



СВЕТЛОВ АНТОН ВИКТОРОВИЧ

НАУЧНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ  
ПОВЫШЕНИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ  
НЕКОНДИЦИОННЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД И  
ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат  
диссертации на соискание  
ученой степени кандидата  
технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Институте проблем промышленной экологии Севера – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра  
«Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН)

Научный руководитель:

**Макаров Дмитрий Викторович**, доктор технических наук, директор ИППЭС КНЦ РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Ксенофонов Борис Семенович**, доктор технических наук, академик РЭА, профессор кафедры "Экологии и промышленной безопасности" Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**Шехирев Дмитрий Витальевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Обогащение и переработка полезных ископаемых и техногенного сырья» Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ МИСиС).

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Защита состоится «05» февраля 2019 г. в 12 час. 00 мин часов на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 в Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4. Т/факс (095) 360-89-60

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте [www.ipkonran.ru](http://www.ipkonran.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук



Матвеева Т.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследований.** Мурманская область является одним из регионов с крупнейшими предприятиями минерально-сырьевого комплекса Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и страны в целом. Актуальной технологической, экономической и экологической проблемой для горно-металлургических предприятий АЗРФ является повышение полноты извлечения цветных и благородных металлов из сульфидных руд и широкая разработка техногенных минеральных образований: накопленных и текущих отходов горно-металлургических производств с одновременным снижением нагрузки на окружающую среду.

Необходимость использования некондиционного сульфидного медно-никелевого сырья природного и техногенного генезиса обусловлена, прежде всего, сокращением запасов богатых легкообогатимых руд. Особенности форм нахождения полезных минералов, высокая степень их дисперсности, изменения физических и физико-химических свойств поверхности являются закономерными барьерами на пути разработки технологий извлечения цветных металлов, соответствующих требованиям технической эффективности и экономической целесообразности.

Применение комбинированных обогатительно-гидрометаллургических технологий позволяет значительно повысить комплексность использования сырья и обеспечить эффективную защиту окружающей среды, особенно на территории Мурманской области, почти полностью находящейся за полярным кругом.

Большой вклад в развитие теории и практики комбинированных обогатительно-гидрометаллургических технологий внесли работы И. Н. Плаксина, В. А. Чантурия, А. Е. Воробьева, Г. И. Каравайко, Т. Ф. Кондрагеевой, И. В. Шадруновой, Б. Д. Халезова, А.-К. Halinen, M. Riekkola-Vanhanen, M. E. Smith, H. R. Watling, ряда других отечественных и зарубежных исследователей.

**Цель работы.** Научное обоснование и разработка комбинированных методов, обеспечивающих интенсификацию, повышение извлечения цветных металлов и вовлечение в переработку некондиционных медно-никелевых руд и отходов горно-металлургического комплекса.

**Идея работы.** Использование выявленных механизмов окисления и изменения поверхностных свойств сульфидных минералов для обоснования технологий доизвлечения цветных металлов из бедных медно-никелевых руд, хвостов обогащения и шлаков с одновременным снижением нагрузки на окружающую среду вблизи горно-металлургического предприятия в АЗРФ (на примере Мурманской области).

### **Объекты и методы исследований:**

- рядовые вкрапленные руды, обрабатываемые рудником «Северный» Кольской ГМК, и забалансовые месторождения сульфидных медно-никелевых руд, расположенные в Моччегорском районе (на примере: Нитгис-Кумужья-Травяная (НКТ), Нюд-II, Нюд Терраса, Морошковое озеро), техногенное месторождение (ТМ) «Отвалы Аллареченского месторождения» сульфидных медно-никелевых руд, расположенное в Печенгском районе Мурманской области;
- хвосты обогащения медно-никелевых руд, производственная площадка Кольской ГМК, г. Заполярный;
- шлаки текущего производства и лежалые шлаки, производственная площадка Кольской ГМК, п.г.т. Никель.

В работе использованы методы: микроскопический (микроскоп Olympus BX51), рентгенофазовый (дифрактометры ДРОН-2, Shimadzu XRD-6000), дифференциально-термический, химического анализа (атомно-абсорбционный спектрометр с пламенной атомизацией, AAnalyst 400 PerkinElmer), сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп VEGA 3 TESKAN), ИК спектроскопии (ИК-Фурье спектрометр Nicolet 6700), флотационные эксперименты. Исследования инженерно-геологических свойств лежалых гранулированных шлаков проводили согласно ГОСТ 12536-79. Обработка результатов экспериментов произведена с использованием статистических методов в программных продуктах Microsoft Excel и STATISTICA.

#### **Задачи исследований:**

1. провести обзор исследований воздействия сульфидсодержащих отходов горно-металлургического комплекса на окружающую среду, провести анализ отечественной и мировой литературы по теории и практике переработки бедных сульфидных руд и техногенных отходов комбинированными обогатительно-металлургическими и геотехнологическими методами;

2. исследовать процессы выщелачивания вкрапленных медно-никелевых руд при их взаимодействии с шахтными водами;

3. изучить процессы при хранении грубодисперсных сульфидсодержащих отходов на примере отвалов Аллареченского месторождения медно-никелевых руд и гранулированных шлаков руднотермической плавки;

4. классифицировать некондиционные медно-никелевые руды и техногенные образования по их потенциальной экологической опасности и пригодности к переработке методом физико-химической геотехнологии;

5. исследовать возможности интенсификации флотации цветных металлов из хвостов обогащения медно-никелевых руд и отвальных шлаков комбината «Печенганикель» Кольской ГМК;

6. провести лабораторное моделирование процессов кучного выщелачивания проб некондиционных медно-никелевых руд месторождений Мурманской области, хвостов обогащения и шлаков комбината «Печенганикель» Кольской ГМК;

7. разработать способ геотехнологической переработки некондиционных сульфидных рудных материалов, содержащих цветные металлы и железо.

#### **Научная новизна.**

1. Выявлены механизмы окисления и изменения поверхностных свойств сульфидных минералов различных отходов медно-никелевого производства:

- при хранении отвалов некондиционных медно-никелевых руд и хвостов обогащения происходит окисление сульфидов в сростках в последовательности моноклинный пирротин → гексагональный пирротин → пентландит → халькопирит за счет гальванических взаимодействий с образованием серной кислоты и ионов трехвалентного железа при окислении пирротина и последующим переходом цветных металлов в растворимые формы;

- при хранении хвостов обогащения медно-никелевых руд характерна стадия, заключающаяся в миграции сульфатных растворов и их взаимодействие с серпентинами и хлоритами, повышении pH и осаждении цветных металлов в составе слоистых гидросиликатов и гидроксидов;

- гальванические взаимодействия при хранении отвальных гранулированных шлаков руднотермической плавки оказывают минимальное влияние на кинетику окисления, так как сульфиды представлены пентландитом с различным соотношением железа и цветных металлов. Умеренный кислородопроизводящий потенциал +4.84 и нахождение сульфидных включений в силикатной оболочке состава оливинового стекла определяет низкую скорость окисления.

2. Установлены критерии пригодности природного и техногенного медно-никелевого сырья к переработке геотехнологическими методами, основанные на содержании продуцирующей серную кислоту и ионы трехвалентного железа пирротина, а также химически активных нейтрализующих серную кислоту минералов, скорости фильтрации, склонности к коагуляции в процессе фильтрации выщелачивающих растворов:

- к наиболее благоприятным объектам отнесены отвалы Аллареченского месторождения, некондиционные руды месторождений НКТ, Нюд II и Морошковое озеро, характеризующиеся инертными нерудными минералами в составе и не снижающие фильтрационных характеристик;

- к наименее благоприятным объектам отнесены хвосты обогащения медно-никелевых руд Печенгского рудного поля с низкими фильтрационными характеристиками и повышенным расходом серной кислоты из-за наличия серпентинов и хлоритов, а также отвальные гранулированные шлаки из-за потерь фильтрационных свойств при выщелачивании.

3. Обоснованы направления интенсификации комбинированных обогатительно-металлургических и геотехнологических методов доизвлечения цветных металлов:

- для флотации отвальных шлаков целесообразно применение предварительного электроимпульсного дробления гранул с целью межфазных разрушений минеральных сростков и выделения сульфидной части с последующим измельчением до 100% класса -40 мкм;

- для некондиционных руд месторождений НКТ, Нюд II, Морошковое озеро и Нюд Терраса с целью улучшения раскрытия сульфидных сростков и повышения извлечений цветных металлов при кучном выщелачивании целесообразны измельчение до -1+0 мм, сернокислотная агломерация и последующее выщелачивание 1%-ной серной кислотой;

- для хвостов обогащения медно-никелевых руд с целью улучшения перколяционных свойств и повышения извлечений цветных металлов при кучном выщелачивании необходима сернокислотная агломерация 10%-ной кислотой при соотношении Т : Ж = 3 : 1, выщелачивание предпочтительно вести 1%-ной серной кислотой.

#### **Практическая значимость.**

Разработан способ геотехнологической переработки некондиционных медно-никелевых рудных материалов, который обеспечивает высокие извлечения металлов в продуктивный раствор, позволяет получить селективные товарные продукты, содержащие медь, никель и кобальт с осаждением железа в отдельный продукт.

Научные результаты, изложенные в работе, использованы в учебном процессе на кафедре геоэкологии Мурманского государственного технического университета.

#### **Основные защищаемые положения**

1) Выявленные особенности окисления и изменения поверхностных свойств сульфидных минералов некондиционных руд медно-никелевых и отходов различных стадий горно-металлургического производства, определяемые формой и размерами сростков сульфидов, составом нерудных минералов (силикатной матрицы), рН и ОВП поровых растворов, воздействием атмосферных агентов выветривания (кислотных дождей) позволяют установить критерии пригодности сырья к переработке комбинированными обогатительно-металлургическими и геотехнологическими методами.

2) Использование флотации для доизвлечения цветных металлов из хвостов обогащения медно-никелевых руд и отвальных гранулированных шлаков, с применением предварительного: обесшламливания хвостов на гидроциклоне по классу 20 мкм с доизмельчением песков гидроциклона до 90% -71 мкм; электроимпульсного дробления гранул шлака с последующим измелчением до 100 % -40 мкм обеспечивает прирост извлечений цветных металлов и позволяет получить концентраты, пригодные для дальнейшей гидрометаллургической переработки.

3) Разработанный геотехнологический способ переработки некондиционных медно-никелевых руд, хвостов обогащения и шлаков обеспечивает высокую степень извлечения металлов в продуктивный раствор за счет интенсификации процесса кучного выщелачивания, заключающейся в сернокислотной агломерации, приводящей к раскрытию сульфидных сростков, разрушению рудного материала с образованием трещин и увеличению проницаемости, улучшению доступа выщелачивающих растворов. Способ позволяет получить селективные товарные продукты, содержащие медь, никель и кобальт, выделить железо в отдельный продукт и снизить потери цветных металлов.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением апробированных методов анализа и статистической обработки фактического материала, использованием общепринятых критериев оценки полученных результатов, подтверждается согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента, удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных исследований.

#### **Личный вклад.**

Анализ современного состояния проблем переработки бедных медно-никелевых руд, хвостов обогащения и шлаков, постановка цели и задач исследований, обоснование применяемых методов, отбор проб медно-никелевых руд и отходов ГМК, организация и проведение экспериментов, обработка и анализ полученных результатов, подготовка публикаций, написание статей и апробация материалов на конференциях различного уровня выполнены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал равноправное участие в обсуждениях и подготовке материалов всех совместных публикаций.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, докладывались на международных совещаниях «Плаксинские чтения» (Петрозаводск, Алматы, Иркутск, Санкт-Петербург, Красноярск, 2012-2017 гг.); International Conference on Environment and Mineral Processing (Технический Университет, Острава, Чешская Республика, 2014-2017 гг.); международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами

молодых» (ИПКОН РАН, Москва, 2013, 2014 гг.); всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии (ГИ КНЦ РАН, Апатиты, 2011, 2015 гг.); научном семинаре «Минералогия техногенеза» (ИМинУрО РАН, Миасс, 2011 г.); всероссийской научной конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (ИППЭС КНЦ РАН, Апатиты, 2016 г.).

#### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 23 научные работы, в том числе 9 – в рецензируемых изданиях, из которых 7 рекомендованы ВАК России. Получен патент РФ на изобретение.

#### **Исследования поддержаны:**

- грантом РФФИ № 10-05-98805-р\_север\_а, 2010-2011 гг., «Обоснование и разработка методов доизвлечения цветных металлов из хвостов обогащения медно-никелевых руд»;
- программой РАН №27 «Фундаментальный базис инновационных технологий прогноза, оценки, добычи и глубокой комплексной переработки стратегического минерального сырья, необходимого для модернизации экономики России», 2012-2014 гг., «Теоретическое и экспериментальное обоснование интенсификации комбинированных обогатительно-гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сульфидного сырья»;
- грантом РФФИ № 14-05-98804-р\_север\_а, 2014-2016 гг., «Теоретическое обоснование и разработка комбинированных методов доизвлечения цветных металлов из сульфид-содержащих отходов горно-металлургического комплекса на основе изучения минералого-технологических особенностей их состава»;
- программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 1.4П «Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче», 2015-2017 гг., «Теоретическое и экспериментальное обоснование физико-химических геотехнологий переработки сырья природных и техногенных медно-никелевых месторождений Мурманской области с доизвлечением стратегических цветных металлов и снижением нагрузки на окружающую среду».

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 185 наименований; содержит 72 рисунка, 17 таблиц, изложена на 164 страницах текста.

#### **Благодарности.**

Автор выражает признательность научному руководителю, д.т.н. Д. В. Макарову; заместителю председателя ФИЦ КНЦ РАН, д.т.н. В. А. Маслобоеву; директору Апатитского филиала МГТУ, к.г.-м.н. И. В. Чикирёву; сотрудникам отдела аспирантуры МГТУ; заведующему лабораторией Комплексной переработки нетрадиционного минерального сырья ИПКОН РАН, д.т.н. А. А. Лавриненко; старшему научному сотруднику ИПКОН РАН, к.т.н. Л. М. Саркисовой; ведущему научному сотруднику ИПКОН РАН, к.т.н. Э. А. Шрадер; главному научному сотруднику Лаборатории минералогии рудогенеза ИМин Уро РАН, д.г.-м.н. Е. В. Белогуб; старшему научному сотруднику Лаборатории минералогии техногенеза и геоэкологии ИМин Уро РАН, к.г.-м.н. С. С. Потапову; главному геологу ООО «ГРК Монолит», к.г.-м.н. С. Г. Селезневу; кандидату технических наук А. Ф. Усову (ЦФТПЭС КНЦ РАН);

старшему научному сотруднику Лаборатории минерального сырья и силикатного синтеза ИХТРЭМС КНЦ РАН, к.т.н. О. В. Суворовой; научному сотруднику ЦНМ КНЦ РАН, к.г.-м.н. Е. А. Селивановой; старшему научному сотруднику и заведующему Лабораторией золота и других высоколиквидных полезных ископаемых ГИ КНЦ РАН, к.г.-м.н. С. М. Карпову; старшему научному сотруднику Лаборатории платинометального рудогенеза ГИ КНЦ РАН, к.г.-м.н. П. В. Припачкину.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Отходы добычи и переработки сульфидных руд цветных металлов: экологическая опасность, ресурсная ценность и технологии переработки**

Для нашей страны в настоящее время и в перспективе характерны ухудшение или сокращение разведанных запасов важнейших полезных ископаемых, снижение их качества на разрабатываемых и проектируемых месторождениях, серьезное усложнение их промышленного освоения. Специфическим является географическое положение российской минерально-сырьевой базы – значительная часть промышленных месторождений расположена в АЗРФ. Поэтому особую актуальность для страны приобретают вопросы экологической безопасности при добыче и переработке полезных ископаемых, хранении горнопромышленных отходов в условиях АЗРФ.

Интерес к сульфидсодержащим отходам горно-металлургического комплекса обоснован, с одной стороны, их экологической опасностью, а соответственно вероятным и действительным ущербом для окружающей среды. С другой стороны, при добыче и обогащении руд цветных металлов теряется около 25 % никеля и 15% меди, потери кобальта доходят до 40%. Поэтому, актуальной научно-технической задачей выступает разработка комбинированных обогатительно-гидрометаллургических технологий, обеспечивающих доизвлечение полезных компонентов из некондиционных руд, отходов горного и обогатительного производств. В последнее десятилетие начаты опытно-промышленные работы по кучному выщелачиванию бедных медно-никелевых сульфидных руд.

### **Исследования окисления и изменения поверхностных свойств сульфидов при хранении техногенных образований и оценка воздействия на окружающую среду процессов добычи и переработки медно-никелевых руд**

С целью исследования особенностей и закономерностей окисления и изменения поверхностных свойств сульфидных минералов медно-никелевых руд на различных стадиях горно-металлургического производства: подземной добычи, складирования и хранения вскрышных пород, отходов обогащения и пирометаллургического передела, были проведены следующие четыре серии экспериментов.

#### **1. *Взаимодействие вкрапленных медно-никелевых руд с шахтными водами***

Проведены исследования выщелачивания проб образцов вкрапленных 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).

На рисунке 1 приведены характерные типы сростков сульфидных минералов. Показана эмульсионная вкрапленность рудных минералов в силикатах.



Результат силикатного анализа руды показал, что наибольшими содержаниями в порядке убывания характеризуются кремнезём – 35.83 %, оксиды магния (29.9 %) и железа ( $\text{FeO}$  – 15.51 % и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 6.14 %). Содержание никеля и меди составляют 0.65 % и 0.19 % соответственно.

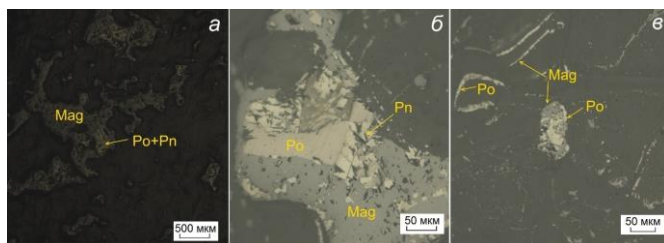


Рис. 1 – Микрофотографии образцов руды. Po – пирротин, Pn – пентландит, Mag – магнетит

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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , пентландит  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ , халькопирит  $\text{CuFeS}_2$  и миллерит  $\text{NiS}$ .

Исследования выполнены в двух режимах. Статический 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/дм<sup>3</sup>:  $\text{SO}_4^{2-}$  – 596.6; Ni – 0.012; Cu – 0.0041. Динамический режим моделирует фильтрацию шахтных вод через толщу сульфидсодержащих горных пород. Опыты вели в перколяторах с образцами руды, измельченными до –3...+2 мм.

Концентрации цветных металлов и сульфат-иона в воде после взаимодействия с образцом медно-никелевой руды в течение 8 суток влагонасыщения дистиллированной водой и 30 суток взаимодействия с модельным раствором представлены на рисунке 2. Как видно, концентрации всех компонентов, за исключением меди, растут. Концентрации сульфат-иона значительно превышают концентрации никеля и, в особенности, меди. Такое поведение ионов можно объяснить осаждением металлов на гидроксиды железа и обменными реакциями с химически активными серпентинами, чему способствует величина pH растворов (при влагонасыщении величина водородного показателя воды повышается до 8.5–9 единиц, при фильтрации модельного раствора pH несколько снижается, оставаясь при этом выше 7)

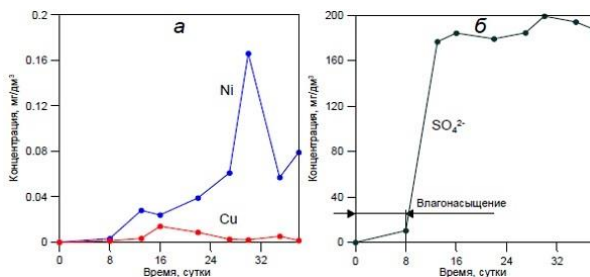


Рис. 2 – Концентрации никеля, меди (а) и серы (б) в растворе при взаимодействии с рудой.

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. 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».

## 2. Отвалы Аллареченского месторождения медно-никелевых руд

Исследование процессов окисления минералов ТМ «Отвалы Аллареченского месторождения» показало, что наиболее интенсивно происходит окисление моноклинного пирротина с образованием свободной серной кислоты, которая воздействует как на сам пирротин, так и на ассоциирующие с ним минералы, в частности, пентландит. В результате этого воздействия происходит виоларитизация пентландита, что приводит к увеличению пористости и повышает скорость выветривания. На рисунке 3 представлены ИК спектры исходной руды, новообразованной фазы и руды после обработки в режиме увлажнения – высыхания серной кислотой.

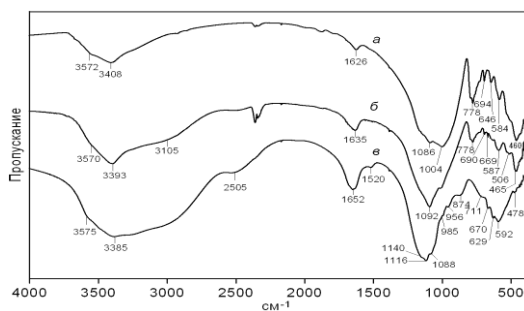


Рис. 3 – ИК спектры исходной руды ТМ «Отвалы Аллареченского месторождения» (а), руды после обработки раствором серной кислоты в режиме увлажнения – высыхания (б) и новообразований на поверхности руды (в)

Отсутствие в составе руды химически активных нерудных минералов, способных нейтрализовать серную кислоту, образующуюся вследствие процессов окисления сульфидов железа, а также выпадение кислотных дождей в регионе, резко увеличивает скорость окисления сульфидных минералов и переход экологически опасных элементов в подвижные формы.

Важную роль в процессах разрушения руд играет естественное бактериальное выщелачивание. В результате техногенной нагрузки на прилегающих к ТМ «Отвалы Аллареченского месторождения» территориях наблюдается прогрессирующая деградация экосистем. Процессы химического выветривания обесценивают ТМ «Отвалы Аллареченского месторождения» как источник дополнительных минеральных ресурсов.

### **3. Хвосты обогащения медно-никелевых руд комбината «Печенганикель»**

Сопоставление содержаний тяжелых металлов в поровых растворах современных и лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд показало значимые различия практически по всем сопоставляемым параметрам. Как отмечено в докторской диссертации Д. В. Макарова, низкие содержания металлов в поровых растворах хвостов текущего производства (в 5-30 раз), возможно, связаны с тем, что процесс окисления отчасти блокируется присутствием остатков флотореагентов. В мировой литературе преобладает мнение, что экологическую опасность представляют горнопромышленные отходы, в которых поровые растворы характеризуются кислой реакцией. Полученные результаты показывают, что хотя pH растворов во всех пробах выше 7,8, концентрации тяжелых металлов в них значительно превышают ПДК. Остаточные содержания металлов в водной фазе лежалых хвостов превосходят ПДК для рыбохозяйственных водоемов по никелю в среднем в 486, по меди – в 394, по кобальту – в 102 раза. Эта ситуация сохраняется (и даже ухудшается) длительное время после завершения эксплуатации объекта.

### **4. Шлаки текущего производства и лежалые шлаки комбината «Печенганикель»**

Отличие лежалых шлаков от шлаков текущего производства заключается в заметном увеличении содержания фракции  $-0.1$  мм. Отмечается значительная неоднородность лежалых шлаков по гранулометрическому составу, характерная для всех классов крупности. Очевидно, это связано с дифференциацией вещества, как на стадии складирования, так и в процессе хранения и возможными гипергенными процессами. Исследование инженерно-геологических свойств лежалых шлаков показало, что для них характерны весьма высокие обратные корреляционные связи между плотностью шлака в естественном состоянии и пористостью, плотностью шлака в сухом состоянии и пористостью.

Включения сульфидов в гранулированном шлаке текущего производства распределены неравномерно и не во всех зернах основной массы (матрицы шлака), состоящей из оливина и стекла (рис. 4). Размеры сульфидов варьируют от 5 до 20 мкм. Сульфидные включения лежалых шлаков по форме представляют собой как округлые выделения, подобные сульфидам шлаков текущего производства, так и сложные образования сульфидов, имеющие кривогранную форму. В основном размер сульфидов варьирует от совсем мелких 5-10 мкм, до более крупных 20-70 мкм. Состав сульфидов удовлетворительно пересчитывается на формулу пентландита  $(Fe,Ni)_5S_8$ .

Следует отметить, что шлакоотвалы в пгт. Никель подвергаются воздействию сильных агентов выветривания: атмосферных выпадений (кислотных дождей) и поступающих на шлакоотвал шахтных вод. С целью оценки воздействия хранящихся в

отвалах гранулированных шлаков на окружающую среду была выполнена серия исследований по выщелачиванию.

Дифрактограммы новообразованной корки и шлаков в объеме образца после завершения опытов с раствором серной кислоты, как в присутствии окислителя, так и без него практически идентичны.

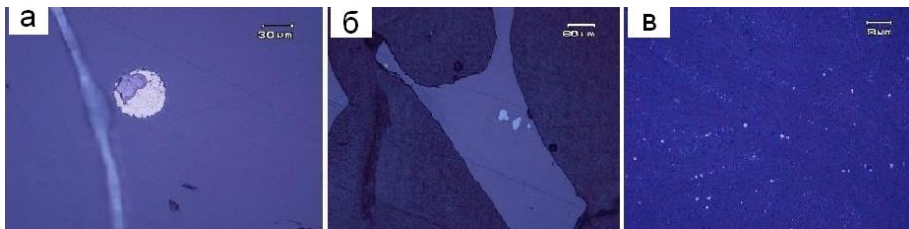


Рис. 4 – Шлаки текущего производства комбината «Печенганикель»: а – крупное зерно сульфида, округлой формы; б – выделения сульфидов овальной формы и их срастания; в – мелкие включения сульфидов округлой формы между игольчатыми кристаллами оливина

В качестве примера на рисунке 5 представлена дифрактограмма новообразований лежалого шлака, рефлексы на которой отвечают старкииту  $MgSO_4 \times 4H_2O$ , а также, вероятно, минералам из этой же группы: розениту  $FeSO_4 \times 4H_2O$  и эплоуиту  $(Co,Ni)SO_4 \times 4H_2O$ .

Опыты, моделирующие окисление шлаков в ускоренных условиях, показывают резкое, на два и более порядка увеличение скорости перехода цветных металлов в растворимые формы при обработке кислыми растворами.

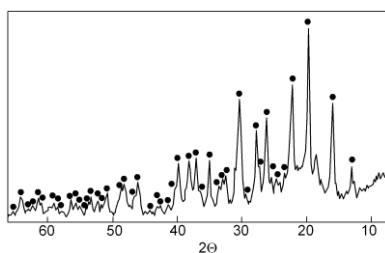


Рис. 5 – Дифрактограмма новообразований лежалого шлака после обработки в режиме увлажнение – высыхание раствором серной кислоты. Черными кружками обозначены рефлексы старкиита и изоструктурных сульфатных фаз.

##### ***5. Классификация некондиционных медно-никелевых руд и техногенных образований по их потенциальной экологической опасности и пригодности к переработке методом физико-химической геотехнологии***

Проанализирована потенциальная экологическая опасность всей цепочки этапов добычи и переработки медно-никелевых руд: подземная разработка и взаимодействие сульфидных минералов с шахтными водами; открытая разработка, складирование и хранение оруденелых вмещающих пород; флотация сульфидных минералов и хранение хвостов обогащения; металлургический передел – плавка концентрата на штейн и

хранение отвальных шлаков. Выявлена потенциальная экологическая опасность некондиционных медно-никелевых руд, хвостов обогащения и шлаков. Отвалы Аллареченского месторождения характеризуются высокой опасностью (NAP, результирующий кислотопродуцирующий потенциал, +104.37), Медно-никелевые руды Мончеплутона – средней (NAP +36.51), хвосты обогащения и отвальные гранулированные шлаки – умеренной (NAP +5.35 и +4.84 соответственно).

Исследованные объекты ранжированы по их пригодности к переработке методом физико-химической геотехнологии. Отлично пригодны к кучному выщелачиванию отвалы Аллареченского месторождения, хорошо – некондиционные руды месторождений Мончеплутона. Удовлетворительно пригодны к кучному выщелачиванию техногенные объекты – хвосты обогащения и отвальные гранулированные шлаки.

### **Исследование возможностей флотационного доизвлечения цветных металлов из хвостов обогащения медно-никелевых руд и отвальных шлаков комбината «Печenganикель»**

Научные и технологические исследования по вовлечению в переработку сырья техногенных месторождений в основном связаны с созданием новых нетрадиционных технологий с использованием комбинации обогатительно-гидрометаллургических приемов.

#### ***1. Хвосты обогащения медно-никелевых руд комбината «Печenganикель»***

Анализ потерь сульфидов в отвальных хвостах показал, что при среднем содержании никеля в хвостах 0.17-0.19%, это около 25-30% от исходного содержания в руде. В зависимости от типа перерабатываемой руды от 11 до 22% от исходного содержания теряется в виде мелких и пылевидных вкрапленников, которые не могут быть извлечены флотацией. От 2.5 до 6.0% составляют потери в составе сульфидно-магнетитовых сростков. Потери в составе раскрытых сульфидных зерен главным образом связаны с низкой флотационной активностью моноклинного пирротина и составляют соответственно 5-9 % от исходного содержания никеля в руде.

С целью снижения потерь цветных металлов в хвосты эти сростки могут быть доизвлечены с получением дополнительного бедного концентрата, который целесообразно перерабатывать гидрометаллургическими методами.

Собирателем служил бутиловый ксантогенат калия (БКс), вспенивателем – метилизобутилкарбинол (МИБК). Для активации пирротина подавали медный купорос. Было применено две схемы открытого цикла: 1) измельчение в шаровой мельнице до 90% класса -71 мкм; 2) обесшламливание хвостов на гидроциклоне по классу 20 мкм, доизмельчение песков гидроциклона до 90% -71 мкм.

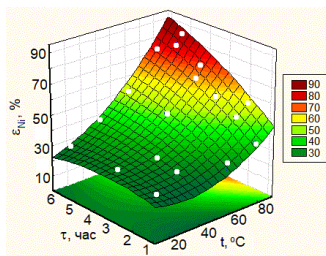


Рис. 6 – Зависимость извлечения в раствор никеля от температуры и времени процесса

Результаты флотации показали, что в первой схеме извлечение Ni и Cu в концентрат составило 33.7 и 44 %, соответственно; вторая схема показала схожие значения для никеля – 33.3, но более высокие извлечения меди 48 %. Основу концентрата составляют обломки нерудных минералов с включениями сульфидов. Присутствуют магнетит, хромит, ильменит. Среди сульфидов преобладает пирротин, в подчиненном количестве присутствует пентландит. Полученные концентраты пригодны для последующей гидрометаллургической переработки. Возможно атмосферное выщелачивание полученного флотационного концентрата (рис. 6). Определены оптимальные параметры процесса: концентрация серной кислоты 15%, время выщелачивания 5-6 часов, температура 80 °С, отношение Т : Ж = 1:5, скорость перемешивания 900 мин<sup>-1</sup> с использованием в качестве окислителя ионов трехвалентного железа и с введением затравки в виде аморфного кремнезема.

## 2. Шлаки текущего производства и лежалые шлаки комбината «Печенганикель»

Были проведены опыты по флотации шлаков текущего производства. Исходные содержания никеля и меди составляли: 0.16% и 0.12%. Флотацию вели после тонкого измельчения (до 100 % -40 мкм) с применением бутадиен-стирольного сополимера СКС-30 ОХ (гидрофобный флокулянт). Реагентный режим был выбран следующим: расход БКс 200 г/т, МИБК – 100 г/т. Время флотации – 10 минут. Извлечения полезных компонентов составили, %: Ni – 36.0, Cu – 37.5, Co – 26.4, S – 26.6.

С целью улучшения показателей флотации использовали электроимпульсное дробление (ЭИД) гранул в измельчительной камере, размещаемой в баке с технической водой.

Таблица 1  
Результаты флотации шлака Cu-Ni производства после ЭИД.

№ опыта	Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
			Ni	Cu	Ni	Cu
1	Концентрат	33.1	0.255	0.165	54.0	47.1
	Хвосты	66.9	0.107	0.092	46.0	52.9
	Исх. шлак	100.0	0.156	0.116	100.0	100.0
2	Концентрат	34.2	0.240	0.160	52.6	47.2
	Хвосты	65.8	0.112	0.093	47.4	52.8
	Исх. шлак	100.0	0.156	0.116	100.0	100.0
3	Концентрат	23.4	0.290	0.185	43.5	37.3
	Хвосты	76.6	0.115	0.095	56.5	62.7

Применение предварительного ЭИД шлама с последующим измельчением на дисковом истирателе ИД-130 значительно улучшило показатели флотации, результаты которой сведены в таблицу 1.

### **Исследование возможности кучного выщелачивания цветных металлов из сульфидного сырья природных и техногенных объектов Мурманской области**

Для исследований возможной переработки гидрометаллургическими методами были использованы образцы забалансовых медно-никелевых руд Мончеплутона: Ниттис-Кумужья-Травяная (НКТ), Нюд-П, Нюд Терраса, Морошковое озеро схожего вещественного состава.

Взаимодействие руды месторождения Нюд П фракции -3+2 мм с выщелачивающим реагентом в динамическом режиме при температуре  $19 \pm 2$  °С в течение 130 суток продемонстрировал следующие извлечения металлов при выщелачивании раствором без окислителя, %: никель 12.4, медь 7.2, кобальт 13.2; с окислителем: никель 12.4, медь 6.9, кобальт 13.3. В качестве реагентов использовали 2%-ную серную кислоту с добавкой сульфата железа (III). Руда содержала, %: Ni 1.70, Cu 0.50, Co 0.07 (для экспериментов использовали образец густовкрапленной руды). Наиболее интенсивно выщелачивается кобальт. Вероятно, это связано с тем, что в руде кобальт присутствует только в составе сульфидов, причем часть его содержится в пирротине. Более низкие показатели характерны для меди.

Рассмотрены направления интенсификации кучного выщелачивания бедных медно-никелевых руд, среди которых стоит отметить измельчение и последующую серноокислотную агломерацию. Агломерацию вели с раствором  $H_2SO_4$  концентрацией 10%. Использовали соотношение Т:Ж равное 3:1. Измельчение руд вели до классов -1, -0.5, -0.25, -0.1 и -0.05 мм.

Как видно наиболее интенсивно никель выщелачивается из руды месторождения Морошковое озеро. За 32 суток извлечение составило более 60 %, при этом почти 20 % никеля перешло в раствор на стадии водного выщелачивания в течение 1 суток (рис. 7а). Существенно хуже никель выщелачивался из руды месторождения Нюд Терраса. Извлечение Ni за тот же период составило всего около 10 %. Очевидно, это связано с тем, что для данной руды преобладает пылевидная вкрапленность сульфидов. Поэтому после растворения более крупных минералов на стадии водного выщелачивания последующий прирост извлечения никеля до окончания эксперимента составил менее 2 % (рис. 7а). Как и ожидалось, медь выщелачивается значительно медленнее никеля, что связано с ее нахождением в составе «упорного» халькопирита. Наилучшие показатели по извлечению меди достигнуты в экспериментах с рудой месторождения НКТ – около 8 % (рис. 7б). Самые низкие извлечения Cu, как и в случае никеля, у руды месторождения Нюд Терраса – 1.95 %. Интенсивности выщелачивания цветных металлов в сутки составили, %: руда месторождения Морошковое озеро: никель 1.87, медь 0.13; руда месторождения НКТ: никель 0.97, медь 0.24; руда месторождения Нюд Терраса: никель 0.32, медь 0.06.

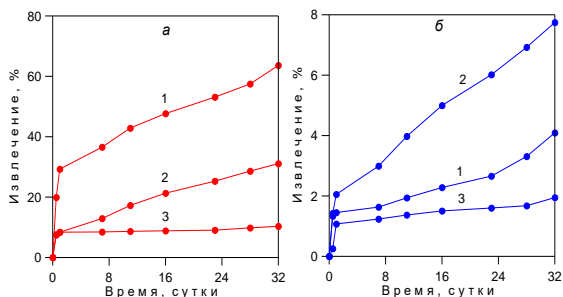


Рис. 7 – Извлечение никеля (а) и меди (б) в раствор при выщелачивании руд месторождений Морошковое озеро (1), НКТ (2) и Нюд Терраса (3)

Сернокислотная агломерация измельченных руд приводит к существенному улучшению показателей выщелачивания. Так, при выщелачивании руды месторождения Морошковое озеро, измельченной до крупности  $-3+2$  мм интенсивности извлечения в раствор составили для никеля 0.48, для меди 0.08 % в сутки, что ниже показателей для руды в окатышах в 3.9 и 1.6 раз соответственно.

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. Проведены эксперименты с получением окатышей из хвостов обогащения Кольской ГМК при соотношении Т:Ж=5-3:1. В качестве связующего применяли раствор  $H_2SO_4$  концентрацией 10-30%.

Концентрации никеля в растворе стабильны и находятся в диапазоне 0.1-0.35 г/л (рис. 8). 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.

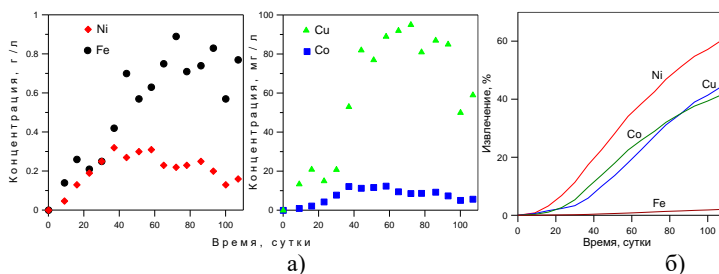


Рис. 8 – а) Концентрации металлов в продуктивных растворах при выщелачивании гранулированных хвостов обогащения медно-никелевых руд; б) Кинетика выщелачивания металлов из гранулированных хвостов обогащения медно-никелевых руд.



Наиболее интенсивно, как и следовало ожидать, выщелачивается никель. За 110 суток в раствор перешло около 60% содержащегося в хвостах металла. Более низкие показатели для меди (~44%) объясняются тем, что металл присутствует в составе халькопирита. Относительно низкие показатели для кобальта (~41%) связаны, вероятно, с нахождением части металла в виде изоморфной примеси в магнетите.

### ***Разработка способа геотехнологической переработки некондиционных сульфидных рудных материалов, содержащих цветные металлы и железо***

Исследованные медно-никелевые природные и техногенные объекты продемонстрировали принципиальную возможность переработки методом кучного выщелачивания, при условии соответствующей предварительной подготовки.

Важнейшими параметрами физико-химических геотехнологий являются полнота перехода цветных металлов в металлосодержащий раствор, обеспечение селективного извлечения и снижение потерь цветных металлов, концентрируемых в обогащаемом слое. Принципиальная запатентованная схема приведена на рисунке 9. В нижней части сооружения размещают первое антифильтрационное основание 1 из глины или полиэтиленовой пленки для защиты от попадания металлосодержащих растворов в поверхностные и подземные воды. На основание 1 укладывают первый дренажный слой 2, состоящий из дробленых пород, например, вскрышных пород песчаной или гравийной крупности, не содержащих химически активных минералов. На дренажном слое 2 размещают выщелачиваемый слой 3 из некондиционного сульфидного рудного материала: отвальной медно-никелевой руды, гранулированных хвостов обогащения медно-никелевых руд. Присутствующий в рудном материале выщелачиваемого слоя пирротин используют в качестве минерала-интенсификатора растворения.

При использовании в качестве материала выщелачиваемого слоя отвальных медно-никелевых руд их дробят, классифицируют и укладывают послойно от крупных классов внизу к более мелким классам вверху. Если в качестве некондиционного медно-никелевого рудного материала выщелачиваемого слоя используют гранулированные хвосты обогащения медно-никелевых руд, их предварительно гранулируют до крупности гранул 1-3 см. При этом предпочтительно использовать фракции хвостов обогащения медно-никелевых руд +0.063 мм. Перед приготовлением гранул хвосты обогащения медно-никелевых руд доизмельчают до крупности -0.040 мм для лучшего раскрытия сульфидных зерен, а в качестве связующего используют портландцемент в количестве 3-5%.

Активирование выщелачиваемого слоя осуществляют с использованием перфорированного приспособления 4, соединенного с напорной емкостью 5. В качестве выщелачивающего раствора используют воду или 1-4% серную кислоту. Металлосодержащий раствор из дренажного слоя 2 поступает в первый зумпф 6, в котором при необходимости производят корректировку pH, откуда раствор подается в цементатор 7. В случае недостаточной концентрации меди металлосодержащий раствор из зумпфа 6 подается на вход выщелачиваемого слоя 3 по трубопроводу 8. В емкости 9 цементационная медь отделяется от металлосодержащего раствора, который поступает во второй зумпф 10. Из зумпфа 10 металлосодержащий раствор перекачивается в реактор 11, куда подается карбонатит и при перемешивании осуществляется селективное осаждение железа в виде его гидроксида. Полученный железосодержащий осадок

отделяют и утилизируют, например, в производстве строительных материалов. Очищенный от железа металлосодержащий раствор поступает в третий зумпф 12, откуда он подается в обогащаемый слой 13, состоящий из слоистых гидросиликатов или смеси активного кремнезема с карбонатитом. В случае низкой концентрации никеля и кобальта металлосодержащий раствор из третьего зумпфа 12 перекачивается на орошение выщелачиваемого слоя 3 по трубопроводу 8.

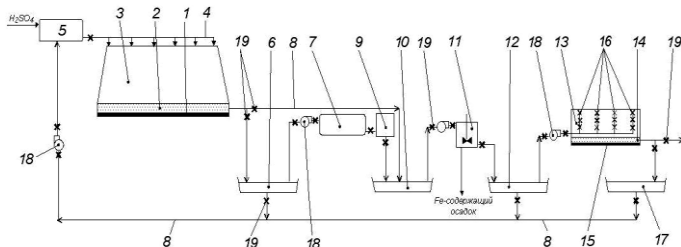


Рис. 9 – Схема геотехнологической переработки некондиционного сульфидного рудного материала. Цифрами обозначены: 1, 15 – антифильтрационное основание; 2, 14 – дренажный слой; 3 – выщелачиваемый слой; 4 – устройство орошения; 5 – напорная емкость; 6, 10, 12, 17 – зумпф; 7 – цементатор; 8 – магистральный трубопровод; 9 – накопительная емкость; 11 – реактор; 13 – обогащаемый слой; 16 – перфорированные трубопроводы; 18 – насосы; 19 – запорные вентили.

Обогащаемый слой 13 размещают на втором дренажном слое 14, который располагают на втором антифильтрационном основании 15. Подачу никель-кобальтсодержащего раствора осуществляют снизу вверх через расположенные вертикально в материале обогащаемого слоя 13 перфорированные трубопроводы 16. Отработанный раствор, практически не содержащий никеля и кобальта, поступает во второй дренажный слой 14 и оттуда в четвертый зумпф 17. Из четвертого зумпфа 17 отработанный раствор либо отправляют на сброс, либо на вход выщелачиваемого слоя 3, через емкость 5, где производят корректировку раствора. Участки извлечения меди и осаждения железа соединены друг с другом и выщелачиваемым 3 и обогащаемым 13 слоями посредством трубопроводов 8, снабженных насосами 18 и запорными вентилями 19. Полученный никель-кобальтовый продукт направляют на переработку известными гидрометаллургическими способами. После завершения растворения сульфидов отработанный выщелачиваемый слой 3 может быть использован в строительстве в качестве заполнителя или переработан в строительные материалы.

### Заключение

В диссертации на основании выполненных автором исследований решена актуальная задача научного обоснования и разработки способов, комбинированных методов, обеспечивающих повышение извлечения цветных металлов и вовлечение в переработку некондиционных медно-никелевых руд и отходов горно-металлургического комплекса.

1) Исследованы особенности и выявлены закономерности окисления и изменения поверхностных свойств сульфидных минералов медно-никелевых руд на различных стадиях горно-металлургического производства.

Установлено, что контакт шахтных вод с медно-никелевой рудой приводит к окислению сульфидов и сопровождается интенсивным образованием сульфатов. Химически активные нерудные минералы и устойчивая щелочная реакция растворов обеспечивают осаждение тяжелых металлов гидроксидами железа и гидросиликатами магния, что существенно снижает потенциальную экологическую опасность шахтных вод рудника «Северный» АО «Кольская ГМК».

При хранении вскрышных пород ТМ «Отвалы Аллареченского месторождения» наиболее интенсивно происходит окисление пирротина с образованием свободной серной кислоты, которая воздействует, прежде всего, на пентландит с образованием виоларита, увеличением пористости рудосодержащих пород и повышении скорости выветривания. Важную роль в процессах разрушения руд играет естественное бактериальное выщелачивание. Диагностированы новообразованные сульфиды и сульфаты никеля, кобальта и меди. В результате AMD на прилегающих территориях наблюдается прогрессирующая деградация экосистем.

Лабораторным моделированием установлено интенсивное выщелачивание цветных металлов и железа, как из отвальных гранулированных шлаков текущего производства комбината «Печенганикель» АО «Кольская ГМК», так и из лежалых шлаков. Установлены отличия лежалых шлаков, связанные с гипергенными процессами.

2) Изученные некондиционные медно-никелевые руды, хвосты обогащения и отвальные шлаки ранжированы по степени потенциальной экологической опасности. Отвалы Аллареченского месторождения характеризуются высокой опасностью и интенсивной миграцией тяжелых металлов (NAP, результирующий кислотопродуцирующий потенциал, +104.37), медно-никелевые руды Мончеплутона – средней (NAP +36.51), хвосты обогащения и отвальные гранулированные шлаки – умеренной опасностью (NAP +5.35 и +4.84 соответственно). Определяющими факторами подвижности тяжелых металлов образующихся при окислении сульфидов являются состав нерудных минералов (силикатной матрицы), pH и ОВП поровых растворов, подверженность воздействию атмосферных агентов выветривания (кислотных дождей).

3) Исследована возможность флотационного извлечения цветных металлов из отвальных хвостов обогащения медно-никелевых руд текущего производства и последующее атмосферное выщелачивание полученного флотационного концентрата. При извлечении никеля 33-34 %, меди 47-48 % содержания металлов составили 0.44-0.67 и 0.2-0.3 % соответственно. Для более полного извлечения рудных минералов в концентрат необходимо совершенствование схем флотации, более тонкое измельчение и применение селективной флокуляции сульфидов. Определены оптимальные параметры процесса моделирующего чановое выщелачивание: концентрация серной кислоты 15%, время выщелачивания 5-6 часов, температура 80 °С, отношение Т : Ж = 1:5, скорость перемешивания 900 мин<sup>-1</sup> с использованием в качестве окислителя ионов трехвалентного железа и с введением затравки в виде аморфного кремнезема.

4) Изучена флотация гранулированных шлаков медно-никелевого производства. Установлено, что предварительное ЭИД шлака с последующим измельчением до 100 % -40 мкм позволяет обеспечить прирост извлечений цветных металлов в концентрат на 14-20%.

5) Проведены минералого-технологические исследования бедных медно-никелевых руд Мончеплутона: месторождений Нюд-II и Морошковое озеро, а также

вскрышных пород отвала Аллареченского месторождения. Установлено, что руды могут быть переработаны методом кучного выщелачивания. Для интенсификации процесса целесообразен процесс агломерации, в котором серная кислота используется в качестве связующего. Показано, что сернокислотная агломерация измельченных руд приводит к существенному улучшению показателей выщелачивания некондиционных медно-никелевых руд Мончеплутона (месторождений Морошковое озеро, НКТ и Нюд Терраса). Интенсивности выщелачивания никеля и меди составили, соответственно (% в сутки): 1.87 и 0.13 (Морошковое озеро); 0.97 и 0.24 (НКТ); 0.32 и 0.06 (Нюд Терраса). При увеличении концентрации кислоты применяемой в процессе окомкования возможно последующее водное выщелачивание с оборотом растворов.

6) Проведено перколяционное выщелачивание агломерированных хвостов обогащения медно-никелевых руд и шлаков серной кислотой концентрацией 1-3%. Показано, что за 110 суток в раствор из хвостов обогащения извлекается более 60 % никеля при использовании 1 % серной кислоты. Интенсивности выщелачивания металлов из хвостов в сутки составили, %: никель 0.55, кобальт 0.37, медь 0.40; из шлаков, %: никель 0.16, кобальт 0.08, медь 0.05.

7) На основе экспериментальных исследований и физико-химического моделирования разработан способ геотехнологической переработки некондиционного медно-никелевого рудного материала. Способ позволяет получить селективные товарные продукты меди, а также никеля и кобальта и выделить железо в отдельный продукт при снижении потерь цветных металлов и обеспечении высокой степени извлечения металлов в металлосодержащий раствор.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

##### **Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Светлов, А. В. Исследование выщелачивания вкрапленных медно-никелевых руд при их взаимодействии с шахтными водами / А. В. Светлов, Д. В. Макаров, С. С. Потапов, Д. А. Некипелов, С. Г. Селезнев, В. А. Маслобоев // Вестник МГТУ. – 2017. – № 1/2. – С. 165-176.

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

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

4. Макаров, Д. В. Исследование экологической опасности и потенциальной возможности извлечения полезных компонентов из гранулированных шлаков комбината «Печенганикель» ОАО «КОЛЬСКАЯ ГМК» / Д. В. Макаров, Д. С. Потапов, С. С. Потапов, А. В. Светлов // Экология промышленного производства. – 2013. – № 2 (82). – С. 54-58.

5. Макаров, Д. В. Использование геохимических барьеров в технологиях очистки сточных вод и доизвлечения цветных металлов / Д. В. Макаров, В. А.

Маслобоев, Д. П. Нестеров, А. В. Светлов, Ю. П. Меньшиков, Е. А. Корнева, Ю. Л. Баюрова // Экология промышленного производства. – 2012. – №2. – С. 43-46.

6. Маслобоев, В. А. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд / В. А. Маслобоев, С. Г. Селезнев, Д. В. Макаров, А. В. Светлов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – №3. – С. 138-153.

7. Masloboev, V. A. Geocological validation of mechanisms and parameters of physical-chemical processes facilitating the in-depth processing of complex sulphide ores and mining wastes / V. A. Masloboev, D. V. Makarov, D. P. Nesterov, S. I. Mazukhina, I. V. Bocharova, Yu. P. Menshikov, A. V. Svetlov // Proceeding of the Murmansk State Technical University. – 2012. – N2. – P. 361-368.

#### **Рецензируемые издания (Scopus и Web of Science):**

8. Svetlov, A. Heap leaching and perspectives of bioleaching technology for the processing of low-grade copper-nickel sulfide ores in Murmansk region, Russia / A. Svetlov, D. Makarov, E. Selivanova, V. Masloboev, D. Nesterov // Journal of the Polish Mineral Engineering Society. – 2017. – № 1 (39). – P. 51-57.

9. Svetlov, A. Perspectives for heap leaching of non-ferrous metals (Murmansk Region, Russia) / A. Svetlov, E. Kravchenko, E. Selivanova, E. Seleznev, D. Nesterov, D. Makarov, V. Masloboev // Journal of the Polish Mineral Engineering Society (Inzynieria Mineralna). – 2015. – № 2 (36). – P. 231-236.

#### **Патент РФ на изобретение**

Патент РФ №2502869. Способ геотехнологической переработки некондиционного сульфидного рудного материала, содержащего цветные металлы и железо / В. А. Чантурия, В. А. Маслобоев, Д. В. Макаров, Д. П. Нестеров, С. И. Мазухина, А. В. Светлов. – Оpubл. 27.12.2013

#### **Материалы международных, всероссийских и региональных конференций:**

1. Мазухина, С. И. Моделирование процессов осаждения меди и железа из растворов выщелачивания / С. И. Мазухина, А. В. Светлов, Д. В. Макаров, В. А. Маслобоев // XII научный семинар «Минералогия техногенеза», Миасс: ИМин УрО РАН. – 2011, – С. 174-185.

2. Мазухина, С. И. Моделирование процессов цементации меди в физико-химических геотехнологиях / С. И. Мазухина, Д. В. Макаров, А. В. Светлов, В. А. Маслобоев // VIII Всероссийская Фермановская научная сессия «Минералогия, петрология и полезные ископаемые Кольского региона», Апатиты: КНЦ РАН. – 2011. – С. 264-268.

3. Потапов, С. С. Минералого-геохимические особенности гранулированных шлаков медно-никелевого производства после процедуры электро-импульсного дробления. Методические подходы для повышения обогатимости шлаков как потенциального техногенного сырья / С. С. Потапов, Д. В. Макаров, А. В. Светлов, Д. С. Потапов, Ю. В. Ерохин, А. С. Потокин // «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» (Плаксинские чтения 2015). – 2015. – С. 420-422.

4. Светлов, А. В. Оценка экологической опасности и разработка обогатительно-гидрометаллургических процессов переработки медно-никелевых техногенных образований / А. В. Светлов // VI Всероссийская научная конференция с

международным участием «ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ», Апатиты: КНЦ РАН. – 2016. – С. 261-265.

5. Светлов, А. В. Использование обогатительно-гидрометаллургических процессов для переработки медно-никелевых техногенных образований / А. В. Светлов // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения – 2016). – 2016 г. – С. 648-649.

6. Светлов, А. В. Выщелачивание цветных металлов из бедных медно-никелевых руд и техногенного сырья / А. В. Светлов, Е. А. Кравченко, Е. А. Селиванова, С. Г. Селезнев, Д. В. Макаров, В. А. Маслобоев // «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» (Плаксинские чтения 2015). – 2015. – С. 434-437.

7. Светлов, А. В. Моделирование кучного выщелачивания цветных металлов из природных и техногенных объектов Мурманской области / А. В. Светлов, Е. А. Кравченко, Е. А. Селиванова, С. Г. Селезнев, Д. В. Макаров, В. А. Маслобоев // XII Всероссийская Фермановская научная сессия «Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона», Апатиты: К & М. – 2015. – С. 377-380.

8. Светлов, А. В. Исследования гипергенеза сульфидных минералов некоторых природных и техногенных месторождений медно-никелевых руд Мурманской области / А. В. Светлов, Е. А. Кравченко, Е. // 11 Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», М: ИПКОН РАН. – 2014. – С. 344-347.

9. Светлов, А. В. Техногенные отходы комбината «Печенганикель» ОАО «Кольская ГМК»: Экологическая опасность и возможности извлечения полезных компонентов / А. В. Светлов, Д. С. Потапов // 10 Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», М: ИПКОН РАН. – 2013. – С. 305-308.

10. Селезнев, С. Г. Возможности извлечения цветных металлов из техногенных месторождений Мурманской области / С. Г. Селезнев, А. В. Светлов, Д. В. Макаров, В. А. Маслобоев // «Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения - 2014), Казахстан, г. Алматы. – 2014. – С. 370-372.

11. Svetlov, A. A study of interaction of mine drainage waters with impregnated copper-nickel ores / A. Svetlov, D. Makarov, S. Potapov, D. Nekipelov, S. Seleznev, N. Parshina, V. Masloboev // XXI International Conference on Environment and Mineral Processing, VŠB – TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA, Czech Republic. – 2017. – P. 177-183.

12. Svetlov, A. Heap leaching and perspectives of bioleaching technology for the processing of low-grade copper-nickel sulfide ores in Murmansk region, Russia / A. Svetlov, S. Seleznev, D. Makarov, E. Selivanova, V. Masloboev, D. Nesterov // XX International Conference on Environment and Mineral Processing, VŠB – TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA, Czech Republic. – 2016. – P. 291-297.

13. Svetlov, A. Possibilities for heap leaching of non-ferrous metals from low-grade copper-nickel raw materials in Murmansk region, Russia / A. Svetlov, E. Kravchenko, E. Selivanova, S. Seleznev, D. Nesterov, D. Makarov, V. Masloboev // XIX International Conference on Environment and Mineral Processing, VŠB – TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA, Czech Republic. – 2015, – №1 – P. 47-52.

14. Svetlov, A. Technologies and possibilities of extracting non-ferrous metals from waste deposits (by the example of industrial sites in the Murmansk region) / A. Svetlov, E. Krasavtseva, S. Seleznev, D. Makarov, V. Masloboev // XVIII International Conference on Environment and Mineral Processing & Exhibition, VŠB – TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA, Czech Republic. – 2014. – №1 – P. 169-174.