

УДК 622.78(470.21)

## Переработка руды месторождения Нюд II методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония

А. А. Горячев\*, Д. В. Макаров, С. С. Потапов,  
А. Т. Беляевский, В. В. Семушин, А. А. Компанченко

*\*Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики  
КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;  
e-mail: a.goryachev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>*

### Информация о статье

Поступила  
в редакцию  
26.01.2023;  
получена  
после доработки  
02.03.2023;  
принята к публикации  
16.03.2023

### Ключевые слова:

медно-никелевые руды,  
низкотемпературный  
обжиг, сульфат  
аммония,  
месторождение Нюд II,  
выщелачивание,  
цветные металлы

### Для цитирования

### Реферат

Мурманская область располагает значительным объемом сульфидного медно-никелевого сырья. Перспективными для переработки являются месторождения массива Нюд, связанные с Мончеплутоном (Нюд II и Терраса). В качестве объекта исследования выбрана забалансовая руда месторождения Нюд II с исходным содержанием никеля 0,45 % и меди 0,39 %. В процессе исследования руду смешивали с сульфатом аммония, измельчали и обжигали полученную смесь в муфельной печи в статической атмосфере воздуха. Обоженную смесь выщелачивали в подогретой дистиллированной воде при постоянном перемешивании. Максимальное извлечение металлов достигается при измельчении до класса –40 мкм, соотношении руды и сульфата аммония 1 : 7, температуре обжига 400 °С, продолжительности обжига 300 мин. В обожженной при данных параметрах смеси в ходе рентгенофазового анализа фиксируются рефлексы сульфатов меди и никеля. На стадии водного выщелачивания максимальное извлечение никеля составило 79,1 %, меди – 75,8 %.

Горячев А. А. и др. Переработка руды месторождения Нюд II методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 137–149. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-137-149

## Processing of ore from the Nud II deposit by the method of low-temperature roasting with ammonium sulfate

Andrey A. Goryachev\*, Dmitriy V. Makarov, Sergey S. Potapov,  
Aleksandr T. Belyaevskiy, Vasilii V. Semushin, Alena A. Kompanchenko

*\*Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic FRC KSC RAS,  
Apatity, Murmansk region, Russia;  
e-mail: a.goryachev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>*

### Article info

Received  
26.01.2023;  
received  
in revised  
02.03.2023;  
accepted  
16.03.2023

### Key words:

copper-nickel ores,  
low-temperature roasting,  
ammonium sulfate,  
Nud II deposit,  
leaching,  
non-ferrous metals

### Abstract

The Murmansk region has a significant amount of sulfide copper-nickel raw materials. Deposits of the Nud massif associated with Monchepluton are promising for processing. The Nud II deposit cut-off grade ore with an initial Ni content of 0.45 % and Cu of 0.39 % has been chosen as the research object. During the research, the ore was mixed with ammonium sulfate, grinded, and the mixture was roasted in a muffle furnace with static air atmosphere. The roasted mixture was leached in heated distilled water with constant stirring. The maximum metals recovery was achieved when crushing to a fraction of –40 μm, the ratio of ore : ammonium sulfate is equal to 1 : 7, roasting temperature 400 °C, roasting duration 300 min. In the mixture roasted at these parameters, reflexes of copper and nickel sulfates were recorded by the x-ray phase analysis (XRD) method. At the stage of water leaching, the maximum recovery was: Ni – 79.1 %, Cu – 75.8 %.

### For citation

Goryachev, A. A. et al. 2023. Processing of ore from the Nud II deposit by the method of low-temperature roasting with ammonium sulfate. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 137–149. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-137-149

## Введение

Рост потребления цветных металлов обусловлен их востребованностью в базовых отраслях промышленности. Медь в чистом виде широко используется в электротехнике при производстве силовых кабелей; она является важным компонентом генераторов, трансформаторов, двигателей и систем возобновляемой энергетики. Этот металл применяется для изготовления систем связи, мобильных телефонов и персональных компьютеров, а также в строительной отрасли в ходе создания санитарно-технических систем (Кондратьев и др., 2019). Основная часть вырабатываемого никеля расходуется на производство жаропрочных, конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей, где никель применяется в качестве легирующего элемента; до 20 % никеля используется в производстве сплавов и суперсплавов совместно с железом, хромом, медью, цинком и другими металлами (Игневская, 2005). Значительную роль медь и никель играют в транспортной промышленности. Вследствие увеличения производства электротранспорта спрос на эти металлы существенно возрос. В 2022 г. отмечен значительный рост цен на медь и никель, так как их рыночные запасы находятся на многолетних минимумах. Кроме того, влияние на рост цен оказала геополитическая обстановка.

Авторы работы (Henckens et al., 2020) отмечают тенденцию роста производства меди и никеля и прогнозируют рост объема их производства более чем в 12 раз к 2100 г. В Российской Федерации активно разрабатываются сульфидные медно-никелевые месторождения, на долю которых приходится около 37 % мировых запасов никеля. Характерной особенностью сульфидных месторождений является относительно выдержанный минеральный состав руд. Главными рудными минералами являются пирротин, пентландит, халькопирит и магнетит. Среди второстепенных минералов характерны пирит, кубанит, миллерит, валлериит, минералы группы платины. Руды содержат никель, медь, кобальт, платиноиды, а также селен и теллур, золото, серебро и серу. Месторождения сульфидных руд являются ведущими в запасах и добыче никеля в России.

С Мурманской областью связаны значительные запасы медно-никелевого сырья природного и техногенного происхождения. В проведенных ранее исследованиях по обогащению руд большое внимание уделяется залежам массива Нюд, а именно месторождениям Нюд II и Терраса. Содержание никеля и меди в образцах руды ниже бортового, составляющего для никеля 0,55 % (Терновой и др., 2009). В этом случае эффективность традиционных способов обогащения существенно снижается. Для руд данных месторождений предложены схемы обогащения на основе кучного выщелачивания с применением растворов серной кислоты, а также бактериальных культур (Фокина и др., 2018; Masloboev et al., 2018).

Проведенные исследования указали на перспективность вовлечения забалансовых руд данных месторождений в переработку при создании альтернативных технологий обогащения. По этой причине для переработки руды выбран химический метод обогащения с использованием сульфата аммония, что обусловлено его высокой реакционной способностью и наличием в исходной руде сульфидов цветных металлов, механизм взаимодействия которых с сульфатом аммония был описан нами в предыдущих работах (Горячев и др., 2022). Технология низкотемпературного обжига сульфидного сырья с сульфатом аммония успешно применялась в мировой практике для различных видов сырья (Ju et al., 2023), например латеритных и сульфидных никелевых руд (Li et al., 2018; Cui et al., 2020), бокситовых (Xu et al., 2022), окисленных цинковых (Sun et al., 2015), марганцевых руд (Deng et al., 2018) и др. Технология апробирована ранее для руды отвала Аллареченского месторождения (Горячев и др., 2020) и черного медно-никелевого концентрата, полученного из руды месторождения Заполярное Печенгского рудного поля (Goryachev et al., 2021).

## Материалы и методы

Отбор проб руды месторождения Нюд II выполнен в летний период 2021 г. (рис. 1); руда взята с бортов карьера; среднее содержание Ni составляет 0,45 %, Cu – 0,39 %. Основными рудными минералами являются пирротин, пентландит, халькопирит, магнетит.

В ходе лабораторных исследований сульфидное сырье перемешивали с сульфатом аммония квалификации "химически чистый" (ГОСТ 3769-78) и измельчали полученную смесь в шаровой мельнице ВМУ-100 (HT Machinery Co. Ltd., КНР). После этого смесь обжигали в муфельной печи СНОЛ 3/11 (ООО "НПФ Термикс", Россия), варьируя температуру (300–500 °С) и продолжительность обжига (60–340 мин) в статической атмосфере воздуха. После обжига смесь охлаждали на открытом воздухе при температуре  $\approx 20$  °С в течение 60 мин. Затем обожженную смесь выщелачивали в подогретой до  $\approx 80$  °С дистиллированной воде в течение 40 мин при постоянном перемешивании интенсивностью 230 мин<sup>-1</sup>, используя верхнеприводную мешалку MV-6 (ООО "НВ-ЛАБ", Россия).

Для диагностики минерального состава экспериментальных проб был применен метод порошковой рентгеновской дифракции (CuK $\alpha$ -излучение, длина волны 0,154184 Å) на приборе ДРОН-2.0 (АО "ИЦ Буревестник", Россия). Расшифровка дифрактограмм выполнена с использованием эталонов сравнения картотеки рентгеновских данных JCPDS или ASTM. Определение морфологии и состава частиц руды произведено с помощью сканирующего цифрового электронного микроскопа с программным обеспечением

SEM Leo-420 (Carl Zeiss Ltd., Германия) и микросондовой приставки INKA ENERGY-400 (Oxford Instruments plc., Великобритания).



Рис. 1. Отработанный карьер месторождения Нюд II  
Fig. 1. Excavated quarry of the Nud II deposit

Концентрации ионов никеля, меди и железа в продуктивных растворах определены методом атомно-абсорбционной спектроскопии (Shimadzu-AA7000G, Shimadzu Corp., Япония) с электротермической атомизацией (ПНД Ф 14.1:2:4.140-98). Обработка результатов экспериментов произведена в программном продукте Microsoft Excel.

### Результаты и обсуждение

В исходном образце руды месторождения Нюд II с помощью метода РФА<sup>1</sup> обнаружено значительное количество рефлексов нерудных минералов: полевые шпаты, амфиболы, серпентины, тальк  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ , кварц  $SiO_2$ . Помимо нерудных минералов выявлены сульфиды: пентландит  $(Fe, Ni)_9S_8$ , пирротин  $Fe_{1-x}S_n$  и халькопирит  $CuFeS_2$  (рис. 2, а); зафиксированы рефлексы магнетита  $FeFe_2O_3$ . После перемешивания руды с сульфатом аммония на дифрактограмме отмечены рефлексы масканьита  $(NH_4)_2SO_4$ , являющегося природным аналогом данного соединения (рис. 2, б). После добавления сульфата аммония не зафиксированы рефлексы халькопирита и магнетита из-за снижения их относительного содержания в смеси. Остальные минералы, входящие в состав исходной руды, главным образом нерудные, диагностируются.

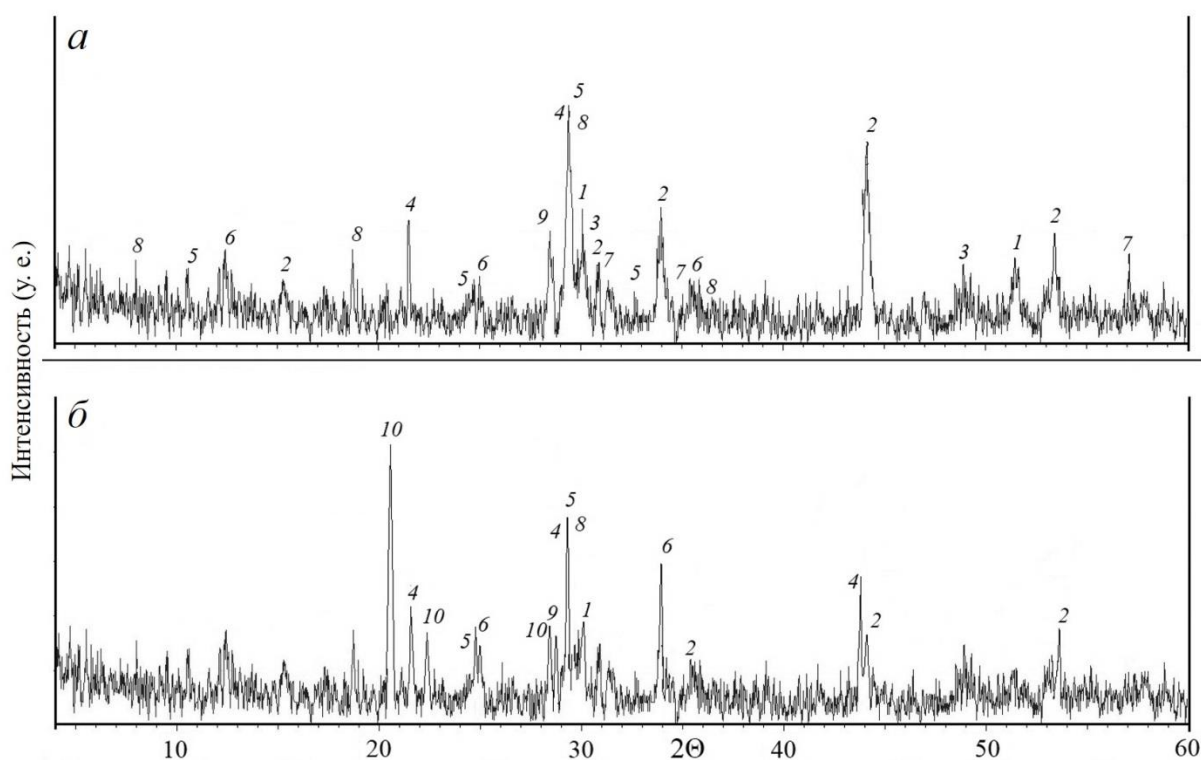


Рис. 2. Дифрактограммы руды месторождения Нюд II (а) и смеси руды с сульфатом аммония (б).

Рефлексы: 1 – пентландит; 2 – пирротин; 3 – халькопирит; 4 – полевой шпат; 5 – амфибол;  
6 – серпентин; 7 – магнетит; 8 – тальк; 9 – кварц; 10 – масканьит

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the Nud II deposit ore (a) and a mixture of ore with ammonium sulfate (b).

Reflexes: 1 – pentlandite; 2 – pyrrhotite; 3 – chalcopyrite; 4 – feldspar; 5 – amphibole;  
6 – serpentine; 7 – magnetite; 8 – talc; 9 – quartz; 10 – mascagnite

Электронный снимок образца исходной вкрапленной руды месторождения Нюд II представлен на рис. 3, где отмечены зерна, представляющие собой сростки практически всех минералов, определенных методом рентгенофазового анализа исходного образца руды. Вкрапленники представляют собой сростки сульфидов, содержащих в небольшом количестве примеси магнетита, который развивается по трещинам. Доминирующим минералом вкрапленников является пирротин, внутри которого развивается пентландит, образуя крупные зерна неправильной или округлой формы. Самостоятельные вкрапления пентландита встречаются редко, в противоположность халькопириту, вкрапленность которого обычно мономинеральная. В сульфидных сростках халькопирит встречается редко в виде линзовидных и прожилковых зерен. Размер

<sup>1</sup> РФА – рентгенофазовый анализ.

вкрапленников варьирует от 0,15 до 1,5 мм, но могут встречаться и более мелкие эмульсионные вкрапления в виде каплевидных и мелкоточечных зерен.

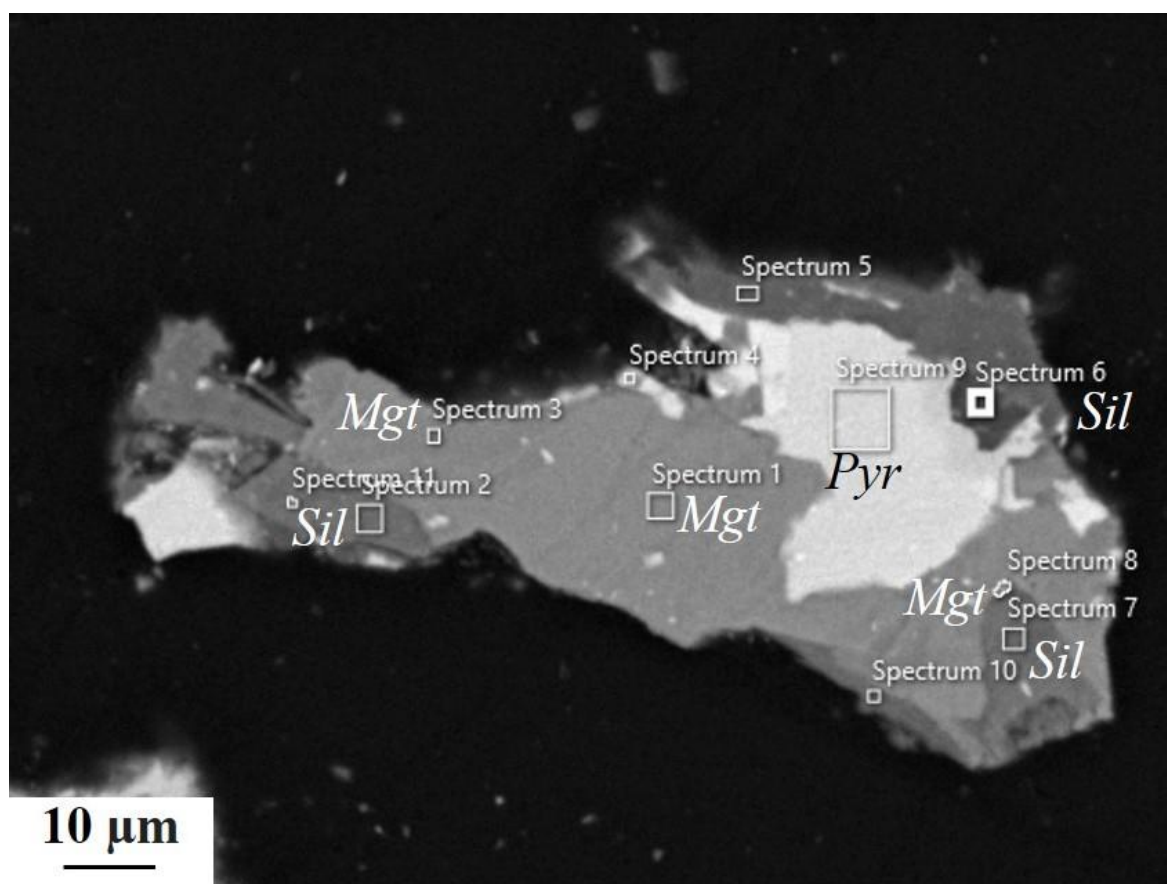
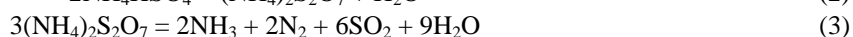


Рис. 3. СЭМ-изображение исходного образца руды месторождения Нюд II:  
*Mgt* – магнетит; *Pyr* – пирротин; *Sil* – силикаты  
 Fig. 3. SEM-image of the original ore sample from the Nud II deposit:  
*Mgt* – magnetite; *Pyr* – pyrrhotite; *Sil* – silicates

Для эффективного извлечения металлов из руды с высоким содержанием сростков требуется измельчение до тонких классов, что позволит обеспечить контакт сульфидных минералов с реагентом. Сульфиды вступают в реакцию как с расплавом сульфата аммония, так и с соединениями, образующимися при его разложении в процессе плавления [уравнения (1)–(3)]. В процессе нагрева сульфат аммония постепенно разлагается на смесь газов:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Стадии термического разложения выглядят следующим образом:



После обжига смеси руды с сульфатом аммония при соотношении 1 : 7 и температуре 300 °С на дифрактограмме фиксируются рефлексы масканьита, что указывает на его неполное разложение при данной температуре (рис. 4, а). В обожженной смеси также отмечены рефлексы всех исходных сульфидов. После обжига появляются фазы сульфата железа – сабиита  $(\text{NH}_4)\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ , зафиксированы гидроксид-железистые фазы – гетит  $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$  и аммониярозит  $(\text{NH}_4)(\text{Fe})_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ . В остатке после выщелачивания из исходных сульфидов остаются рефлексы пирротина (рис. 4, б). Остаток характеризуется преобладанием рефлексов талька.

После обжига при температуре 350 °С в смеси отмечены рефлексы сульфата никеля  $\text{NiSO}_4$  (рис. 5, а). Масканьит при данной температуре полностью расходуется. Из исходных сульфидов были зафиксированы рефлексы пирротина. Остаток после выщелачивания характеризуется значительным количеством рефлексов гетита (рис. 5, б). Пирротин также остается в остатке.

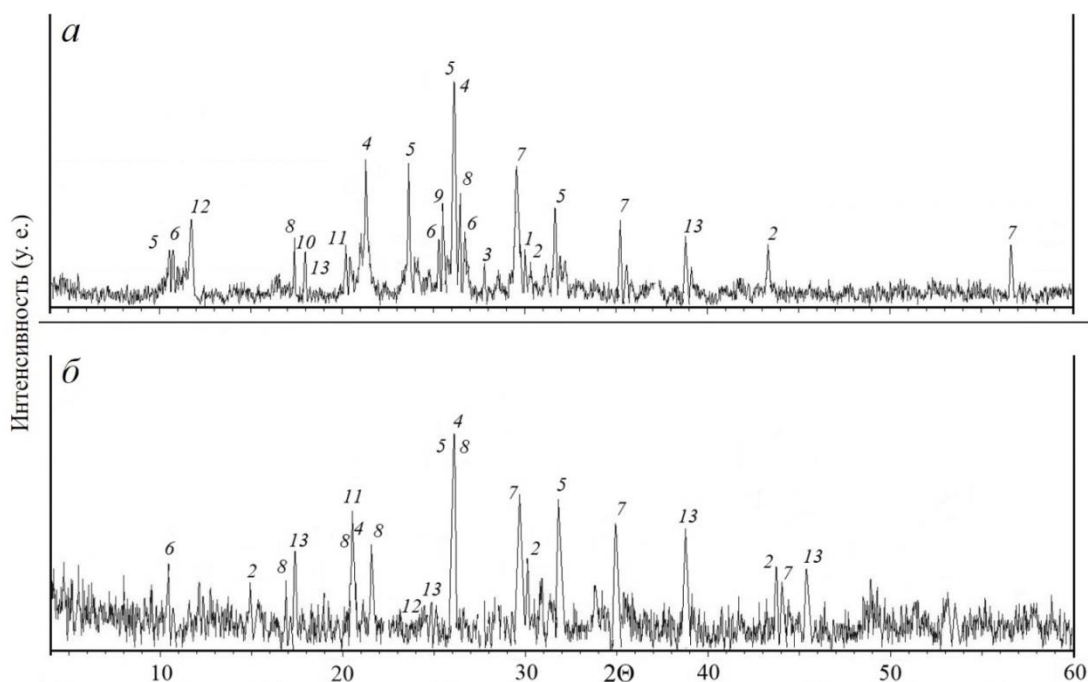


Рис. 4. Дифрактограммы смеси руды и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 300 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – пентландит; 2 – пирротин; 3 – халькопирит; 4 – полевоы шпат; 5 – амфибол; 6 – серпентин; 7 – магнетит; 8 – тальк; 9 – кварц; 10 – масканьит; 11 – гетит; 12 – сабиит; 13 – аммониярозит  
 Fig. 4. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 300 °C (a) and of the leaching residue (б). Reflexes: 1 – pentlandite; 2 – pyrrhotite; 3 – chalcopyrite; 4 – feldspar; 5 – amphibole; 6 – serpentine; 7 – magnetite; 8 – talc; 9 – quartz; 10 – mascaignite; 11 – goethite; 12 – sabiite; 13 – ammoniojarosite

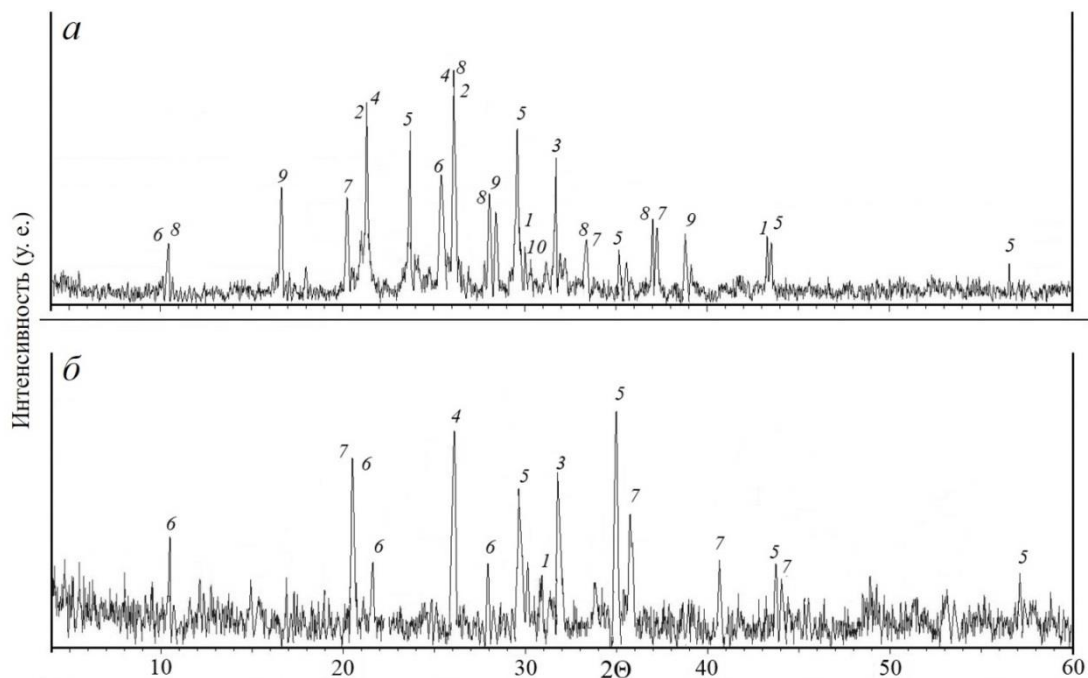


Рис. 5. Дифрактограммы смеси руды и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 350 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – пирротин; 2 – полевоы шпат; 3 – амфибол; 4 – серпентин; 5 – магнетит; 6 – тальк; 7 – гетит; 8 – сабиит; 9 – аммониярозит; 10 – сульфат никеля  
 Fig. 5. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 350 °C (a) and of the leaching residue (б). Reflexes: 1 – pyrrhotite; 2 – feldspar; 3 – amphibole; 4 – serpentine; 5 – magnetite; 6 – talc; 7 – goethite; 8 – sabiite; 9 – ammoniojarosite; 10 – nickel sulfate

После обжига смеси руды с сульфатом аммония при 400 °С в обожженной смеси фиксируются рефлексы сульфатов никеля и меди CuSO<sub>4</sub> (рис. 6, а). Повышение температуры обжига до 400 °С приводит к увеличению интенсивности пиков сульфатных минералов. Остаток после выщелачивания характеризуется наличием силикатных минералов и магнетита, отмечена некоторая часть непрореагировавших сульфидов (рис. 6, б). Сульфаты, образованные в процессе обжига, полностью растворяются на стадии водного выщелачивания.

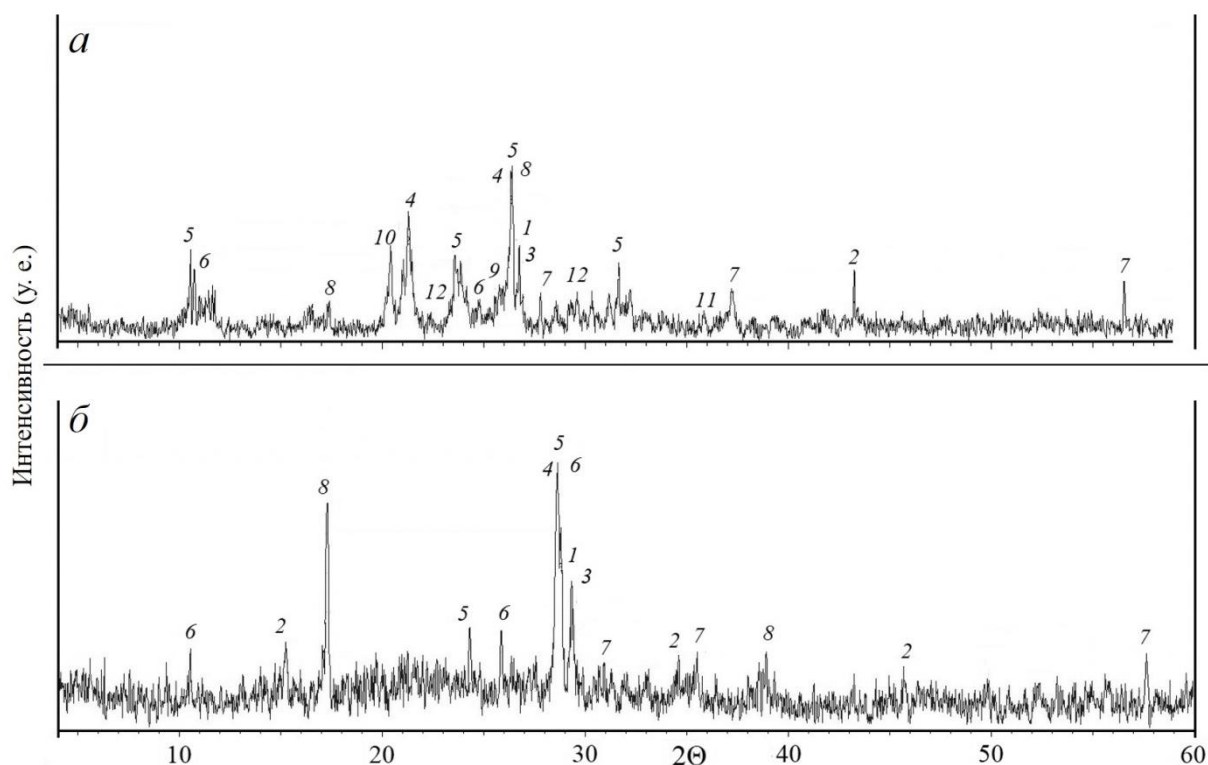
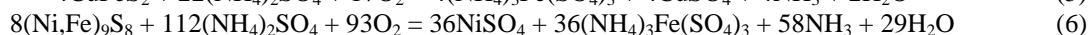
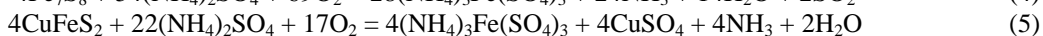


Рис. 6. Дифрактограммы смеси руды и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 400 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – пентландит; 2 – пирротин; 3 – халькопирит; 4 – полевоы шпат; 5 – амфибол; 6 – серпентин; 7 – магнетит; 8 – тальк; 9 – кварц; 10 – гетит; 11 – халькоцианит; 12 – сульфат никеля  
 Fig. 6. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 400 °С (а) and of the leaching residue (б). Reflexes: 1 – pentlandite; 2 – pyrrhotite; 3 – chalcopyrite; 4 – feldspar; 5 – amphibole; 6 – serpentine; 7 – magnetite; 8 – talc; 9 – quartz; 10 – goethite; 11 – chalcocyanite; 12 – sulfate nickel

Исследования, направленные на определение механизма взаимодействия сульфидов с сульфатом аммония с применением метода синхронного термического анализа, были выполнены ранее (Горячев и др., 2022). В ходе изучения установлено, что взаимодействие сопровождается образованием аммонийсодержащих сульфатов железа, таких как пиракмонит (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и сабиит NH<sub>4</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, а также вторичных обогащенных цветными металлами сульфидов никеля и меди: краунингшилдит (Ni<sub>0.9</sub>Fe<sub>0.10</sub>)S, полимидит Ni<sub>3</sub>S<sub>4</sub>, борнит Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>, фукучилит Cu<sub>3</sub>FeS<sub>8</sub>, ковеллин CuS. Конечным продуктом взаимодействия являются сульфаты никеля и меди. Упрощенные схемы реакций можно представить следующими уравнениями:



После обжига при температуре 450 °С не отмечено рефлексов исходных сульфидных минералов. Обожженная смесь характеризуется преобладанием рефлексов серпентина, полевого шпата и амфибола; зафиксировано интенсивное формирование сульфатов цветных металлов (рис. 7, а). Образованные в процессе обжига сульфаты железа и цветных металлов полностью растворяются, и остаток характеризуется увеличением относительного содержания магнетита (рис. 7, б).

После обжига при температуре 500 °С отмечено более интенсивное формирование сульфата меди – халькоцианита (рис. 8, а); зафиксированы пики железосодержащих фаз: гетита, сабиита, аммонийрозита и магнетита. В остатке после выщелачивания в значительном количестве остаются инертные минералы (полевоы шпат, амфибол, серпентин), увеличивается доля магнетита (рис. 8, б).

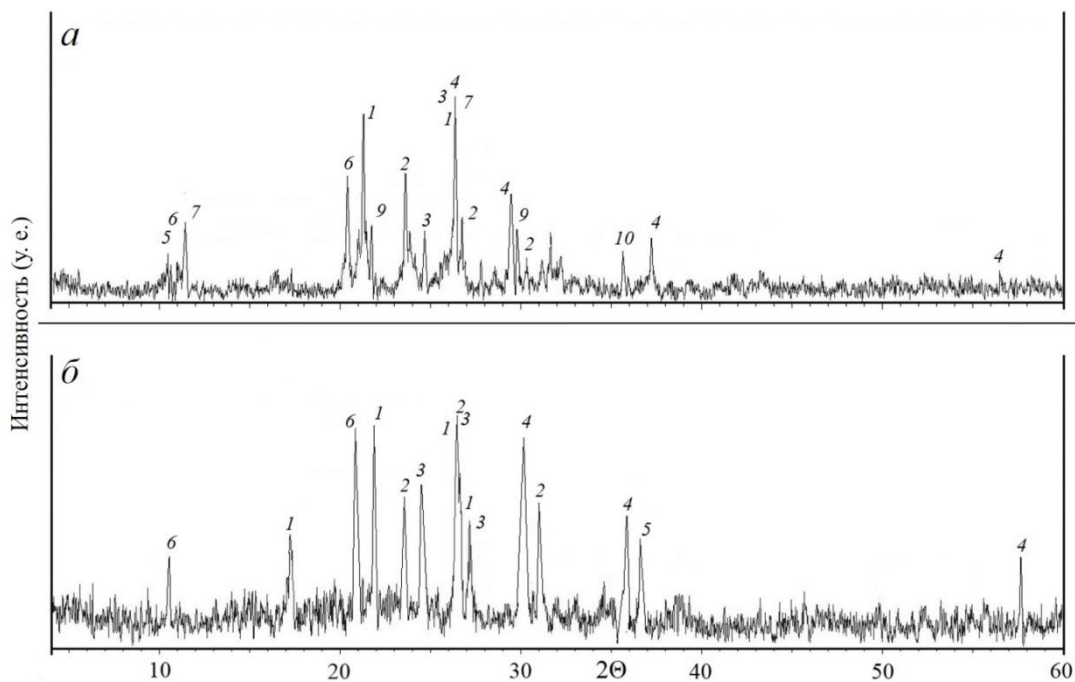


Рис. 7. Дифрактограммы смеси руды и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 450 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – полевошпатовый шпат; 2 – амфибол; 3 – серпентин; 4 – магнетит; 5 – тальк; 6 – гетит; 7 – сабиит; 8 – аммонийорозит; 9 – сульфат никеля; 10 – халькоцианит  
 Fig. 7. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 450 °C (a) and of the leaching residue (b). Reflexes: 1 – feldspar; 2 – amphibole; 3 – serpentine; 4 – magnetite; 5 – talc; 6 – goethite; 7 – sabiite; 8 – ammoniojarosite; 9 – nickel sulfate; 10 – chalcocyanite

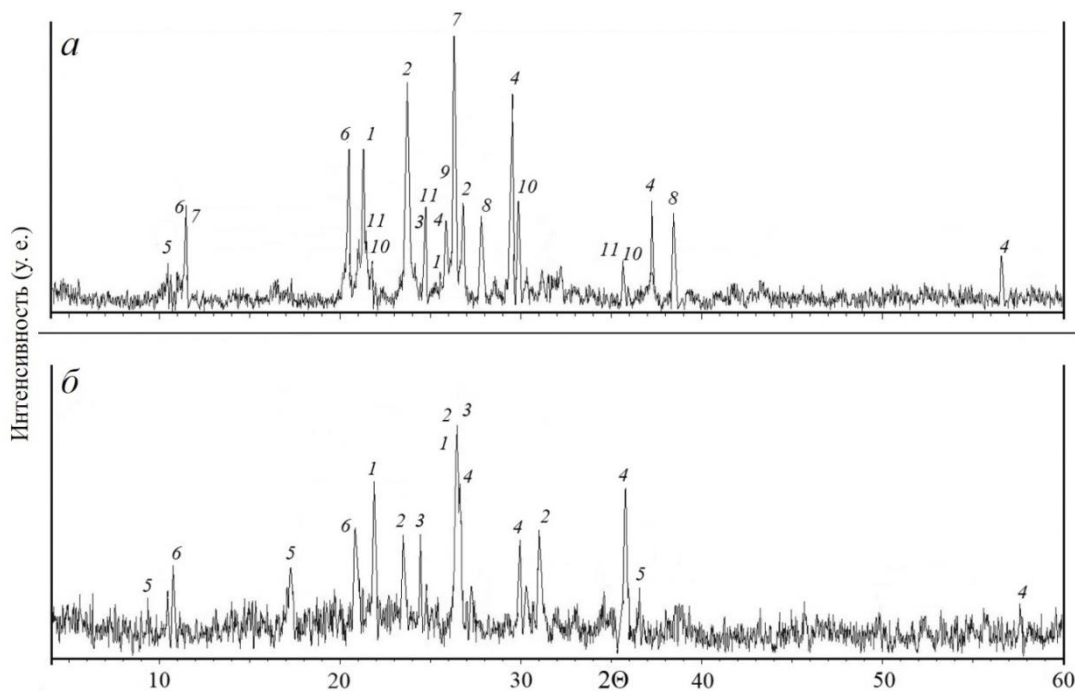


Рис. 8. Дифрактограммы смеси руды месторождения Ньюд II и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 500 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – полевошпатовый шпат; 2 – амфибол; 3 – серпентин; 4 – магнетит; 5 – тальк; 6 – гетит; 7 – сабиит; 8 – аммонийорозит; 9 – кварц; 10 – сульфат никеля; 11 – халькоцианит  
 Fig. 8. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 500 °C (a) and of the leaching residue (b). Reflexes: 1 – feldspar; 2 – amphibole; 3 – serpentine; 4 – magnetite; 5 – talc; 6 – goethite; 7 – sabiite; 8 – ammoniojarosite; 9 – quartz; 10 – nickel sulfate; 11 – chalcocyanite



Дальнейшее повышение температуры будет приводить к снижению количества реагента, участвующего в реакции, а также к образованию оксидов металлов. Это, вероятно, помимо увеличения энергозатрат, приведет к снижению извлечения при последующем водном выщелачивании.

Морфология частиц исходной руды месторождения Ньюд II, смеси руды с сульфатом аммония, обожженной смеси и остатка после выщелачивания показана на рис. 9. Частицы руды после измельчения характеризуются оскольчатой формой (рис. 9, а), что обеспечивает наилучший контакт с реагентом в процессе смешивания и последующего обжига. На рис. 9, б показаны изображения поверхности минеральных зерен в смеси с сульфатом аммония. Измельчение в шаровой мельнице позволяет раскрыть зерна и сростки минералов и, как следствие, обеспечить их контакт с реагентом. На рис. 9, в представлена поверхность частиц после обжига руды с сульфатом аммония при соотношении 1 : 7. Анализ микроснимков обожженной смеси позволяет говорить о высокой интенсивности взаимодействия частиц руды с сульфатом аммония, так как практически все исходные частицы покрыты сульфатной коркой после обжига. На частицах остатка после выщелачивания сульфатная корка отсутствует. Для поверхности частиц остатка после выщелачивания характерно появление трещиноватости (рис. 9, г).

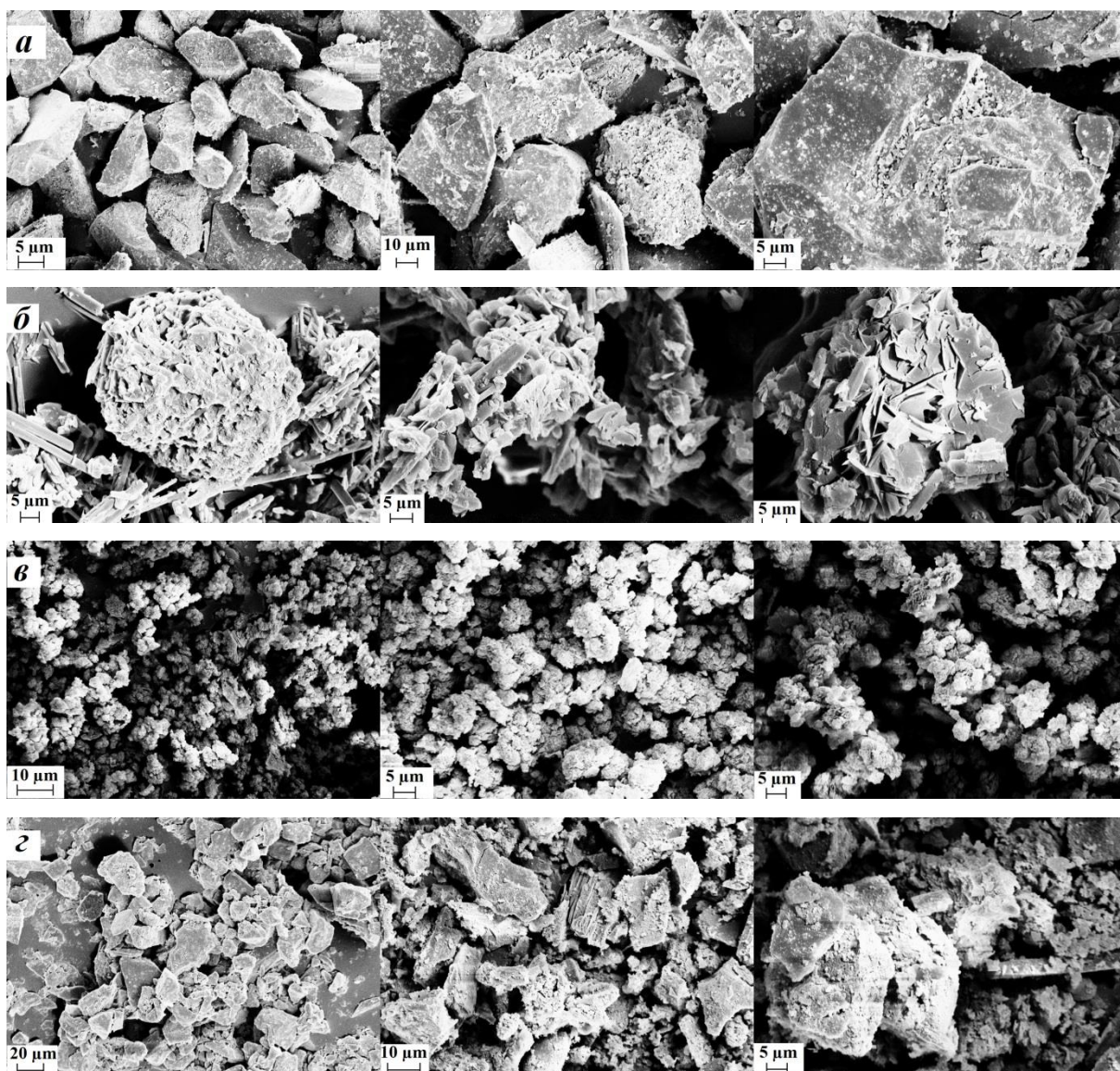


Рис. 9. СЭМ-изображения габитуса частиц руды Ньюд II (а), смеси руды с сульфатом аммония (б), обожженной при 400 °С смеси (в), остатка после выщелачивания обожженной смеси (г)

Fig. 9. SEM images of the particle surface of (a) Nud II ore, (б) mixture of ore with ammonium sulfate, (в) mixture roasted at 400 °C, (г) residue after roasted mixture leaching

В процессе обжига смеси руды (частицы крупностью –100 мкм) с сульфатом аммония при соотношении 1 : 2 установлено, что с увеличением температуры и продолжительности обжига извлечение металлов

при последующем выщелачивании возрастало (рис. 10, а и б). Наименьшее извлечение металлов отмечено при температуре обжига 300 °С и продолжительности 60 мин, никеля извлечено 3,6 %, меди – 3,5 %. Существенное увеличение извлечения никеля отмечено при температуре 400 °С и продолжительности 240 мин – 33,6 %. Максимальный уровень извлечения металлов отмечен при температуре 500 °С, однако отличия от извлечений при температуре 400 °С незначительны.

Учитывая резкий рост извлечений после обжига смеси при 400 °С, целесообразно рассмотреть способы интенсификации перехода металлов в водорастворимую форму при данной температуре и продолжительности 240 мин. Увеличение расхода сульфата аммония привело к более интенсивному извлечению металлов в раствор (рис. 10, в и г). При соотношении 1 : 7 к концу эксперимента извлечено 52,1 % меди и 56,7 % никеля. Для более значительного повышения извлечения металлов смесь перед обжигом измельчали до более тонких классов. Извлечения обоих металлов возрастали по мере увеличения степени измельчения сырья, подаваемого на обжиг. Из класса –40 мкм извлечено 73,5 % никеля и 72,1 % меди. Для повышения извлечения металлов увеличили продолжительность обжига. После обжига при температуре 400 °С в течение 300 мин в раствор удалось извлечь 79,1 % никеля и 75,8 % меди; дальнейшее увеличение времени обжига не приводило к увеличению извлечения металлов при данной крупности частиц и расходе реагента.

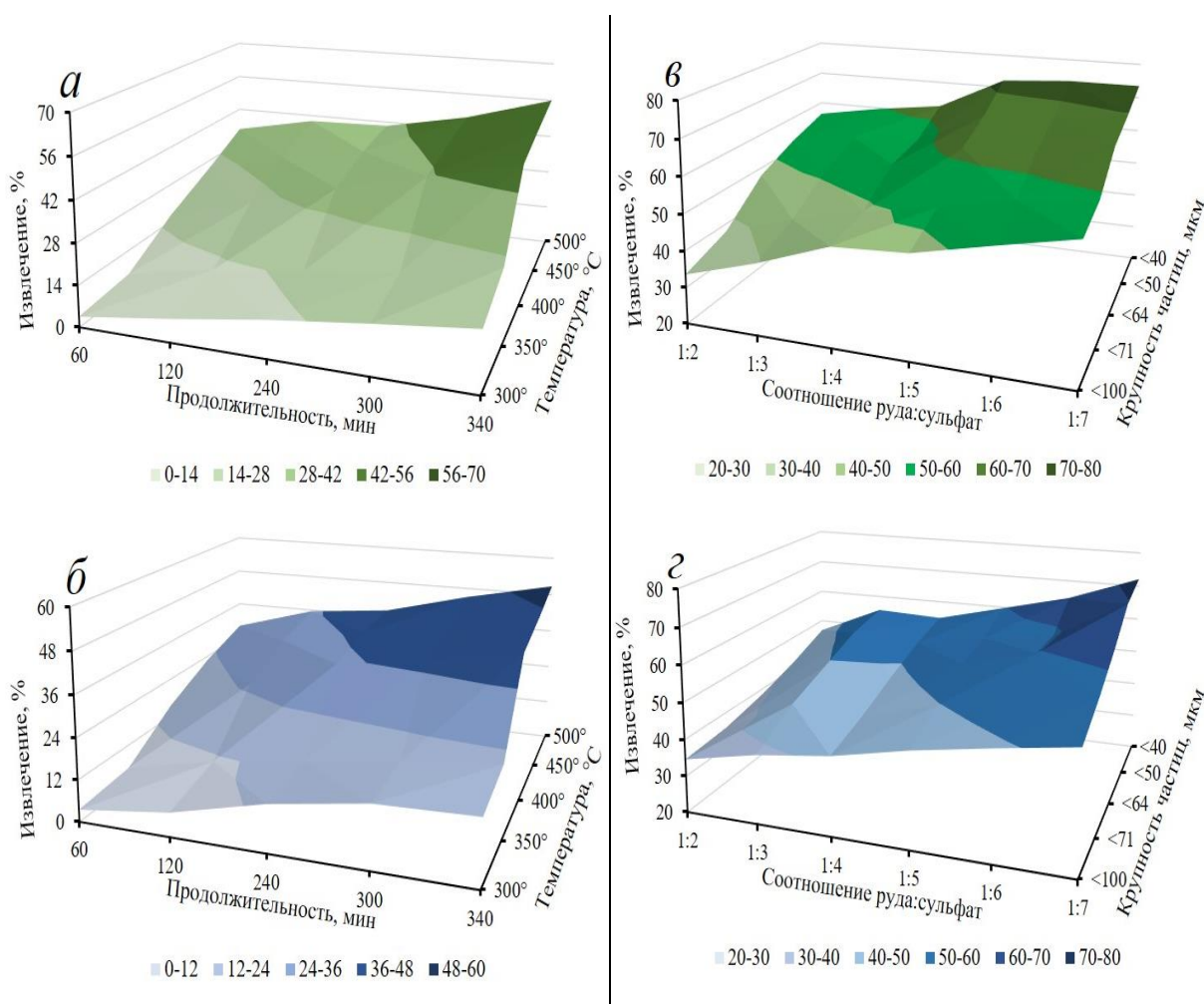


Рис. 10. Извлечение никеля (а) и меди (б) в раствор при различных продолжительности и температуре обжига; извлечение никеля (в) и меди (г) при различных расходе сульфата аммония и крупности частиц смеси  
 Fig. 10. Recovery of nickel (а) and copper (б) into the solution at different duration and roasting temperature, recovery of nickel (в) and copper (г) at different consumption of ammonium sulfate and particle size of the mixture

### **Заключение**

Проведенные лабораторные исследования позволили определить оптимальные параметры процесса низкотемпературного обжига руды месторождения Нюд II в смеси с сульфатом аммония: соотношение руды и сульфата аммония равно 1 : 7; крупность частиц обжигаемого сырья составляет –40 мкм; температура обжига 400 °С, время 300 мин. При данных параметрах извлечение цветных металлов в раствор в ходе последующего водного выщелачивания обожженной смеси в подогретой до ≈80 °С дистиллированной воде в течение 40 мин при постоянном перемешивании с интенсивностью 230 мин<sup>-1</sup> составляет 79,1 % никеля и 75,8 % меди. Для переработки продуктивных растворов предлагается схема последовательного выделения металлов, при которой на первой стадии методом цементации осаждается медь, на второй стадии производится повышение pH до значения, способствующего выпадению железа в осадок, на третьей стадии дальнейшим повышением значения pH из раствора извлекаются товарные гидроксиды никеля и кобальта.

Извлечения металлов, полученные при переработке руды месторождения Нюд II, ниже по сравнению с извлечениями из чернового медно-никелевого концентрата и руды Аллареченского техногенного месторождения, исследования по которым проводились ранее. Это связано как со значительным преобладанием инертных минералов в исходной руде, что затрудняет контакт сульфата аммония с сульфидными зёрнами в процессе обжига, так и с низким исходным содержанием цветных металлов. Таким образом, возникает необходимость продолжить исследования процесса низкотемпературного обжига руды месторождения Нюд II, направленные на поиск путей повышения извлечения из нее цветных металлов.

### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках тем НИР № 122022400093-9 и 1021051803684-1. Авторы благодарны Е. Д. Зенович и Н. В. Паршиной (Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс) за выполнение рентгенофазового анализа.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Горячев А. А., Беляевский А. Т., Макаров Д. В., Потапов С. С. [и др.]. Переработка медно-никелевых руд посредством низкотемпературного обжига в смеси с сульфатом аммония // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022. Т. 58, № 3. С. 447–455. DOI: <https://doi.org/10.15372/ftprgi20220312>. EDN: TWKRSL.
- Горячев А. А., Макаров Д. В., Беляевский А. Т. Низкотемпературный обжиг медно-никелевых руд с сульфатом аммония как перспективный способ переработки такого сырья // *Минералогия техногенеза*. 2020. № 21. С. 144–151. EDN: YNPLSL.
- Игrevская Л. В. Россия на мировом рынке никеля // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2005. № 4. С. 67–71. EDN: PKAWIJ.
- Кондратьев В. Б., Попов В. В., Кедрова Г. В. Глобальный рынок меди (продолжение) // *Горная промышленность*. 2019. № 4(146). С. 100–101. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-4-100-101. EDN: WJXCXVV.
- Терновой В. В., Самойленко А. И., Царакон О. И. Обоснование минимального промышленного содержания полезного компонента для месторождений комплексного минерального сырья // *Записки Горного института*. 2009. Т. 184. С. 94–98. EDN: RENRMV.
- Фокина Н. В., Янишевская Е. С., Светлов А. В., Горячев А. А. Функциональная активность микроорганизмов в процессах добычи и переработки медно-никелевых руд Мурманской области // *Вестник МГТУ*. 2018. Т. 21, № 1. С. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-109-116>. EDN: YXHUWS.
- Cui F., Mu W., Zhai Y., Guo X. The selective chlorination of nickel and copper from low-grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics // *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 239. Article number 116577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116577>.
- Deng L., Qu B., Su S.-J., Ding S. L. [et al.]. Extraction of iron and manganese from pyrolusite absorption residue by ammonium sulphate roasting-leaching process // *Metals*. 2018. Vol. 8, Iss. 1. Article number 38. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8010038>.
- Goryachev A. A., Chernousenko E. V., Potapov S. S., Tsvetov N. S. [et al.]. A study of the feasibility of using ammonium sulfate in copper-nickel ore processing // *Metals*. 2021. Vol. 11. Article number 422. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030422>.
- Henckens M. L. C. M., Worrell E. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 264. Article number 121460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121460>.
- Ju J., Feng Y., Li H., Xu C. [et al.]. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review // *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 457. Article number 141197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141197>.

- Li J., Li Y., Duan H., Guo X. [et al.]. Experimental and kinetic study of magnesium extraction and leaching from laterite nickel ore by roasting with ammonium sulfate // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2018. Vol. 59. P. 596–604. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1067821218060123>.
- Masloboev V. A., Seleznev S. G., Svetlov A. V., Makarov D. V. Hydrometallurgical processing of low-grade sulfide ore and mine waste in the Arctic regions: Perspectives and challenges // *Minerals*. 2018. Vol. 8, Iss. 10. Article number 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/min8100436>.
- Sun Y., Shen X.-y., Zhai Y.-c. Thermodynamics and kinetics of extracting zinc from zinc oxide ore by the ammonium sulfate roasting method // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2015. Vol. 22. P. 467–475. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1095-x>.
- Xu Y.-j., Xin H.-x., Duan H.-m., Li Y.-d. [et al.]. Reaction behavior of silicon-rich diasporic bauxite with ammonium sulfate during roasting // *Journal of Central South University*. 2022. Vol. 29, Iss. 1. P. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-022-4917-9>.

## References

- Goryachev, A. A., Belyaevsky, A. T., Makarov, D. V., Potapov, S. S. et al. 2022. Copper-nickel ore processing by low-temperature roasting in mixture with ammonium sulfate. *Journal of Mining Science*, 58(3), pp. 447–455. DOI: <https://doi.org/10.15372/ftprpi20220312>. EDN: TWKRSL. (In Russ.)
- Goryachev, A. A., Makarov, D. V., Belyaevskiy, A. T. 2020. Low-temperature roasting of copper-nickel ores with ammonium sulphate as a perspective method for processing such raw. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 21, pp. 144–151. EDN: YNPLSL. (In Russ.)
- Igrevskaia, L. V. 2005. Russia on the global nickel market. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye*, 4, pp. 67–71. EDN: PKAWIJ. (In Russ.)
- Kondrat'ev, V. B., Popov, V. V., Kedrova, G. V. 2019. Global copper market (continued). *Russian Mining Industry*, 4(146), pp. 100–101. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-4-100-101. EDN: WJCVV. (In Russ.)
- Ternovoy, V. V., Samoilenko, A. I., Tsarakov, O. I. 2009. The basis of minimal industrial maintenance of useful component for deposits of complex mineral raw materials. *Journal of Mining Institute*, 184, pp. 94–98. EDN: RENRMV. (In Russ.)
- Fokina, N. V., Yanishevskaya, E. S., Svetlov, A. V., Goryachev, A. A. 2018. Functional activity of microorganisms in mining and processing of copper-nickel ores in the Murmansk region. *Vestnik of MSTU*, 21(1), pp. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-109-116>. EDN: YXHUWS. (In Russ.)
- 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*, 239. Article number 116577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116577>.
- Deng, L., Qu, B., Su, S.-J., Ding, S. L. et al. 2018. Extraction of iron and manganese from pyrolusite absorption residue by ammonium sulphate roasting-leaching process. *Metals*, 8(1). Article number 38. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8010038>.
- Goryachev, A. A., Chernousenko, E. V., Potapov, S. S., Tsvetov, N. S. et al. 2021. A study of the feasibility of using ammonium sulfate in copper-nickel ore processing. *Metals*, 11. Article number 422. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030422>.
- Henckens, M. L. C. M., Worrell, E. 2020. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates. *Journal of Cleaner Production*, 264. Article number 121460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121460>.
- Ju, J., Feng, Y., Li, H., Xu, C. et al. 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, 457. Article number 141197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141197>.
- Li, J., Li, Y., Duan, H., Guo, X. et al. 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*, 59, pp. 596–604. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1067821218060123>.
- Masloboev, V. A., Seleznev, S. G., Svetlov, A. V., Makarov, D. V. 2018. Hydrometallurgical processing of low-grade sulfide ore and mine waste in the Arctic regions: Perspectives and challenges. *Minerals*, 8(10). Article number 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/min8100436>.
- 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*, 22, pp. 467–475. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1095-x>.
- Xu, Y.-j., Xin, H.-x., Duan, H.-m., Li, Y.-d. et al. 2022. Reaction behavior of silicon-rich diasporic bauxite with ammonium sulfate during roasting. *Journal of Central South University*, 29(1), pp. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-022-4917-9>.

### Сведения об авторах

**Горячев Андрей Александрович** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [a.goryachev@ksc.ru](mailto:a.goryachev@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

**Andrey A. Goryachev** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic FRC KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: [a.goryachev@ksc.ru](mailto:a.goryachev@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

**Макаров Дмитрий Викторович** – ул. Ферсмана, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук; e-mail: [mdv\\_2008@mail.ru](mailto:mdv_2008@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

**Dmitriy V. Makarov** – 14a Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr Sci. (Engineering); e-mail: [mdv\\_2008@mail.ru](mailto:mdv_2008@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

**Потапов Сергей Сергеевич** – территория Ильменский заповедник, 1, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, 456317; Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: [s\\_almazov@74.ru](mailto:s_almazov@74.ru)

**Sergey S. Potapov** – 1 Ilmensky State Reserve, Miass, Chelyabinsk region, Russia, 456317; South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geocology UB RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Senior Researcher; e-mail: [s\\_almazov@74.ru](mailto:s_almazov@74.ru)

**Беляевский Александр Трифонович** – ул. Ферсмана, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, ст. науч. сотрудник; e-mail: [a.belyaevskii@ksc.ru](mailto:a.belyaevskii@ksc.ru)

**Aleksandr T. Belyaevskiy** – 26a Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209, I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Senior Researcher; e-mail: [a.belyaevskii@ksc.ru](mailto:a.belyaevskii@ksc.ru)

**Семущин Василий Владимирович** – ул. Ферсмана, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, канд. хим. наук; e-mail: [v.semushin@ksc.ru](mailto:v.semushin@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2456-3951>

**Vasily V. Semushin** – 26a Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Cand. Sci. (Chemistry); e-mail: [v.semushin@ksc.ru](mailto:v.semushin@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2456-3951>

**Компанченко Алена Аркадьевна** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник; e-mail: [komp-alena@yandex.ru](mailto:komp-alena@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1240-7898>

**Alena A. Kompanchenko** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Researcher; e-mail: [komp-alena@yandex.ru](mailto:komp-alena@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1240-7898>