

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Светлова Антона Викторовича «Научное и экспериментальное обоснование методов повышения извлечения цветных металлов из некондиционных медно-никелевых руд и техногенного сырья», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Актуальность темы выполненной работы

В Мурманской области расположены крупные горно-обогатительные и металлургические предприятия. Объем горнопромышленных отходов в регионе составляет около 8 млрд т, и ежегодно складывается более 150 млн. т. Это отвалы горной добычи, хвосты обогащения и металлургические шлаки. Имеются также значительные запасы забалансовых руд.

Существенная часть этих материалов содержит сульфиды цветных металлов, прежде всего меди и никеля, а также сульфиды железа.

Сульфидсодержащие отходы обладают экологической опасностью, так как в процессе хранения окисляются с образованием серной кислоты и водорастворимых солей тяжелых металлов.

Отходы и забалансовые руды, по сравнению с рядовыми рудами, имеют низкие содержания цветных металлов. Но вместе с тем, общие запасы цветных металлов в этих материалах значительны. Кроме того, при обогащении основного медно-никелевого сырья региона - вкрапленных медно-никелевых руд, с хвостами обогащения теряется около 25 % никеля и 15% меди, потери кобальта достигают до 40%,

В связи с ожидаемым в относительно недалеком будущем исчерпанием запасов богатых медно-никелевых руд в целом по миру, вовлечение в переработку сырья, считающегося в настоящее время некондиционным, станет необходимостью.

В настоящее время в мире активно развиваются комбинированные обогатительно-гидрометаллургические методы переработки бедного и упорного природного и техногенного сырья цветных металлов, прежде всего меди, в том числе кучным выщелачиванием. Кучное выщелачивание никеля пока находится в основном на стадии изучения процесса в лабораторном и опытно-промышленных масштабах.

Обеспечение устойчивого развития России во многом связано с промышленным развитием Арктической зоны, в чем большая роль принадлежит минерально-сырьевому комплексу.

Тема представленной работы связана с решением экологических проблем, создаваемых сульфидными отходами, с обоснованием путей извлечения никеля, меди, кобальта из некондиционного техногенного и природного сульфидного медно-никелевого сырья, находится в мировом тренде развития технологий добычи

цветных металлов, а также обосновывает возможность создания новых производств в арктической зоне России, прежде всего на Кольском полуострове.

Таким образом, тема диссертационной работы весьма актуальна.

Новизна исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций

В работе выявлены различия закономерностей окисления и изменения свойств сульфидных минералов, характерные для разных видов отходов медно-никелевого производства при их хранении:

Для отвалов некондиционных медно-никелевых руд и хвостов обогащения характерно 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 опережающем окислении пирротина и последующим переходом цветных металлов из их сульфидов в растворимые формы.

Для хвостов обогащения медно-никелевых руд характерна стадия, заключающаяся в миграции сульфатных растворов и их взаимодействии с серпентинами и хлоритами и сопровождающаяся повышением рН и осаждением цветных металлов в составе слоистых гидросиликатов и гидроксидов.

Для отвальных гранулированных шлаков руднотермической плавки гальванические взаимодействия с у л ь ф и д о в оказывают минимальное влияние на кинетику окисления, так как сульфиды представлены пентландитом с различным соотношением железа и цветных металлов. Умеренный кислотопродуцирующий потенциал +4.84 и нахождение сульфидных включений в силикатной оболочке состава оливинового стекла определяют низкую скорость окисления.

В результате изучения и обобщения данных литературных источников, ранее проведенных работ, собственных исследований разработаны критерии пригодности природного и техногенного медно-никелевого сырья к переработке геотехнологическими методами, основанные на содержании продуцирующего 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 отнесены объекты, характеризующиеся инертными нерудными минералами и не снижающие фильтрационных характеристик (отвалы Аллареченского месторождения, некондиционные руды месторождений НКТ, Нюд II и Морошковое озеро);

К наименее благоприятным объектам отнесены с низкими фильтрационными характеристиками и повышенным расходом серной кислоты из-за наличия серпентинов и хлоритов, (хвосты обогащения медно-никелевых

руд Печенгского рудного поля) а также из-за потерь фильтрационных свойств при выщелачивании (отвальные гранулированные шлаки) .

В работе теоретически и экспериментально обоснованы направления интенсификации комбинированных обогатительно- металлургических и геотехнологических методов доизвлечения цветных металлов из некондиционного медно-никелевого сульфидного сырья:

Интенсификация флотации применением предварительного электроимпульсного дробления гранул с целью межфазных разрушений минеральных сростков и выделения сульфидной части с последующим измельчением до 100% класса -40 мкм (для флотации отвалных шлаков)

Интенсификация кучного выщелачивания и повышение извлечений цветных металлов благодаря улучшению раскрытия сульфидных сростков путем измельчения до -1+0 мм, сернокислотной агломерации с последующим выщелачиванием 1%-ной серной кислотой (для некондиционных руд месторождений НКТ, Нюд II, Морошковое озеро и Нюд Терраса);

Интенсификация кучного выщелачивания и повышение извлечений цветных металлов с благодаря улучшению перколяционных свойств путем сернокислотной агломерации 10%-ной кислотой при соотношении Т : Ж = 3 : 1, с последующим выщелачиванием 1%-ной серной кислотой (для хвостов обогащения медно-никелевых руд).

К новому также можно отнести предварительные исследования по интенсификации процессов выщелачивания путем электрохимической обработки выщелачивающих растворов. В работе получены новые данные о закономерностях состояния жидкой фазы выщелачивания при цементации меди. Для этого проведено компьютерное моделирование химического равновесия при взаимодействии железа и раствора сульфата меди в зависимости от степени взаимодействия железа с раствором серной кислоты (в закрытой к атмосфере системе), а также в зависимости от степени открытости системы к атмосфере. Определены компьютерным моделированием количественные закономерности процесса взаимодействия железа и раствора сульфата меди в цементаторе в динамическом режиме.

Значимость для науки и производства полученных результатов

В настоящее время, когда цены на металлы определяются пока еще имеющейся достаточно благоприятной рудной базой, переработка лишь небольшого набора техногенного и природного некондиционного сырья может быть экономически эффективной. Но в будущем без этого сырья не обойтись.

Поэтому важной научной задачей, как это и отмечает автор, здесь, является выполнение комплексных исследований по группам отходов для определения перспективных направлений научных исследований, результатами – которых

должны стать практические технологии извлечения ценных компонентов из горнопромышленных отходов.

Заметный вклад в решение данной задачи, в рамках различных видов некондиционного техногенного и природного сульфидного медно-никелевого сырья Мурманской области, вносит рассматриваемая диссертация.

Разработанные критерии пригодности сырья к переработке комбинированными обогатительно-металлургическими и геотехнологическими методами применены автором для некондиционного техногенного и природного медно-никелевого сульфидного сырья Мурманской области, в результате получена классификация ряда конкретных сырьевых объектов по пригодности к использованию.

Автором предложено, для доизвлечения цветных металлов из хвостов обогащения медно-никелевых руд и отвальных гранулированных шлаков, использование флотации, 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 измельчением до 100 % -40 мкм, что обеспечивает прирост извлечений цветных металлов и позволяет получить концентраты, пригодные для дальнейшей гидрометаллургической переработки.

Разработан геотехнологический способ переработки некондиционных медно-никелевых руд, хвостов обогащения и шлаков, который обеспечивает высокую степень извлечения металлов в продуктивный раствор за счет интенсификации процесса кучного выщелачивания путем сернокислотной агломерации, приводящей к раскрытию сульфидных сростков, образованию трещин и улучшению доступа выщелачивающих растворов. Способ позволяет получить селективные продукты меди, никеля и кобальта, выделить железо в отдельный продукт и снизить потери цветных металлов. На способ получен патент РФ.

В работе приведены данные по цепи аппаратов установки для реализации предложенного способа.

Предложенный автором способ позволяет вовлечь в переработку ряд некондиционных сырьевых техногенных и природных объектов медно-никелевого сульфидного сырья Мурманской области.

Для изучения других имеющихся в России аналогичных сырьевых объектов природного и техногенного происхождения, содержащих сульфиды цветных металлов, могут быть применены разработанные автором методики лабораторного моделирования окислительных процессов, изучения изменения технологических свойств минералов при хранении в составе техногенного сырья, исследования возможности извлечения цветных металлов.

Степень обоснованности и достоверности каждого научного положения, выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации

Автором изучено и проанализировано значительное количество литературных источников, касающихся всех аспектов темы диссертации. На основании анализа источников автором логично сформулированы цель и задачи исследований.

Автором выполнен большой объем экспериментальных исследований, достаточный для решения задач, поставленных перед диссертационной работой. Для проведения экспериментов в работе использованы современные методы.

Разработанные автором методики исследования корректны. Экспериментальные исследования перехода металлов в растворы проводились в статических и динамических режимах. Для анализа материалов автор применял рентгенофазовый анализ, инфракрасную спектроскопию, атомно-абсорбционный анализ и сканирующую электронную микроскопию. Выполнялись также микроскопические исследования - сканирующая электронная микроскопия и оптическая микроскопия.

Все указанные методы исследований осуществлялись с применением современного сертифицированного оборудования, в том числе компьютеризированного, надежных производителей.

Статистическую и математическую обработку данных производили с использованием Microsoft Excel и пакета STATISTICA.

Для компьютерного моделирования физико-химических процессов использовался программный комплекс «Селектор», оснащенный модулем формирования моделей различной сложности и системой встроенных баз термодинамических данных, включающих свыше 15000 химических соединений. При расчете равновесного состояния системы имитируются стационарные процессы с учетом условий массопереноса, вклада сопряженных стадий процесса и кинетических ограничений системы.

Автор, обладая хорошими естественнонаучными знаниями, корректно интерпретирует экспериментальные данные, с использованием литературных сведений по изучаемой проблеме, обобщает информацию, логично и непротиворечиво делает выводы. В работе отсутствуют противоречия, неясности.

В результате все сформулированные автором научные положения полностью обоснованы экспериментально и теоретически, не находятся в противоречии с уже известными имеющимися научными и практическими данными, и могут быть приняты научным сообществом.

Таким образом, достоверность полученных экспериментальных данных, сформулированных научных положений, сделанных автором выводов и заключений сомнений не вызывает.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям

Представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертация содержит новые научные результаты и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации содержатся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, всего 10 публикаций, в том числе 1 патент РФ

В диссертации имеются ссылки на источник заимствования отдельных результатов и соисполнителя совместных работ. Личный вклад автора в диссертации обозначен.

Таким образом, представленная работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней

Основные достоинства и недостатки по содержанию диссертации

Основным достоинством работы является ее нацеленность на решение проблемы переработки некондиционного сульфидного техногенного и природного сырья Мурманской области в комплексе. Автору удалось соблюсти единый технологический подход ко всем объектам. Но при этом, благодаря разработанным критериям и проведенной на их базе классификации сырьевых объектов, а также благодаря системным технологическим исследованиям по каждому объекту, автору удалось для каждого объекта подобрать необходимые различные условия подготовки материала для кучного выщелачивания, а в ряде случаев – рекомендовать предварительное флотационное обогащение. Таким образом, при различающейся подготовке материала к кучному выщелачиванию и некотором варьировании режимов самого выщелачивания, в целом для переработки может быть применена практически одна и та же цепочка аппаратов.

Весьма важным достоинством работы является подробное обоснование, на базе многих источников, возможность осуществления процессов кучного выщелачивания в условиях Арктики.

К достоинству работы также можно отнести хороший стиль изложения, все формулировки автора понятны.

К недостаткам работы можно отнести недостаточное количество табличного материала по результатам технологических опытов. На графиках или в тексте извлечения приведены, но таблицы балансов, содержащие характеристики как

продуктов, так и исходного материала, были бы нагляднее. Однако понятно, что это вызвано стремлением не увеличивать объем диссертации.

По работе имеются замечания:

В главе 3 имеется несоответствие данных по содержанию меди и никеля в отвалах Аллареченского месторождения. В п. 3.2 указано, что содержание никеля составляло 0,35 %, меди 0,33 %. В п. 3.5 в таблице 3.2 указаны содержания никеля 1.57 % и меди 1.34 %.

В ходе обсуждения результатов выщелачивания вкрапленных медно-никелевых руд шахтными водами автором утверждается, что низкие концентрации металлов в растворе в ходе выщелачивания связаны с повышением щелочности, и, как следствие, с осаждением аморфных гидроксидов железа, которые являются сорбентами тяжелых металлов, а также с ионообменными реакциями с серпентинами. Однако по данным рисунка 3.3, на пятые сутки при выщелачивании в статическом режиме, после ранее происходившего повышения концентрации никеля в растворе, происходит ее резкое снижение, с последующим ее повышением, более или менее резким. При этом рН закономерно снижается после первых суток. Данный факт не вполне согласуется с предложенным автором объяснением.

Автором производится сопоставление результатов выщелачивания отвалов Аллареченского месторождения и шлаков (текущего производства и лежалых) только кислотой (раствор 2 %) и сочетанием данного раствора кислоты с окислителем – трехвалентным железом. При этом результаты по извлечению с окислителем и без него практически одни и те же, автор даже обращает внимание на ухудшение извлечения при применении окислителя для выщелачивания отвалов Аллареченского месторождения (раздел 5.2). Однако расходы окислителя составляли 80 г/т, что при соотношении Т:Ж 1:5 соответствует исходной концентрации вводимого трехвалентного железа 16 мг/л. Данная концентрация по крайней мере на два порядка меньше, чем обычно используемая при окислительном выщелачивании сульфидов и вряд ли оказывает какое-либо реальное воздействие на процесс окисления.

В разделе 4.1 имеется несоответствие. Приводя результаты исследований по выщелачиванию флотационного концентрата, полученного из хвостов обогащения вкрапленной медно-никелевой руды, автор утверждает, что лучшие показатели достигнуты при использовании в качестве окислителя ионов трехвалентного железа (стр. 99), но не приводит концентрацию или расход окислителя. Далее, на стр. 100, автор приводит оптимальные условия выщелачивания вообще без упоминания окислителя.

Автором при описании проведенных исследований по выщелачиванию почти нигде (за исключением части, связанной с электрохимической обработкой)

не приводятся значения окислительно-восстановительного потенциала жидкой фазы.

Приведенные замечания не снижают ни научную, ни практическую ценность работы.

Исследования, проведенные автором, имеют безусловную перспективу продолжения работ, прежде всего силами коллектива Института проблем промышленной экологии Кольского научного центра Российской академии наук.

Мнение о научной работе соискателя в целом

Диссертация «Научное и экспериментальное обоснование методов повышения извлечения цветных металлов из некондиционных медно-никелевых руд и техногенного сырья», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых», удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту данной специальности. Автор представленной диссертации, Светлов Антон Викторович, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых».

Профессор кафедры
обогащения и переработки
полезных ископаемых
и техногенного сырья
НИТУ «МИСиС»

Шехирев Д.В.

Подпись Шехирева Д.В. заверяю

Проректор по науке и инновациям

«18» янв. 2019



М.Р. Филонов

**Список научных трудов
профессора кафедры «Обогащение и переработка полезных ископаемых
и техногенного сырья»
НИТУ «МИСиС»
Шехирева Дмитрия Витальевича
(за период 2009-2016 гг.)**

№ п/п	Наименование работы и ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем в а. печ. л.	Соавторы
1	2	3	4	5	6
а) научные работы					
1.	Модель расслоения смеси минералов различной плотности в стесненных условиях и ее экспериментальная проверка (статья)	Печ.	Журнал «Цветные металлы». 2009. № 4. С. 31-34.	$\frac{0,25}{0,13}$	Туробова О.Н.
2.	Аппроксимация зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления движению сферических частиц от их параметра Рейнольдса для стесненного движения (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2009. № 1. С. 36-38.	$\frac{0,18}{0,09}$	Туробова О.Н.
3.	Требования к разработке пневматических флотационных машин типа реактор-сепаратор (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2009. № 5. С. 31-35.	$\frac{0,31}{0,07}$	Самыгин В.Д., Филиппов Л.О., Стенин Н.Ю.
4.	Двухскоростной разделительный массоперенос в рабочих зонах флотомашин с различными сочетаниями степени перемешивания и направлений потоков разделяемых частиц (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2010. № 4. С. 36-43.	$\frac{0,43}{0,43}$	
5.	Феноменологический смысл эффективности разделения по Ханкоку-	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2010. № 2.	$\frac{0,31}{0,11}$	Думов А.М., Стрижко В.С.

№ п/п	Наименование работы и ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем в а. печ. л.	Соавторы
5.	Феноменологический смысл эффективности разделения по Ханкоку-Луйкену и дополнительный критерий эффективности (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2010. № 2. С. 31-35.	$\frac{0,31}{0,11}$	Думов А.М., Стрижко В.С.
6.	Кинетика и селективность измельчения медно-никелевой руды в барабанных мельницах (статья)	Печ.	Журнал «Цветные металлы». 2011. № 6. С. 11-15.	$\frac{0,31}{0,07}$	Краснов Г.Д., Ракаев А.И., Чихладзе В.В.
7.	К оценке селективности разрушения руд (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2011. № 4. С. 3-7	$\frac{0,31}{0,11}$	Краснов Г.Д., Чихладзе В.В.
8.	Исследование закономерностей работы пневмогидравлического струйно-эжекторного аэратора	Печ.	Научный вестник Московского государственного горного университета. 2013. № 4. С. 64-69.	$\frac{0,37}{0,12}$	Мельникова С.А., Думов А.М.
9.	О книге В. В. Морозова, В. П. Топчаева, К. Я. Улитенко, Э. Ганбаатар, Л. Дэлгэрбат «Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых» (статья)	Печ.	Горный журнал. 2013. № 2. с. 126.	$\frac{0,06}{0,06}$	
10.	Автоматизированный минералогический анализ для обогатительных процессов (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2013. № 1 (343). С. 40-43.	$\frac{0,25}{0,06}$	Панькин А.В., Макавецкас А.Р.
11.	Связь обогатимости свинцово-цинковой руды с минеральным составом промпродуктов ее флотации (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2016. № 1. С. 33-39.	$\frac{0,25}{0,06}$	Смайлова А.Б., Думов А.М.

№ п/п	Наименование работы и ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем в а. печ. л.	Соавторы
12.	Кинетика извлечения частиц различного минерального состава в ходе флотации свинцово-цинковой руды (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2016. № 2. С. 20-26.	<u>0,25</u> 0,06	Смайлов Б.Б.
13.	Раскрытие галенита и сфалерита в процессе измельчения свинцово-цинковой руды (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2016. № 6. С. 25-31.	<u>0,25</u> 0,06	Смайлов Б.Б.? Думов А.М., Мураитов Д.
14.	Оценка обогатимости флотационным методом на основе анализа распределения по фракциям флотируемости (статья)	Печ.	Журнал «Обогащение руд». 2017. № 4. С. 28-35.	<u>0,25</u> 0,06	Смайлов Б.Б.? • Мураитов Д., Думов А.М.

Профессор НИТУ «МИСиС»



Д.В. Шехирев

Подпись Шехирева Д.В. заверяю
Проректор НИТУ «МИСиС» по науке и инновациям



М.Р. Филонов

« 18 » 01 20

