfate of 1:3; the nickel recovery was 73.2 %, copper – 71.6 %.

Key words: technogenic sands, sulfides, ammonium sulfate, low-temperature roasting, water leaching, pregnant solution, non-ferrous metals.

Введение

В настоящее время наблюдается увеличение объемов потребления природных ресурсов, в особенности – минерального сырья. Значительно возрастают темпы потребления цветных металлов, что связано с их востребованностью в базовых отраслях промышленности. Процессы добычи и обогащения полезных ископаемых сопряжены со значительным количеством отходов различного агрегатного состояния, при этом объем образующихся отходов значительно возрастает при использовании ресурсоемких технологий и устаревшего оборудования [1]. Складирование отходов обогащения приво-

* Работа выполнена в рамках тем НИР №№ 122022400093-9 и 1021051803680-5.

дит к значительной нагрузке на окружающую природную среду, так как сульфиды цветных металлов в гипергенной обстановке окисляются с образованием водорастворимых сульфатов, что приводит к негативному воздействию на прилегающие водные экосистемы [2]. Учитывая высокие потери цветных металлов с отходами обогащения, а также значительную нагрузку техногенных объектов на природную среду, целесообразным является поиск путей их вовлечения в производство. Кроме того, отмечается постепенный рост цен на цветные металлы. Средняя цена на никель в 2023 г. составила 21 474 долл. США/т, средняя цена на медь – 8 490 долл. США/т.

Норильск располагается на севере Красноярского края и образует крупный промышленный комплекс. Основным горно-металлургическим предприятием, функционирующим в данном районе, является ПАО «ГМК «Норильский никель», ведущий добычу и переработку медно-никелевых руд с извлечением цветных металлов и металлов платиновой группы. Применяемые на предприятии технологии переработки руд характеризуются существенными потерями ценного компонента с отвальным сырьем. На данный момент накоплено более 300 млн т [3] техногенных отходов – хвосты обогащения, лежалые железистые пирротиновые концентраты и железистые кеки, а также шлакопылевые отвалы.

Применяющиеся на предприятии технологии обогащения не позволяют эффективно вовлекать в переработку перечисленные виды сырья. Перспективными представляются термогидрохимические методы обогащения, в частности – технологии с использованием сульфата аммония в качестве основного реагента, что обусловлено его высокой реакционной способностью при взаимодействии с сульфидами цветных металлов [4]. Технология низкотемпературного обжига сульфидного сырья с сульфатом аммония успешно применялась в мировой практике для различного вида сырья [5], например – латеритных и сульфидных никелевых руд [6, 7], бокситовых [8], окисленных цинковых [9], марганцевых руд [10]. Целью данного исследования был подбор оптимального режима переработки техногенных песков методом низкотемпературного обжига в смеси с сульфатом аммония.

Материалы и методы исследования

Техногенные пески представляют собой аллювиальную россыпь, образованную путем смыва паводковыми и поверхностными водами хвостов обогащения медно-никелевых руд и пыли Малого металлургического и Никелевого заводов (район г. Норильск). Для проведения экспериментов из общей массы песков отделяли класс – 100 мкм, содержание никеля и меди в классе составило 0,32 и 0,22 %, соответственно.

В ходе работы образцы песков смешивали с сульфатом аммония квалификации х.ч. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при массовых соотношениях от 1:1 до 1:6 и обжигали при различных температурах в муфельной печи СНОЛ 3/11 (ООО «НПФ Термикс», Москва, Россия) в статической атмосфере воздуха. Температуру обжига варьировали от 200 до 400 °С, продолжительность обжига – от 60 до 320 мин, нагрев до заданной температуры составлял 60 мин. После обжига смесь охлаждали в течение 60 мин. Затем обожженную смесь выщелачивали в подогретой до ≈ 80 °С дистиллированной воде в течение 40 мин при постоянном перемешивании с интенсивностью 230 мин⁻¹, используя верхнеприводную мешалку MV-6 (ООО «НВ-ЛАБ», Москва, Россия).

Анализ экспериментальных образцов проводили с применением метода сканирующей электронной микроскопии на приборе ZEISS EVO 24 (Carl Zeiss AG, Германия), оборудованном энергодисперсионным рентгеновским спектрометром UltimMax 170 (Oxford Instruments PLC, Великобритания). Изображения и спектры обрабатывались и рассчитывались с помощью ПО Oxford AzTec EDX. Запись дифрактограммы выполняли на порошковом дифрактометре Rigaku MiniFlex-600 (Rigaku Co., Ltd., Япония) в режиме сканирования со скоростью 1°/мин и шагом 0,01°. Анализ кристаллических фаз выполняли с использованием базы данных порошковых дифрактограмм

ICDD. Концентрации ионов меди, никеля и кобальта в продуктивных растворах после выщелачивания обожженной смеси определяли на приборе Shimadzu-AA7000G (Shimadzu Corp., Япония). Обработку результатов проводили с помощью программы MS 15.0.459.1506 Excel 2013 (Microsoft, WA, USA). Визуализация результатов извлечения металлов выполнена в программе Surfer (Golden Software Surfer 8).

Результаты и их обсуждение

Исходный образец техногенных песков представлял собой обломки и минералы ультраосновных пород, довольно измененные – окисленные и частично разрушенные. Методом рентгенофазового анализа среди сульфидов, помимо пирротина, отмечено наличие халькопирита (рис. 1). Для песков характерно значительное количество сростков, содержащих множественные рудные включения (рис. 2а). Свободных от сростков сульфидов около 1 %, пирротин в значительной степени окислен.

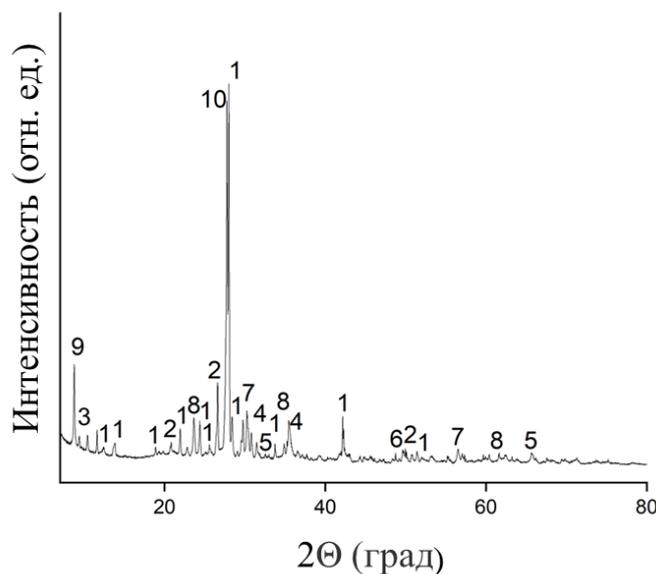
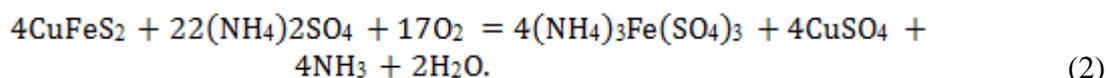
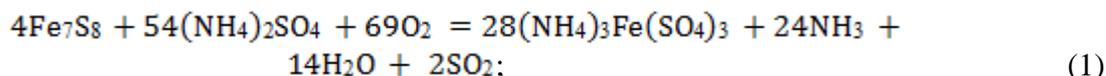


Рис. 1. Дифрактограмма исходного образца техногенных песков.
Рефлексы: 1 – анортит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$); 2 – кварц (SiO_2); 3 – мусковит ($\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$);
4 – магнетит ($\text{FeO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$); 5 – пирротин ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_n$); 6 – халькопирит (CuFeS_2);
7 – авгит ($(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$); 8 – форстерит (Mg_2SiO_4); 9 – клинохлор ($\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$);
10 – альбит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

Взаимодействие сульфидов, входящих в состав песков, с сульфатом аммония (1:4) в процессе обжига при температуре 400 °С в течение 240 мин сопровождалось образованием аммонийсодержащих сульфатов железа – пиракмонит ($(\text{NH}_4)_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$) и сабиит $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ (рис. 2б). Упрощенные схемы реакций пирротина и халькопирита с реагентом можно представить следующими уравнениями (1) – (2):



Сульфат аммония способствует образованию сульфатов меди и никеля как прямым путем, так и опосредованно – путем его разложения и образования диоксида серы (SO_2). Опосредованная реакция проявляется, главным образом, в образовании сульфатов из моносульфидов никеля (NiS) и меди (Cu_2S), оба из которых являются промежуточными продуктами в процессе обжига. Взаимодействие сульфата аммония с моносульфидом никеля можно описать следующим образом. В процессе обжига два атома кислорода связываются с двумя атомами никеля, энергия адсорбции при этом составля-

ет $-1,81$ эВ. Адсорбированные атомы кислорода создают поверхность для взаимодействия с диоксидом серы. Дальнейшее взаимодействие диоксида серы осуществляется по двум направлениям. В первом направлении диоксид серы связывается только с одним атомом кислорода (длина связи S–O $1,59$ Å), что приводит к термодинамически стабильной структуре с энергией адсорбции $-0,75$ эВ. Энергия адсорбции образованной молекулы SO_3 на поверхности адсорбированного ранее кислорода составляет $-3,23$ эВ, что, в конечном счете, ведет к образованию сульфата (SO_4^{2-}). Второе направление, приводящее к образованию сульфата – прямое взаимодействие диоксида серы с двумя атомами кислорода.

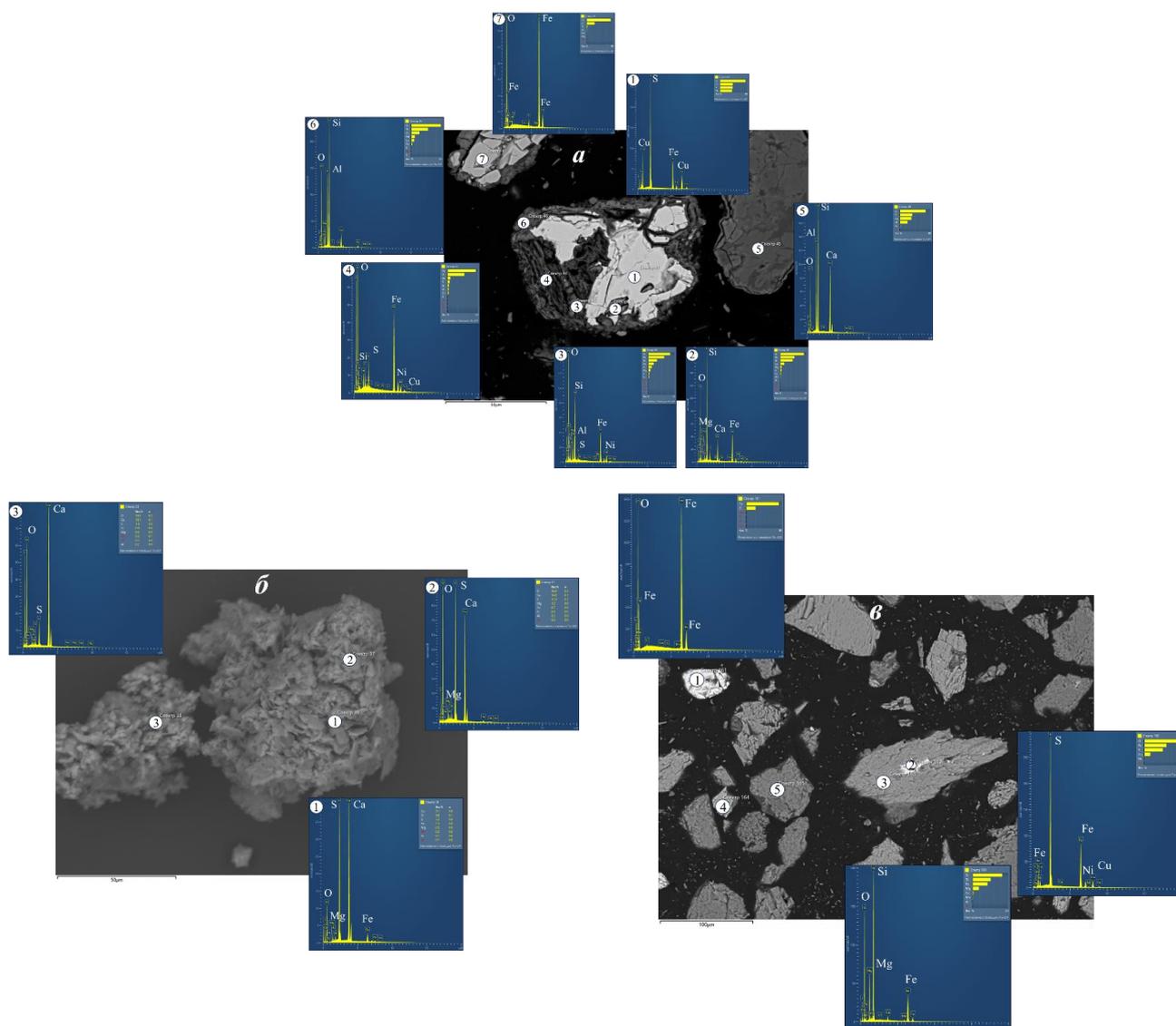


Рис. 2. СЭМ-изображения и ЭДС-спектры:

a – исходные пески; *б* – обожженная при 400 °С смесь песков и сульфата аммония (1:4);
в – остаток после водного выщелачивания обожженной смеси

В случае сульфида меди (Cu_2S) диссоциация кислорода на поверхности минерала приводит к энергии адсорбции $-1,09$ эВ с длиной связи Cu–O $1,81$ Å. Как и для никелевого сульфида, можно выделить два направления формирования сульфата в процессе обжига в смеси с сульфатом аммония. В первом случае SO_2 взаимодействует с поверхностью Cu_2S через адсорбированный атом кислорода, что приводит к падению энергии адсорбции до $-1,89$ эВ, длина связи S–O составляет $1,58$ Å. Когда адсорбированные диоксид серы и кислород десорбируются с поверхности сульфида, энергия адсорбции со-

ставляет $-0,79$ эВ, что указывает на экзотермический характер процесса. В конечном итоге адсорбция SO_3 приводит к образованию SO_4^{2-} на поверхности сульфида меди. Второе направление, как и в случае никелевого сульфида, заключается в прямом взаимодействии диоксида серы с двумя атомами кислорода [11].

Образованные в процессе обжига сульфаты полностью растворялись на стадии водного выщелачивания. Остаток после выщелачивания характеризовался преобладанием оксидов и силикатов (рис. 2в). Отмечено некоторое количество сульфидов, что, вероятно, будет приводить к неполному извлечению цветных металлов в раствор.

По результатам химического анализа было установлено, что пески характеризуются преобладанием кремнезема, содержание которого составило 39,1 %, отмечено значительное количество оксидов железа и алюминия (табл. 1). Эти компоненты преобладают и в обожженной смеси песков и сульфата аммония (400 °С, 1:4). Остаток после выщелачивания характеризовался повышением доли кремнезема, его содержание выросло до 56,4 %, отмечены высокие содержания оксидов алюминия и кремния. Железо, очевидно, в значительной степени было извлечено в раствор на стадии водного выщелачивания.

Таблица 1

Химический состав экспериментальных образцов

Компонент	Пески (100 мкм)	Обожженная смесь	Остаток выщелачивания
SiO_2	39,71	10,19	56,38
TiO_2	1,83	0,70	1,39
Al_2O_3	12,21	3,27	12,62
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	14,61	4,09	6,88
Fe_2O_3	4,67	4,72	3,50
FeO	6,81	1,02	5,71
MnO	0,16	0,06	0,18
CaO	6,51	2,77	8,66
MgO	3,94	1,21	5,16
K_2O	1,06	0,27	1,01
Na_2O	2,12	0,44	2,89
P_2O_5	0,44	0,37	0,14
SrO	<0,1	<0,1	<0,1
F	0,10	0,09	0,08
S	1,54	–	0,34
H_2O	3,72	4,03	1,04
CuO	0,28	0,052	0,011
NiO	0,41	0,018	0,030
CoO	0,009	0,0027	0,003
ппп	10,51	>50	2,39

В процессе обжига техногенных песков в смеси с сульфатом аммония были получены следующие результаты. Значительное увеличение извлечения никеля отмечено при температуре 300 °С и соотношении сырья и сульфата 1:5, в раствор при указанных параметрах извлечено 64,3 % никеля (рис. 3). Максимальное извлечение металлов было достигнуто при температуре 400 °С и соотношении 1:3, извлечение никеля составило 73,2 %, меди – 71,6 %. Повышение температуры обжига выше 400 °С не приводило к значительному увеличению извлечения металлов. Вероятно, это связано с чрезмерным разложением реагента при более высокой температуре обжига.

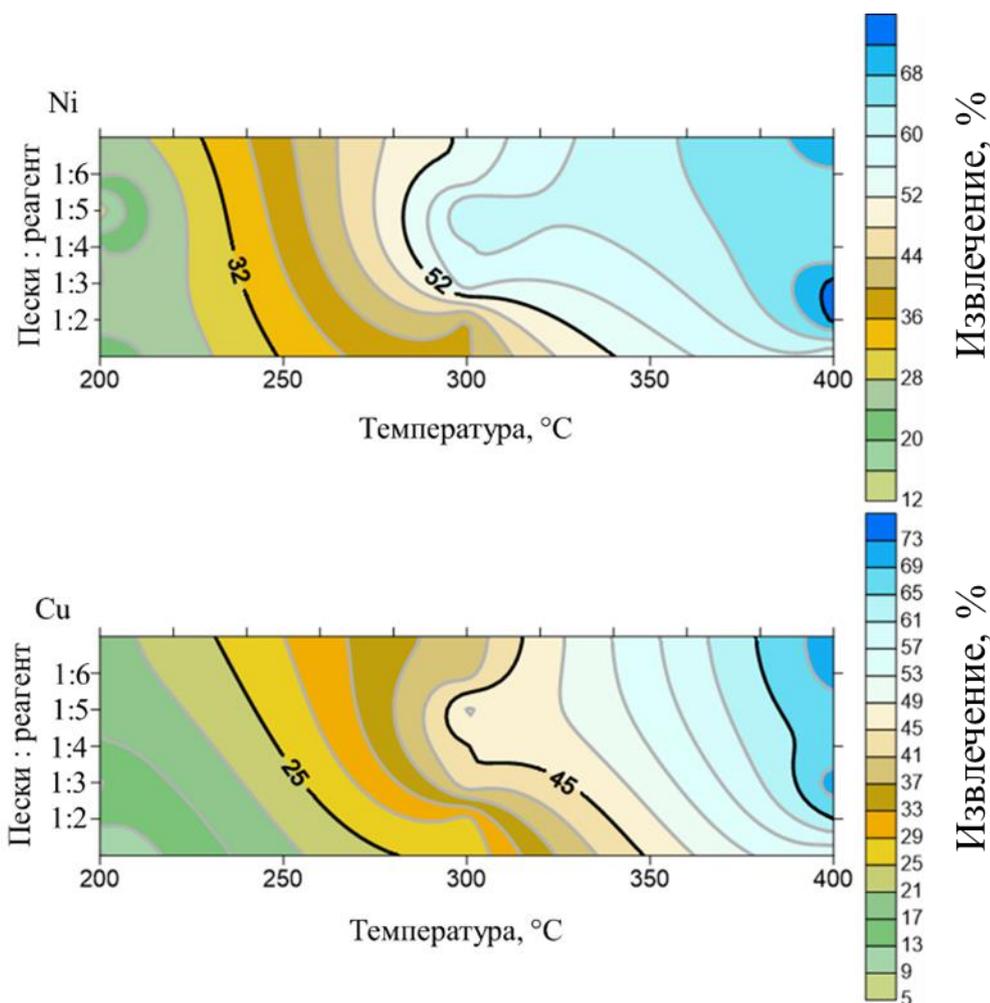


Рис. 3. Извлечение никеля и меди из обожженной смеси песков и сульфата аммония на стадии водного выщелачивания

Получаемый после водного выщелачивания продуктивный раствор может быть переработан по трехстадийной схеме. На первой стадии целесообразно извлекать медь, для этого перспективны методы, эффективные при низкой концентрации металла в растворе, например, методы цементации и гальванокоагуляции. По данным Б.Д. Халезова [12], цементация на железе – самый распространенный способ извлечения меди при небольших масштабах производства из слабо концентрированных сульфатных растворов, что актуально при переработке отходов и руд маломощных месторождений. Авторами [13] исследована перспективность использования метода гальванокоагуляции для извлечения меди из раствора. Методом гальванокоагуляции авторам удалось за две минуты взаимодействия извлечь 92 % меди из однокомпонентных сульфатных растворов с исходной концентрацией меди от 50 до 500 мг/л.

Цементационное получение меди будет приводить к повышенным концентрациям железа в растворе. Поэтому перед получением никеля требуется осадить железо. Этого можно достичь посредством повышения значения pH раствора, осажая железо в виде гидроксида, ярозита или гетита. Получение никеля возможно путем последующего повышения значения pH, осажая гидроксид никеля в виде товарного порошка. Раствор после кондиционирования может быть возвращен в технологический цикл.

Утилизация отходов является важной составляющей технологического производства. В схеме переработки техногенных песков методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония отходы представлены газовой фазой, образующейся на стадии обжига, и остатками, образующимися после водного выщелачивания смеси. Для

безопасной утилизации газов предполагается их улавливание. Улавливание газов позволит не только сократить негативное воздействие на атмосферный воздух, что чрезвычайно актуально для регионов Крайнего Севера, но также и регенерировать $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Поскольку остаток после выщелачивания характеризуется преобладанием ангидрита с примесью силикатов, то целесообразно рассмотреть возможность его использования в строительной отрасли.

Заключение

Проведенные исследования показали перспективность использования технологии низкотемпературного обжига для переработки техногенных песков Норильского промышленного района. Из класса -100 мкм было извлечено более 70 % цветных металлов, что превышает текущие показатели обогащения руды, например, на предприятии АО «Кольская ГМК». Преимуществом рассмотренного подхода является отсутствие необходимости измельчения сырья, что позволит снизить затраты на производство цветных металлов. Процесс низкотемпературного обжига медно-никелевого сырья с сульфатом аммония в целом перспективен для переработки вкрапленных труднообогатимых руд и техногенного сырья. Экономическая привлекательность обусловлена высоким уровнем извлечения металлов при температуре обжига 400 °С, что значительно ниже по сравнению с температурой традиционных пирометаллургических процессов. Отличительной особенностью технологии является возможность регенерации реагента. Состав отходящих в процессе обжига газов позволит осуществлять регенерацию сульфата аммония, не только снижая затраты на покупку реагента, но и минимизируя негативное воздействие на состояние окружающей природной среды.

Благодарности: Автор благодарит д.т.н. Макарова Д.В. за ценные консультации, к.г.-м.н. Компанченко А.А. за проведение анализа методом сканирующей электронной микроскопии, а также сотрудников ЦКП ИППЭС КНЦ РАН за определение концентрации металлов в растворе.

Список литературы

1. Колотырин К.П., 2017. Повышение эффективности управления отходами горнодобывающей промышленности на основе государственно-частного партнерства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 144-150. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-144-150
2. Макаров В.Н., Васильева Т.Н., Макаров Д.В., Алкацева А.А., Фарвазова Е.Р., Нестеров Д.П., Лащук В.В., 2005. Потенциальная экологическая опасность выведенных из эксплуатации хранилищ хвостов обогащения медно-никелевых руд. *Химия в интересах устойчивого развития*, Т. 13, № 1, С. 85-93.
3. Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Мардарь И.И., Иванов Б.С., 2013. Извлечение благородных и цветных металлов из техногенного сырья Норильского промышленного региона: практика и исследования. *Успехи современного естествознания*, № 3, С. 143-145.
4. Горячев А.А., 2024. Обоснование и разработка термогидрохимической технологии переработки медно-никелевых руд и техногенных продуктов с использованием сульфата аммония: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 25 с.
5. Ju J., Feng, Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B., 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, V. 457, P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197
6. Li J., Li Y., Duan H., Guo X., Zhai Y. 2018. Experimental and kinetic study of magnesium extraction and leaching from laterite nickel ore by roasting with ammonium

sulfate. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, V. 59, P. 596-604 DOI: 10.3103/S1067821218060123

7. Cui F., Mu W., Zhai Y., Guo X., 2020. The selective chlorination of nickel and copper from low-grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics. *Separation and Purification Technology*, V. 239, P. 116577. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116577

8. Xu Y. J., Xin H.X., Duan H.M., Li Y.D., Wu Y., Lin J., Zhai Y.C., 2022. Reaction behavior of silicon-rich diasporic bauxite with ammonium sulfate during roasting. *Journal of Central South University*, V. 29, No. 1, P. 22-31.

9. Sun Y., Shen X.Y., Zhai Y.C., 2015. Thermodynamics and kinetics of extracting zinc from zinc oxide ore by the ammonium sulfate roasting method. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, V. 22, P. 467-475. DOI:10.1007/s12613-015-1095-x

10. Deng L., Qu B., Su S.J., Ding S.L., Sun W.Y., 2018. Extraction of iron and manganese from pyrolusite absorption residue by ammonium sulphate roasting-leaching process. *Metals*, V. 8, No. 1, P. 38. DOI: 10.3390/met8010038

11. Ju J., Feng Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B., 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, V. 457, P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197

12. Халезов Б.Д., Ватолин Н.А., Макурин Ю.Н., Быков Н.А., 2005. Исследование извлечения меди в барабанном цементаторе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5, С. 302-311.

13. Орехова Н.Н., 2009. Исследование метода гальванокоагуляции для селективного извлечения меди и цинка из растворов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, Т. 14, № 12, С. 202-209.

References

1. Kolotyryn K.P., 2017. Povyshenie effektivnosti upravleniya otkhodami gornodobyvayushchei promyshlennosti na osnove gosudarstvenno-chastnogo partnerstva . [Enhancement of waste management in the mining industry based on the public-private partnership]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, № 11, P. 144-150. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-144-150

2. Makarov V.N., Vasil'eva T.N., Makarov D.V., Alkatseva A.A., Farvazova E.R., Nesterov D.P., Lashchuk V.V., 2005. Potentsial'naia ekologicheskaya opasnost' vyvedennykh iz ekspluatatsii khranilishch khvostov obogashcheniya medno-nikelevykh rud [Potential environmental hazards of decommissioned copper-nickel ore tailings storage facilities]. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*, Vol. 13, № 1, P. 85-93.

3. Boduen A.Ya., Petrov G.V., Mardar' I.I., Ivanov B.S., 2013. Izvlechenie blagorodnykh i tsvetnykh metallov iz tekhnogennogo syr'ya Noril'skogo promyshlennogo regiona: praktika i issledovaniya [Recovery of precious and non-ferrous metals from man-made raw materials of the Norilsk industrial region: practice and research]. *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*, № 3, P. 143-145.

4. Goryachev A.A., 2024. Obosnovanie i razrabotka termogidrokhimicheskoi tekhnologii pererabotki medno-nikelevykh rud i tekhnogennykh produktov s ispol'zovaniem sul'fata ammoniya [Justification and development of thermohydrochemical technology for processing copper-nickel ores and technogenic products using ammonium sulfate]: avtoref. dis. ... kand. tekh. nauk. Moscow, 25 p.

5. Ju J., Feng Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B., 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, V. 457, P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197

6. Li J., Li Y., Duan H., Guo X., Zhai Y. 2018. Experimental and kinetic study of magnesium extraction and leaching from laterite nickel ore by roasting with ammonium

sulfate. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, V. 59, P. 596-604 DOI: 10.3103/S1067821218060123

7. Cui F., Mu W., Zhai Y., Guo X., 2020. The selective chlorination of nickel and copper from low-grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics. Separation and Purification Technology. V. 239, P. 116577. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116577

8. Xu Y. J., Xin H. X., Duan H. M., Li Y. D., Wu Y., Lin J., Zhai Y. C., 2022. Reaction behavior of silicon-rich diasporic bauxite with ammonium sulfate during roasting. Journal of Central South University, V. 29, No. 1, P. 22-31.

9. Sun Y., Shen X.Y., Zhai Y.C., 2015. Thermodynamics and kinetics of extracting zinc from zinc oxide ore by the ammonium sulfate roasting method International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, V. 22, P. 467-475. DOI:10.1007/s12613-015-1095-x

10. Deng L., Qu B., Su S. J., Ding S. L., Sun W. Y., 2018. Extraction of iron and manganese from pyrolusite absorption residue by ammonium sulphate roasting-leaching process. Metals, V. 8, No. 1, P. 38. DOI: 10.3390/met8010038

11. Ju J., Feng Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B., 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. Chemical Engineering Journal, V. 457, P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197

12. Khalezov B.D., Vatolin N.A., Makurin Yu.N., Bykov N.A., 2005. Issledovanie izvlecheniya medi v barabannom tsementatore [Study of copper recovery in drum cementer]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 5, P. 302-311.

13. Orekhova N.N., 2009. Issledovanie metoda gal'vanokoagulyatsii dlya selektivnogo izvlecheniya medi i tsinka iz rastvorov [Study of the galvanocoagulation method for the selective extraction of copper and zinc from solutions]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', Vol. 14, № 12, P. 202-209.