

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургии и обогащения полезных ископаемых

Омарова Салтанат Абуталиповна

Разработка комплексной технологии переработки хромитсодержащих  
шламов обогащения

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

6М070900 – «Металлургия»

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова




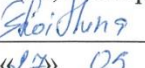

УДК 669.054.83

На правах рукописи

Омарова Салтанат Абуталиповна

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	Разработка комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения
Направление подготовки	6М070900 – «Металлургия»
Научный руководитель кандидат технических наук, ассоц. профессор  Н.К. Досмухамедов «14» 05 2019 г.	
Рецензент кандидат технических наук, технический директор ТОО «Alma Solution»  Б.С. Рахымбаев «16» 05 2019 г.	
Нормоконтролер PhD, лектор  Г.М. Койшина «15» 05 2019 г.	<b>ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ</b> Заведующий кафедрой МиОПИ, кандидат технических наук  М.Б. Барменшинова «30» 05 2019 г.

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический  
университет имени К.И. Сатпаева

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

6M070900 – Metallurgia



**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение магистерской диссертации**

Магистрант Омарова Салтанат Абуталиповна

Тема: Разработка комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения.

Утверждена приказом Ректора Университета № 1597-м. от «30» октября 2017 г.

Срок сдачи законченной диссертации «07» июня 2019 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: методики анализа и планирования эксперимента, литературные сведения.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) физико – химические исследования хромитсодержащих шламов обогащения

Донского ГОК;

б) разработка комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения;

в) полученные результаты исследований и выводы.

Перечень графического материала: демонстрационный материал с результатами исследований представлен на слайдах

Рекомендуемая основная литература:

1 Вольдман Г.М., Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов / М.: Интермет Инжиниринг, 2003 – 464 с.

2 Зеликман А. Н., Коршунов Б. Г. Metallurgia редких металлов / М.: Metallurgia, 1991. – 432 с.

- 3 Akar Sen G. Application of full factorial experimental design and response surface methodology for chromite beneficiation by Knelson concentrator // Minerals. –2016. Vol. 6, Iss. 1. –P.5-8.
- 4 Kumar C.R., Tripathy S.K., Rao D.S. Characterisation and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density separator // J. Miner. Mater. Charact. Eng.–2009. Vol. 8, Iss. 5. –P.367–378.
- 5 Tripathy S.K., Ramamurthy Y., Singh V. Recovery of chromite values from plant tailings by gravity concentration // J. Miner. Mater. Charact. Eng.–2011. Vol. 10, Iss. 1. –P.13–25.
- 6 Tripathy S.K., Banerjee P.K., Suresh N. Magnetic separation studies on ferruginous chromite fine to enhance Cr : Fe ratio // Int. J. Miner. Metall. Mater. – 2015. Vol. 22, Iss. 3. –P.217–224.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки предоставления научному руководителю	Примечание
Введение	05.02.2018	
Аналитический обзор литературы	12.02.2018	
Исследование физико-химических характеристик хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОК	23.06.2018	
Исследование сульфатизирующего обжига хромитсодержащего шлама в присутствии восстановителя	01.10.2018	
Разработка способов извлечения хрома, цветных и редкоземельных металлов в целевые продукты	11.02.2019	
Заключение	13.05.2019	

**Подписи**

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование раздела	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Г.М. Койшина PhD, лектор	24.05.19	<i>G.M. Koyshina</i>

Научный руководитель \_\_\_\_\_ *J. Jr.* \_\_\_\_\_ Н.К. Досмухамедов

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_ *S.A. Omarova* \_\_\_\_\_ С.А. Омарова

Дата \_\_\_\_\_ «30» октября 2014г.

## АҢДАТПА

Магистрлік диссертациялық жұмыс тапсырмадан, кіріспеден, 5 бөлімнен, қорытындыдан, әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыс қосымшалармен қоса отырып 95 бетте жазылып 36 сурет, 30 кестені біріктіреді. Әдебиеттер тізімі 26 атаудан тұрады.

Жұмыстың мақсаты – байытудан кейін құрамында хромит минералы бар шламдардан бағалы металдарды тауар өнімдеріне шығару және қайта өңдеудің кешенді технологиясын әзірлеу.

Жұмыста байыту процесінің хромит құрамды шламдарын хромит концентратын, түсті металдар концентраттарын, аморфты кремнезем және магний құрамды өнім алу үшін қайта өңдеу бойынша зерттеу жұмыстарының нәтижелері көрсетілген.

Келесі негізгі операцияларды қамтитын байытудан кейін құрамында хромит минералы бар шламдарын кешенді өңдеудің принципті технологиялық сұлба әзірленді:

- қатты қалпына келтіргіштің (көмірдің) қатысуымен құрамында хромит минералы бар шламдарды төмен температуралы сульфатизациялап күйдіру;

- хромды кекке өткізу үшін пісіріндіні сумен шаймалау және өнімдік ерітіндіні алу;

- хромит концентратын бөле отырып кекті сілтімен өңдеу;

- аморфты кремнезем алу үшін карбонизациялау;

- түсті металдар концентратын ала отырып бейтараптандыру;

- қос тұз шөгіндісін ала отырып булау;

- магний сульфатын алу үшін күйдіру.

Қалпына келтіргіштің қатысуымен байытудан кейін құрамында хромит минералы бар шламды сульфатизациялап күйдірудің оңтайлы параметрлері анықталды. Хромды пісіріндіге жоғары дәрежеде бөліп алу процесінің тиімді көрсеткіштері анықталды: күйдіру температурасы – 500 °С, күйдіру ұзақтығы – 1 сағат, күкірт қышқылының бастапқы шлам салмағынан шығыны -100 %.

Тауар өнімдеріне бағалы элементтерді жоғары селективті бөліп алудың негізін құрайтын әрбір операцияның оңтайлы параметрлері тәжірибе жүзінде сыналды және анықталды.

## АННОТАЦИЯ

Настоящая магистерская диссертационная работа состоит из задания, введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Работа, включая приложения, изложена на 95 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 30 таблиц. Список литературы содержит 26 наименований.

Цель работы – разработка комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения с извлечением ценных металлов в товарные продукты.

В работе представлены результаты исследований по переработке хромитсодержащих шламов обогащения с получением хромитового концентрата, концентратов цветных металлов, аморфного кремнезема и магнийсодержащего продукта.

Разработана принципиальная технологическая схема комплексной переработки хромитсодержащих шламов обогащения, включающая следующие основные операции:

- низкотемпературный сульфатизирующий обжиг хромитсодержащих шламов в присутствии твердого восстановителя (угля);
- выщелачивание спека водой с выделением хрома в кек и получением производственного раствора;
- щелочную обработку кека с выделением хромитового концентрата;
- карбонизацию с получением аморфного кремнезема;
- нейтрализацию с получением концентрата цветных металлов;
- выпарку с получением осадка двойной соли;
- обжиг с получением сульфата магния.

Определены оптимальные параметры сульфатизирующего обжига хромитсодержащего шлама обогащения в присутствии восстановителя. Установлено, что высокое извлечение хрома в спек достигается при следующих оптимальных параметрах: температура обжига – 500 °С, продолжительность обжига – 1 час, расход серной кислоты – 100% от веса исходного шлама.

Экспериментально отработаны и установлены оптимальные параметры каждой операции, составляющей основу высокого селективного извлечения ценных элементов в товарные продукты.

## ANNOTATION

This master's thesis work consists of tasks, introduction, 5 chapters, conclusion, bibliography. Work, including applications, presented by 95 pages of typewritten text contains 36 figures, 30 tables. References contain 26 items.

The aim of the work is to develop a comprehensive technology of processing chromite-containing sludges of enrichment with the extraction of valuable metals into marketable products.

The results of research on the processing chromite-containing sludges of enrichment with the production of chromite concentrate, non-ferrous metals concentrate, amorphous silica, and magnesium-containing product have been presented in the master dissertation.

The principled technological scheme for the complex processing of chromite-containing sludges of enrichment has been developed, which includes the following main operations:

- low-temperature sulfating roasting of chromite-containing sludges in the presence of a solid reducing agent (coal);
- leaching of the sinter with water with the release of chromium in the cake and obtaining a production solution;
- alkaline treatment of the cake with the release of chromite concentrate;
- carbonization with obtaining amorphous silica;
- neutralization with obtaining a concentrate of non-ferrous metals;
- residue with obtaining a precipitate of double salt;
- roasting with obtaining magnesium sulfate.

The optimal parameters of sulfating roasting of chromite-containing sludge enrichment in the presence of a reducing agent are determined. It was established that high extraction of chromium in the sintered is achieved by the following optimal parameters: firing temperature - 500 °C, firing duration - 1 hour, consumption of sulfuric acid – 100 % of the weight of the original sludge.

The optimal parameters of each operation experimentally tested and established, which forms the basis of high selective extraction of valuable elements into marketable products.



## Содержание

Введение	11
1 Аналитический обзор литературы	14
1.1 Современное состояние минерально-сырьевой базы хромовых руд	14
1.1.1 Теория и практика обогащения хромовых руд	16
1.1.2 Характеристика продуктов, получаемых на стадии обогащения хромовых руд	18
1.2 Способы извлечения хрома из хромитсодержащих шламов обогащения	20
1.3 Выбор и обоснование научного направления исследований	21
2 Исследование физико-химических характеристик хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОК	23
2.1 Методы исследования	23
2.2 Результаты исследований и их обсуждение	23
2.2.1 Изучение вещественного и фазового состава	24
2.2.2 Формы нахождения хрома, цветных металлов и железа	25
2.2.3 Фазовые превращения, протекающие при нагреве хромитсодержащего шлама	30
2.3 Расчет рационального состава хромитсодержащего шлама обогащения	31
3 Исследование сульфатизирующего обжига хромитсодержащего шлама в присутствии восстановителя	33
3.1 Особенности поведения хрома, магния, железа, цветных металлов, и РЗЭ при сульфатизирующем обжиге	33
3.1.1 Термодинамика сульфатизирующего обжига	33
3.1.2 Схема установки и методика проведения экспериментов	38
3.1.3 Результаты опытов и их обсуждение	39
3.2 Выбор и оптимизация технологических параметров выщелачивания хромитсодержащего спека водой	44
3.2.1 Методика проведения экспериментов	44
3.2.2 Результаты опытов и их обсуждение	45
3.2.3 Характеристика продуктов выщелачивания	51
3.2.4 Распределение металлов между продуктами выщелачивания	52
4 Разработка способов извлечения хрома, цветных и редкоземельных металлов в целевые продукты из продуктов выщелачивания	53
4.1 Способ переработки хромитсодержащего кека	53
4.1.1 Щелочной способ извлечения хрома в хромитовый концентрат	53
4.1.2 Извлечение диоксида кремния из раствора	56
4.2 Переработка производственного раствора выщелачивания	58
4.2.1 Извлечение цветных металлов и редкоземельных элементов в концентрат путем нейтрализации раствора гидроксидом аммония	58

4.2.2	Извлечение магния из производственного раствора, полученного после нейтрализации	60
5	Принципиальная технологическая схема комплексной переработки хромитсодержащих шламов обогащения	65
	Заключение	68
	Список использованной литературы	70
	Приложение А - Оттиски публикации по теме магистерской диссертации	72
	Приложение Б - Требования к химическому составу хромовых концентратов для ферросплавов	93

## ВВЕДЕНИЕ

Минерально-сырьевая база хромоворудной промышленности мира характеризуется высокой степенью концентрации: до 84 % мировых подтверждённых запасов хромитов сосредоточено в ЮАР, Казахстане и Зимбабве, ~4 % запасов приходится на Индию, Финляндию, Филиппины, Турцию и Албанию, 12 % - доля остальных стран [1, 2].

Территориальная структура мировой добычи товарной хромовой руды, в целом, аналогична структуре минерально-сырьевой базы. Почти 90 % производства, в основном, сосредоточено в пяти странах: ЮАР – 45,8 %, Казахстане – 18 %, Индии – 14,3 %, Турции – 6,9 % и Зимбабве – 4,4 % [3].

В мировом рынке хрома Казахстан представлен крупнейшим предприятием – АО «ТНК «Казхром», который занимает третье место по производству хромистых ферросплавов. В номенклатуру выпускаемых сплавов, помимо феррохрома всех марок, включая металлический хром, входят: высококремнистый ферросилиций, ферросиликохром, низкофосфористый силикомарганец.

Основным поставщиком сырья для АО «ТНК «Казхром» является Донской горно-обогатительный комбинат (Донской ГОК). По подтвержденным запасам эти месторождения занимают второе место в мире, а по высокому качеству сырья не имеют аналогов в мире. Часть руды импортируют страны дальнего зарубежья, главным потребителем из которых является Китай. Свыше 70% товарной руды Донской ГОК поставляет на ферросплавные заводы республики, с которыми комбинат находится в единой технологической цепи в составе АО «ТНК «Казхром».

Донской ГОК является самым крупным в мире по добыче и переработке хромового сырья. Годовой выпуск хромовой руды составляет ~20 % от общего мирового уровня производства.

*Актуальность.* Наблюдаемый общий тренд интенсивного развития хромового производства испытывает острую потребность в новых видах сырья, представляющих определенный интерес для выпуска базовой конечной продукции, увеличения производственных мощностей и комплексного извлечения сопутствующих ценных металлов. В этой связи актуальным представляется вовлечение на переработку накопленных на комбинате больших объемов шламовых хвостов обогащения (~15 млн. тонн). Использование данного материала в качестве дополнительного источника сырья для извлечения ценных металлов требует изыскания инновационных технологий, соответствующих современным требованиям – экологической безопасности, комплексности использования сырья и ее безотходности [4-6].

В научной литературе известно незначительное количество работ, посвященных решению данной проблемы [7-10]. Принципиальное решение задачи в разработанных технологиях сводилось, в основном, на получение исключительно одного товарного продукта – хромитового концентрата. Несмотря на высокую эффективность известных технологий можно выделить

ряд общих характерных недостатков: невысокая степень извлечения хрома, отсутствие данных по поведению ценных компонентов и магния, извлечение которого в магнийсодержащие товарные продукты методами обогащения затруднено.

Изыскание новых подходов и решений по комплексной переработке хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОКа с получением хромитового концентрата и попутным извлечением ценных сопутствующих компонентов усиливается с фактом востребованности, с точки зрения охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

*Цель работы* – разработка комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения с получением товарных продуктов

*Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:*

- исследованы физико-химические характеристики хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОК;

- изучены формы нахождения ценных металлов в хромитсодержащем шламе обогащения, установлены количественные соотношения металлов в исходном материале;

- исследованы термодинамические закономерности физико-химических процессов, протекающих при сульфатизирующем обжиге в присутствии твердого углерода;

- изучены оптимальные условия выщелачивания спеков и получения хромитового концентрата;

- исследованы пути и возможности получения аморфного кремнезема и селективного извлечения цветных металлов и магния в целевые товарные продукты с разработкой комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения.

*Объект исследования* – хромитсодержащий шлам обогащения Донского ГОК

*Научная новизна.* Установлены формы нахождения хрома, железа, цветных и редкоземельных металлов в хромитсодержащих шламах обогащения. Показано, что хром в основном представлен в форме хромпикатита (хромита) с высоким содержанием хрома (18,5 %).

На основании термодинамических расчетов реакций взаимодействия компонентов хрома, железа, магния, цветных и редкоземельных металлов с серной кислотой установлен механизм и определены оптимальные параметры сульфатизирующего обжига хромитсодержащего шлама обогащения в присутствии восстановителя. Установлено, что высокое извлечение хрома в спек (98 %) достигается при следующих оптимальных параметрах: температура обжига – 500 °С, продолжительность обжига – 1 час, расход серной кислоты – 100 % от веса исходного шлама.

Экспериментально отработаны и установлены оптимальные параметры каждой операции, составляющей основу селективного извлечения ценных элементов в товарные продукты.

Показана принципиальная возможность разделения хрома от других металлов в присутствии восстановителя (угля) с переводом хрома в осадок в виде нерастворимого кека и концентрированием магния, цветных металлов и РЗМ в растворе.

Основным *методологическим принципом* использованным в работе является термодинамический подход.

В работе широко использованы физико-химические исследования, лабораторные эксперименты, анализ и обработка полученных результатов. Методы анализа: химический, рентгенофлуоресцентный, рентгенофазовый, кристаллооптический и термический.

*Практическая значимость.* Разработана технологическая схема комплексной переработки хромитсодержащих шламов обогащения с получением товарных продуктов: хромитового концентрата, аморфного кремнезема, сульфата магния и концентрата цветных металлов, содержащих редкоземельные элементы.

Показана принципиальная возможность использования хромитсодержащих шламов обогащения в качестве источника дополнительного сырья для извлечения ценных металлов при минимальных материальных и энергетических затратах.

Применение разработанной технологии позволит расширить ассортимент выпускаемой продукции с высокой добавленной стоимостью.

## 1 Аналитический обзор литературы

### 1.1 Современное состояние минерально-сырьевой базы хромовых руд

*Характеристика хромовых руд.* Кларк хрома (по А.П. Виноградову) составляет 0,0083 %. Из более 20 хромсодержащих минералов в промышленном отношении важны только хромшпинелиды, которые служат в настоящее время единственным источником получения металлического хрома и продуктов его химических соединений. В группе хромшпинелидов  $(\text{Mg,Fe})^{2+}(\text{Cr,Al,Fe})_2^{3+}\text{O}_4$  наибольший интерес представляют минералы магнохромит  $(\text{Mg,Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$ , хромпикотит  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ , алюмохромит  $(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ , субферрихромит  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Fe})_2\text{O}_4$  и в меньшей степени субферриалюмохромит  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Fe,Al})_2\text{O}_4$ . Содержание оксидов в разновидностях хромшпинелидов колеблется в широких пределах: 2-67 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 2-65 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , до 41 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 10–30 %  $\text{FeO}$ , 1–20 %  $\text{MgO}$  [11].

По условиям образования выделяются эндогенные, экзогенные и техногенные месторождения хромовых руд.

Эндогенные месторождения хромовых руд относятся к группе магматических образований, пространственно и генетически связаны с гипербазитовыми интрузиями двух формаций: перидотит-пироксенит-габброноритовой расслоенных (стратиформных) массивов и дунит-гарцбуринотипных массивов.

К техногенным месторождениям относятся спец отвалы забалансовых руд, добытых в результате разработки месторождений хромовых руд, хромитсодержащие хвосты, образовавшиеся в процессе обогащения руд, содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в которых может достигать 30 % и выше. Эти месторождения требуют специфических подходов к их изучению.

*Мировое производство и потребление хрома.* Самые большие месторождения хрома находятся в Казахстане, ЮАР, России, Зимбабве, Мадагаскаре. Также есть месторождения на территории Турции, Индии, Армении, Бразилии, на Филиппинах. Главные месторождения хромовых руд в РФ известны на Урале (Донские и Сарановское). Запасы хромовой руды в 2012 году приведены в таблице 1 [12].

Казахстан занимает первое место в мире по разведанным запасам хрома и обеспечивает 15 % мирового объема их добычи. Государственным балансом учтены запасы по 20 месторождениям, 91 % из которых эксплуатируется. В Казахстане 99 % месторождений хрома встречается в Мугоджарских горах. Большой известностью пользуются Кемпирсайская и Донская группы месторождений, содержащие высококачественные руды. Месторождения хромитов также открыты в Костанайской и Восточно-Казахстанской области.

Таблица 1 - Запасы хромовой руды в 2012 году, млн. тонн\*

Страны	Запасы, млн. тонн
Казахстан	210,0
ЮАР	200,0
Индия	54,0
США	0,6
Всего запасы	464.6

\* Данные US Geological Survey

В 2012 году, по оценкам Геологической службы США, в мире было добыто 24,0 млн. тонн хромовой руды (хромитов), что на 0,7 млн тонн больше, чем годом ранее. Приблизительно 94 % мирового производства хромитов предназначены для использования в металлургической промышленности, для производства феррохрома, а остальное используется в литейном заводе, химических и невосприимчивых секторах. Поэтому мировая добыча хромитовой руды следует за мировым производством феррохрома. Приблизительно 70 % мирового производства хромитов потребляются внутри добывающих стран в производстве феррохрома.

В настоящее время в производстве феррохрома доминируют ЮАР, Казахстан, Индия и Китай.

Китайский рынок хромитовых руд сильно растет. В 2011 году в страну было импортировано 9,4 млн. тонн, что на 9 % больше чем в предыдущем году. Крупнейший потребитель феррохрома – промышленность нержавеющей стали. До начала спада в мировой экономике производство нержавеющей стали показало значительный рост. Потребление в развивающихся странах, таких как Китай и Индия помогло мировому производству увеличиваться в среднем на 5,4 % ежегодно в течение 2000 - 2007 годов, при этом только на один Китай пришлось более чем 60 % роста глобального производства.

Мировое потребление феррохрома в 2012 году достигло рекордных 10,4 млн. тонн, превысив предыдущий верхний уровень 9,7 млн. тонн в 2011 году. Сильный спрос со стороны конечных потребителей и пополнение запасов производителями нержавеющей стали поддержали рост мирового спроса и на нержавеющую сталь и на феррохром (таблица 2).

Таблица 2 - Потребление феррохрома в мире, млн. тонн\*

Годы	2008	2009	2010	2011	2012
Китай	2,70	3,50	3,70	4,00	4,30
США	0,40	0,35	0,40	0,40	0,40
Прочие страны	3,67	2,89	4,94	5,27	5,65
Всего	6,77	6,74	9,04	9,67	10,35
Баланс рынка	0,88	-0,79	0,05	-0,30	0,39

\* Сводные данные

В течение 2011 года европейская эталонная договорная цена для феррохрома колебалась в пределах от 2600 до 3000 долл./т, составив в среднем 2750 долл./т, что на 0,6 % больше, чем в 2010 году. В 2012 году цены на феррохром несколько снизились и составили примерно 2400 долл./т.

Между тем, цены на металлический хром, за период с 2003 по 2012 годы, выросли почти в три раза – с 5,3 до 14,0 тыс. долл./т.

Ожидается, что положительные тенденции поддержат спрос на нержавеющую сталь, и он будет расти в ближайшие годы с более высокой скоростью, чем в 2011-2012 годах. При этом повышение спроса на нержавеющую сталь приведет к увеличению ее производства, и, в результате, увеличится спрос на феррохром, что приведет к росту его цены на мировом рынке.

### 1.1.1 Теория и практика обогащения хромовых руд

*Общие сведения.* По содержанию хромшпинелидов хромовые руды делятся на сплошные (>90 %), густовкрапленные (70–90 %), средневкрапленные (50–70 %), редковкрапленные (30–50 %) и убоговкрапленные. Граница естественных групп – богатые и бедные – соответствует содержанию ценного минерала примерно 50–60 %. Товарной продукцией хромоворудного сырья являются богатые сплошные и густовкрапленные руды, используемые в сыром виде, и хромитовые концентраты, получаемые при обогащении. Для данного сырья, спецификой которого является переменный состав полезного минерала выделяются следующие промышленные типы руд: металлургический – высокохромистые руды, используемые также и в других отраслях; химический – среднехромистые руды повышенной глиноземистости и железистости, могут быть использованы в огнеупорной промышленности; огнеупорный – высокоглиноземистые низкохромистые руды. До последнего времени промышленность использовала лишь богатые руды, не требующие обогащения [11].

*Теория и практика обогащения хромовых руд.* Основными процессами обогащения хромовых руд после предварительного дробления являются



промывка, гравитационный метод, флотация, магнитная сепарация или электрическая сепарация. В процессе обогащения уменьшается лишь количество вмещающей породы, вследствие чего доля хромита в полученном концентрате повышается.

Базовой для изучения обогатимости средних и бедных по качеству руд (20–40 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) является технологическая схема много стадийного извлечения ценного компонента по мере его раскрытия, основу которой составляют гравитационные процессы. Пределы крупности материала обусловлены применяемыми процессами обогащения в тяжелых суспензиях (минус 100 плюс 10 мм) или радиометрической сепарации (минус 200 плюс 15 мм). Второй технологической операцией является отсадка при крупности материала минус 15 (10) плюс 1 (0,5) мм. Отсадка применяется для извлечения богатых по густоте вкрапленности руды из отсева, который не поддается обогащению на первой стадии.

Заключительная стадия переработки сырья осуществляется на измельченном до оптимальной крупности раскрытия хромшпинелида в промпродукте предыдущей стадии с получением наиболее богатого концентрата. Данная технологическая схема в зависимости от комплекса природных свойств исходного сырья модифицируется только по составу стадий обогатительного передела [11].

Для обогащения хромовых руд возможно применение флотационной технологии, использование которой наиболее целесообразно только при извлечении хромшпинелида из тонких классов, где гравитационные процессы недостаточно эффективны, т. е. из промпродуктов и хвостов. В зависимости от основы породного комплекса (оливин или серпентин) реализуются различные схемы флотации: жирнокислотными собирателями, катионная флотация и др. [11].

Известен способ магнитного обогащения хромитовых руд, применяемый финской фирмой «Оутокумпу» для производства 190 тыс. т/год хромового концентрата [13]. В технологической схеме используются способы магнитных полей различной напряженности. Для извлечения магнетита используют способ обогащения концентрата в слабом магнитном поле, а для хрома – используют сильное магнитное поле. Однако этот способ не позволяет регулировать отношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  в зерне хромита и не обеспечивает извлечения примесных оксидов никеля и кобальта.

Комбинированный способ по переработке комплексных железных руд, содержащих хром, никель и кобальт [14]. Исходную руду разделяют на классы с большим содержанием никеля и железа и с повышенным содержанием хрома и кобальта. Оставшийся продукт способом гравитации разделяют на хромитовый концентрат и кобальтовый концентрат. Хромитовый концентрат после измельчения подвергают двухстадийной магнитной сепарации с получением хромитового и железного концентратов. Однако этот способ является сложным, а разделение природно-легируемых железных руд не позволяет изменить отношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  в зерне хромита.

Известен способ производства хромитового концентрата из хромитсодержащих руд, включающий обогащение в магнитном поле и гравитационное обогащение [15]. Перед обогащением руду подвергают дроблению и дезинтеграции, обогащение ведут сначала в слабом магнитном поле с отделением сильномагнитных минералов руды, затем в сильномагнитном поле хромшпинелидов. Слабомагнитные хромшпинелиды руды после очистки их поверхностей получают в сильном магнитном поле, а отделение глинистой фракции ультрамафитов руды от песковой фракции, представленной силикатами и кварцем, ведут под действием центробежных сил. Недостаток данного способа - потери минеральных зерен хромитов крупностью менее 2,5 мм - приводит к потере основного компонента.

Способ обогащения железных руд, содержащих хром и другие элементы [16] предусматривает измельчение руды до фракции - 0,2 мм и магнитную сепарацию. Полученный магнитный продукт нагревают до 350 °С и подвергают переочистке в магнитном поле той же напряженности (1000 Э). Немагнитный продукт первой стадии магнитной сепарации подвергают восстановительному обжигу при 700 °С с добавлением 10 % древесного угля. Обожженную руду охлаждают до 350 °С и подвергают магнитной сепарации с получением железного концентрата и хромитового продукта. Недостатком указанного способа также является невозможность регулирования отношения  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  в зерне хромита.

Известные способы обогащения малоэффективны для бедных хромитсодержащих руд (содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в конечных концентратах менее 30 %). Для их рентабельной переработки требуются технологии, обеспечивающие комплексное извлечение всех ценных компонентов с получением качественных продуктов.

### **1.1.2 Характеристика продуктов, получаемых на стадии обогащения хромовых руд**

Объектом исследования настоящей работы являются хромитсодержащие хвосты обогащения Донского ГОКа, которые получаются в результате действующей технологии, представленной на рисунке 1.

Нетрудно видеть, что обогащение хромовых руд Донского ГОКа, основу которой составляют гравитационные процессы, можно разделить на две основные стадии. На первой стадии после крупного дробления и обогащения в тяжелых суспензиях извлекается кусковой концентрат (-100 мм, + 12 мм) сплошных и густовкрапленных руд и удаляются отвальные хвосты. На второй стадии проводят отсадку при крупности материала - 12 мм, + 1 (0,5) мм. Отсадка применяется для извлечения богатых по густоте вкрапленности руды из отсева, который не поддается обогащению на первой стадии. Хвосты после второй стадии обогащения поступают на измельчение и глубокое гравитационное обогащение.



Рисунок 1 – Комбинированная схема обогащения хромовых руд Донского ГОКа

По технологии обогащения хромовой руды получают хромовый концентрат и хвосты обогащения. Хромовый концентрат отправляется для получения ферросплавов, а хвосты – в отвал.

За весь период работы обогатительных фабрик Донского ГОКа (с 1973 года) накоплено около 15 млн. тонн шламовых хвостов. По оценкам специалистов потери  $Cr_2O_3$  с шламовыми отходами составляют ~ 26 %.

Извлечение хрома из накопленных шламов, с учетом существующего спроса на хромовые концентраты с одной стороны, снижения первичного сырья с другой, а также с возрастающими требованиями к экологии и охране окружающей среде, представляется весьма актуальной и является важной практической задачей, стоящей перед Донским ГОКом.

## **1.2 Способы извлечения хрома из хромитсодержащих шламов обогащения**

Проблема извлечения хрома из накопленных шламов путем вовлечения их на дополнительную переработку до сегодняшнего дня не находит своего рационального решения. Несмотря на ряд перспективных известных способов, каждый из них имеет как достоинства, так и недостатки. Так, в научной литературе известен способ переработки серпентин-хромитового рудного сырья [17], согласно которому руду выщелачивают растворами серной или соляной кислоты.

Недостатками способа являются:

- низкая эффективность, поскольку после осаждения гидроксидов металлов Mg, Fe, Cu, Ni и других система переполняется слабо концентрированными растворами сульфата (или хлорида) натрия. Для выпарки и утилизации таких, мало востребованных солей требуется большое количество тепла;

- способ не позволяет выделить концентраты цветных металлов и редкоземельных элементов.

В работе [18] представлен способ комплексной переработки серпентина разложением руды серной кислотой. Получают осадок, состоящий из аморфного кремнезема и неразложившихся минералов и фильтрат. Осадок подвергают магнитной сепарации с получением хромагнетитового концентрата в магнитной фракции и диоксида кремния в немагнитной. Фильтрат нейтрализуют до pH 7,0-8,5 и осаждают гидроксиды Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>. Из оставшегося фильтрата методом карбонизации выделяют карбонат магния.

Недостатками способа являются:

- способ разделения осадка кислотного выщелачивания от кремнезема магнитной сепарацией может быть использован при переработке рудных смесей, содержащих минералы, обладающих магнитными свойствами. Применение способа магнитной сепарации для разделения бедных хромитовых руд, содержащих немагнитные и слабомагнитные минералы, неэффективно;

- применение электромагнитного разделения осадка после кислотного выщелачивания руды не дает гарантии получения диоксида кремния, свободного от примесей;

- способ не позволяет выделить концентраты цветных металлов и редкоземельных элементов.

В работе [19] комплексную переработку серпентин-хромитового рудного сырья проводят смешиванием измельченного исходного сырья с концентрированной серной кислотой с последующим обжигом и выщелачиванием огарка. Обжиг ведут с добавлением углерода в количестве 6,0-10,0 % масс. от рудного сырья при температуре 750-800 °С в течение 3 часов. Огарок после обжига выщелачивают водой. Полученную суспензию фильтруют, фильтрат упаривают для кристаллизации семиводного сульфата магния. Осадок после фильтрации подвергают гидроциклонированию для отделения тонкой фракции, содержащей оксиды железа, никеля, алюминия, от крупной фракции, содержащей хромит и кремнезем. Крупную фракцию выщелачивают раствором едкого натра с получением кремнеземсодержащего щелочного раствора и осадка – хромитового концентрата.

Недостатками способа являются:

- невозможность получения концентрата цветных металлов;
- низкое качество магнийсодержащего продукта, связанное с тем, что раствор выщелачивания перед выпаркой не очищают от возможного присутствия примесей металлов;
- мелкая фракция после гидроциклонирования осадка кислотного выщелачивания не является конечным товарным продуктом, так как не обеспечивается достаточно полное отделение кремнезема.

Проведенный анализ известных работ по переработке хромитсодержащих шламов обогащения показывает, что применение перечисленных способов, либо непригодны для переработки мелкодисперсных шламов, либо не рентабельны из-за высокого энергопотребления. Кроме того, они не позволяют комплексно извлекать из шламов сопутствующие ценные компоненты. Это требует изыскания новых высокоэффективных методов (способов) комплексной переработки хромитсодержащих шламов обогащения с извлечением ценных металлов в товарные продукты.

### **1.3 Выбор и обоснование научного направления исследований**

Коренным недостатком действующих технологий переработки хромитовых руд является образование токсичного отхода обогащения руды – шлама, складированного в шламо накопителях. Задача утилизации шлама нигде в мире не решена, что обусловило закрытие производства хрома в ряде развитых стран Европы и Японии. Высокое содержание оксида магния в шламе препятствует его использованию в производстве цемента, а высокое содержание кальция и кремния в производстве огнеупорных материалов.

Как было указано выше, основным предприятием, осуществляющим добычу и обогащение хромового сырья в Казахстане, является Донской ГОК.

За время работы обогатительных фабрик Донского ГОКа на комбинате заскладировано около 15 млн. тонн шламовых хвостов. Потери  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  по технологии обогащения составляют до 26 %. Рост производительности обогатительных фабрик сопровождается дополнительным накоплением шламовых отходов, которые занимают огромные территории и требуют незамедлительного решения данного вопроса. Извлечение хрома из техногенных отходов, с учетом существующего спроса на хромовые концентраты, является важной задачей.

В связи с этим планируются исследования по разработке комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОКа, с получением качественных товарных продуктов в виде хромитового концентрата, концентрата цветных металлов, аморфного кремнезема и сульфата магния являются актуальными и востребованными. Актуальность решения поставленной задачи усиливается и с точки зрения охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

Проведенный обзор известных работ, направленный на переработку хромитсодержащих шламов показывает, что наиболее приемлемой технологией для их переработки является комбинированная технология, сочетающая в себе комплексное единство процесса обжига и выщелачивания. При этом выбор технологических решений зависит от содержания сопутствующих ценных элементов, извлечение которых во многом будут определять конечные технолого-экономические показатели технологии в целом.

В настоящей работе для комплексного извлечения ценных элементов из хромитсодержащих шламов предусмотрено построение технологии сульфатизирующего обжига серной кислотой в присутствии твердого восстановителя, как наиболее высокоэффективного и малозатратного способа переработки.

## **2 Исследование физико-химических характеристик хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОК**

### **2.1 Методы исследования**

При проведении исследований вещественного состава исходного сырья использованы методы химического, рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового, кристаллооптического и термического анализов. В качестве объекта исследования использованы пробы хромитсодержащих шламов Донского ГОК. При проведении комплексных исследований по изучению вещественного состава были использованы современные методы анализа с применением приборов нового поколения.

Химический анализ проб выполнен на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно – связанной плазмой Optima 2000 DV (США, Perkin Elmer).

Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли на рентгенофлуоресцентном спектрометре с волновой дисперсией Venus 200 PANalytical B.V. (Голландия).

Рентгенофазовый анализ проб проводили с использованием прибора D8 Advance (Bruker AXS GmbH),  $\alpha$ -Cu, напряжение на рентгеновской трубке 40/40. Обработка полученных данных дифрактограмм и расчет межплоскостных расстояний проводились с помощью программного обеспечения EVA. Расшифровка проб и поиск фаз осуществляли с помощью программы Search/match с использованием Базы данных карточек ASTM. Ошибка полуколичественного анализа составляла  $\pm 5\%$ .

Кристаллооптические анализы проб проводили с использованием растрового электронного микроскопа и микроскопов Olympus VX-51 и Leica DM 2500.

Поведение компонентов пробы хромитсодержащих шламов обогащения при нагреве проводили с использованием метода ТГ-ДТА. Термический анализ выполняли с использованием прибора синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter. Обработка результатов производилась посредством программного обеспечения NETZSCH Proteus.

Расчет рационального состава хромитсодержащих шламов обогащения проводился на основании результатов комплексных (минералогический, рентгенофазовый) методов исследований форм нахождения металлов с использованием современных методов металлургических расчетов.

### **2.2 Результаты исследований и их обсуждение**

Для исследований были отобраны пробы хромитсодержащих шламов обогащения, полученные в результате обогащения хромитсодержащих руд Донского ГОК.

## 2.2.1 Изучение вещественного и фазового состава

Результаты химического анализа проб на содержание в них хрома, железа и тяжелых цветных металлов (Ni, Co, Zn) представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты химического анализа хромитсодержащих шламов обогащения

Элементы	Cr	Fe	Ni	Co	Zn	Mg	Si	Al	ΣРЗЭ
Содержание %	18,5	6,879	0,271	0,014	0,014	17,599	11,197	1,393	0,025

Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в пробе хромитсодержащих шламов обогащения определяли с помощью современного атомно-эмиссионного оптического спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 2000 DV. Развернутые результаты элементного анализа на РЗЭ приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Содержание РЗЭ в хромитсодержащих шламах обогащения

Элемент	La	Lu	Nd	Yb	Ce	Tm	Dy	Gd	Sc	Tb	Y
Содержание, ppm	21	1,9	26	1,6	54	1,1	6,3	59	66	3,0	8,2

Результаты рентгенофазового анализа проб шламов на приборе D8 Advance показал сложный фазовый состав хромитсодержащих шламов обогащения (таблице 5, рисунок 2).

Таблица 5 - Фазовый состав хромитсодержащих шламов обогащения

Наименование	Формула	%
Хромит	$(\text{Fe}_{0,3031}\text{Mg}_{0,8996})(\text{Cr}_{0,656}\text{Al}_{0,28})_2\text{O}_4$	50,6
Клинохризолит	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	38,2
Лизардит – 1Т	$(\text{Mg},\text{Al})_3((\text{Si},\text{Fe})_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	8,6
Клинохлор	$\text{Mg}_{2,5}\text{Fe}_{1,65}\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{2,2}\text{Al}_{1,8}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2,6



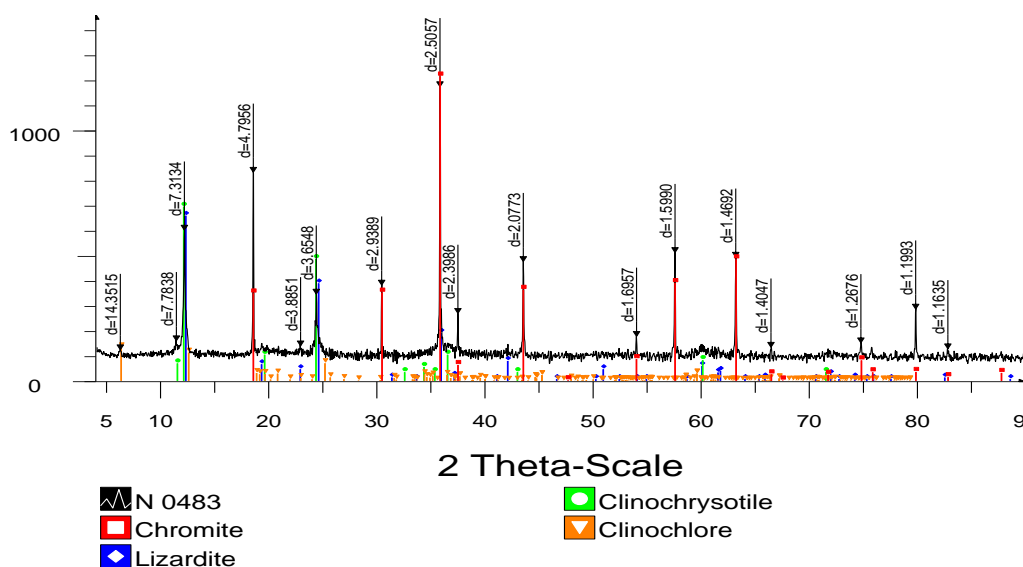


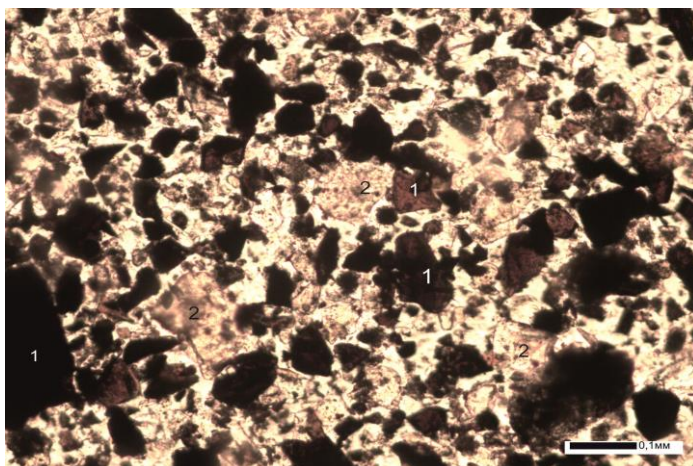
Рисунок 2 – Рентгенограмма хромитсодержащих шламов обогащения

Полученные результаты имеют принципиальное значение при выборе технологических решений по переработке шламов. Нетрудно видеть, что наряду с основным компонентом хромитом (50,6 %) в шламах в значительных количествах содержатся сложные соединения магния с кремнеземом доля которых в сумме может достигать до 50 %. Распределение магния по таким минералам как клинохризолит, лизардит и клинохлор, безусловно, будет оказывать влияние не только на конечное извлечение магния, но и будет вносить существенные изменения на поведение кремнезема, железа и других элементов в процессе сульфатизирующего обжига и выщелачивания. Поэтому для принятия окончательных решений по выбору, определению и уточнению технологических параметров и режимов сульфатизирующего обжига необходимо проведение детальных исследований по формам нахождения ценных элементов в шламах.

### 2.2.2 Формы нахождения хрома, цветных металлов, и железа

Минералогические исследования проб проводились под растровым микроскопом и под микроскопом OLYMPUS с различным увеличением. При увеличении 100x под микроскопом OLYMPUS были сняты дополнительные фотоснимки пробы в проходящем свете в иммерсионной среде.

На рисунке 3 приведен общий вид хромитсодержащих шламов обогащения в режиме COMPO в иммерсионной среде.



1 – породообразующие минералы; 2 – хромпикотит. Иммерсионная среда, без анализатора

Рисунок 3 - Хромитсодержащий шлам обогащения, 100х

Установлено, что в исследуемой пробе основным хромсодержащим минералом является хромпикотит (хромит), минерал группы хромшпинелидов. Минерал группы кубической и гексооктаэдрической сингонии, цвет черный, в шлифе полупрозрачный, просвечивает густо-красным или коричнево-красным цветом. Установленный состав элементов в минерале варьирует в пределах (%): Cr –  $38,37 \div 46,58$ ; Fe –  $10,2 \div 12,89$ ; Mg –  $6,17 \div 7,18$ ; Al –  $3,69 \div 4,64$ ; O –  $31,91 \div 39,6$ .

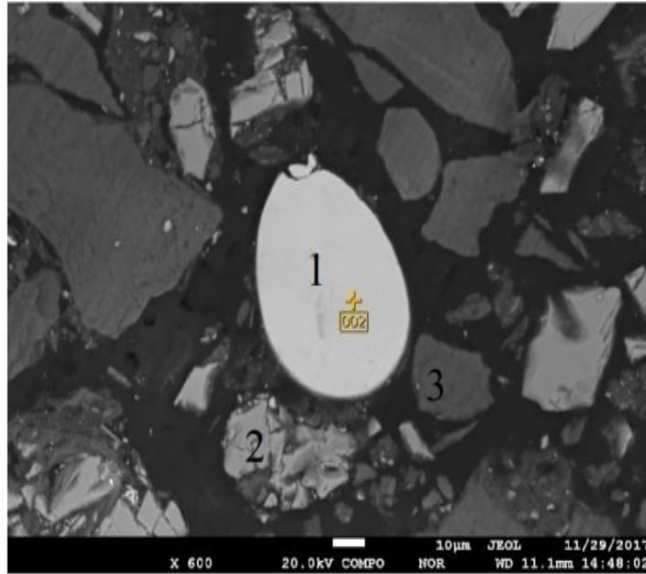
Из породообразующих минералов в пробе преобладает клинохризолит и лизардит (таблица 4). Минералы данной группы относятся к классу серпентина, сингония ромбическая и гексагональная. Цвет зеленый разной интенсивности. Показатели преломления непостоянные. В иммерсионном препарате минералы анизотропные. Элементный состав обнаруженных минералов в основном представлен следующими элементами, %: Fe –  $1,67 \div 8,63$ ; Mg –  $19,75 \div 27,72$ ; O –  $46,37 \div 54,48$ ; Si –  $15,28 \div 19,14$ .

Полученные результаты минералогических исследований хорошо согласуются с данными рентгенофазового метода анализа. Наряду с установленными минералами в исследованных пробах шламов обнаружены ярко выраженные фазы металлического железа, которые нетрудно видеть на фотографии шлифов проб и на EDS-спектрах, представленных на рисунке 4.

При увеличении 500х в исследованных пробах обнаружены металлические включения железа с хромом (феррохром) и кремнием (ферросилиций), а также оксид железа, которые показаны на рисунке 5.

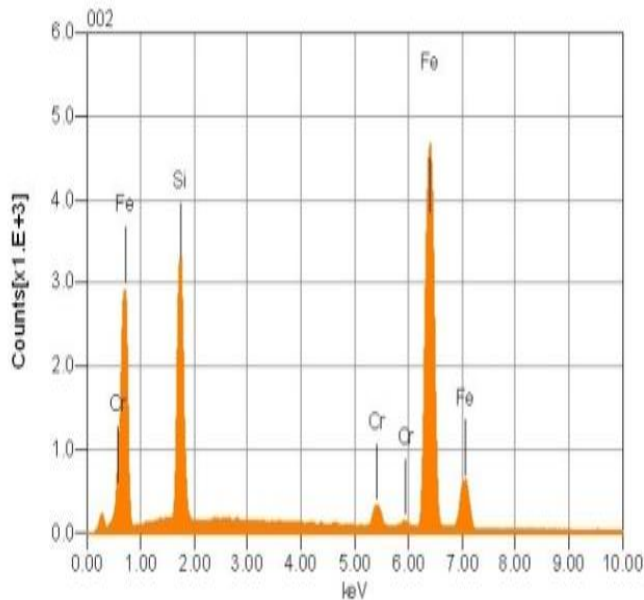
При увеличении 1000х, в исследованных пробах в фазе хромпикотита обнаружены включения металлической меди (рисунок 6).

002



Volt : 20.00 kV  
Mag. : x 600  
Date : 2017/11/29  
Pixel : 1280 x 960

A)



Acquisition Condition  
Instrument : 8230  
Volt : 20.00 kV  
Current : 6.00 nA  
Process Time : T1  
Live time : 20.00 sec.  
Real Time : 22.40 sec.  
DeadTime : 12.00 %  
Count Rate : 12500.00 CPS

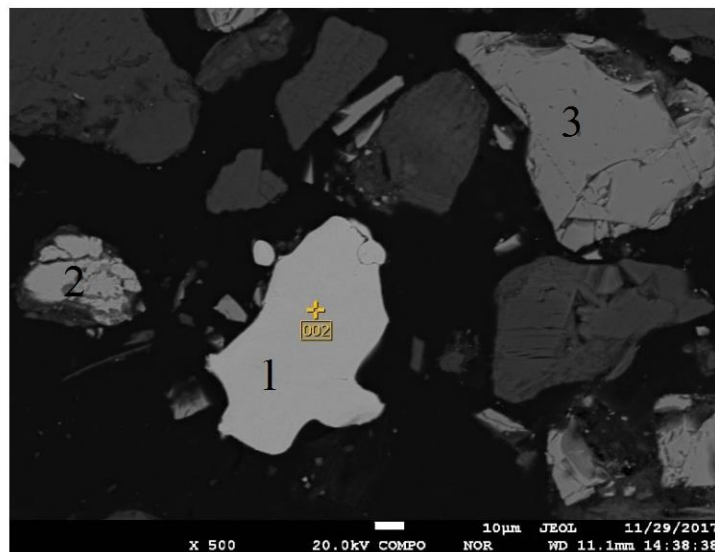
Elements	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
Si	12.36	21.86	0.22	777231	0.0599789	K
Cr	2.59	2.48	0.40	123043	0.0244326	K
Fe	85.05	75.67	0.60	2550455	0.6806480	K
Total	100.00	100.00				

B)

(A) – Хромитсодержащий шлак обогащения: 1 – железо металлическое; 2 – хромпикотит; 3 – лизардит. Б) – EDS-спектры

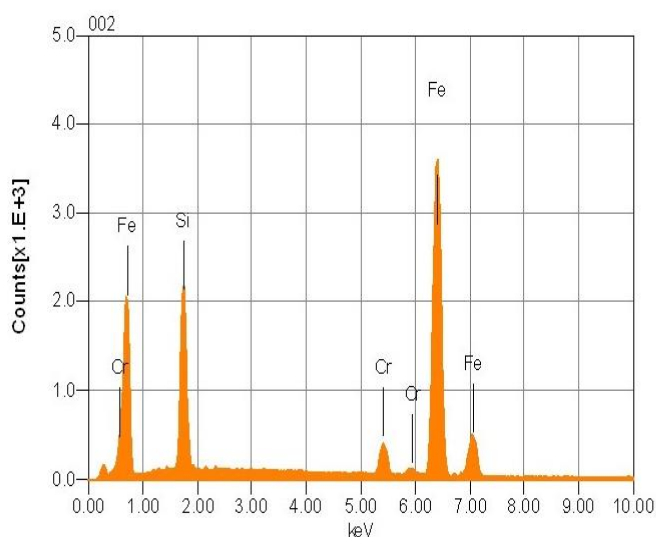
Рисунок 4 – Хромитсодержащий шлак обогащения, 600x

002



Volt : 20.00 kV  
Mag. : x 500  
Date : 2017/11/29  
Pixel : 1280 x 960

A)



Acquisition Condition  
Instrument : 8230  
Volt : 20.00 kV  
Current : 5.00 nA  
Process Time : T1  
Live time : 20.00 sec.  
Real Time : 22.19 sec.  
DeadTime : 10.00 %  
Count Rate : 9528.00 CPS

Elements	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
Si	10.15	18.28	0.21	481772	0.0498370	K
Cr	4.71	4.58	0.39	169347	0.0450766	K
Fe	85.14	77.14	0.59	1937952	0.6932821	K
Total	100.00	100.00				

B)

A) – Хромитсодержащий шлак обогащения: 1–железо металлическое с примесью Cr и Si; 2 – оксид железа (гематит); 3– хромпикотит. Б) – EDS-спектры

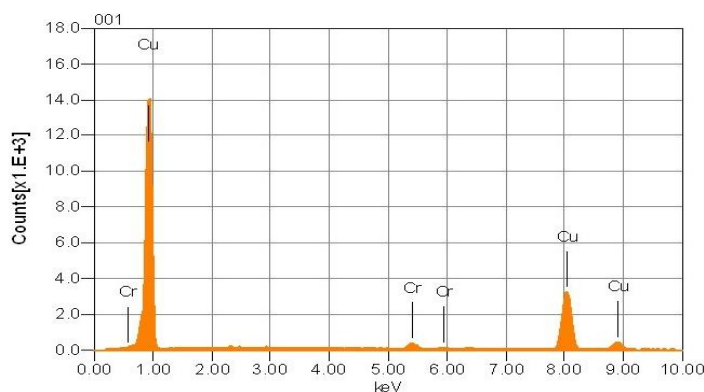
Рисунок 5 – Хромитсодержащий шлак обогащения, 500x

001



Volt : 20.00 kV  
Mag. : x 1,000  
Date : 2017/11/29  
Pixel : 1280 x 960

A)



Acquisition Condition  
Instrument : 8230  
Volt : 20.00 kV  
Current : 6.00 nA  
Process Time : T1  
Live time : 20.00 sec.  
Real Time : 23.05 sec.  
DeadTime : 13.00 %  
Count Rate : 16655.00 CPS

Elements	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
Cr	3.37	4.09	1.06	162581	0.0320656	K
Cu	96.63	95.91	2.86	2000005	0.8655437	K
Total	100.00	100.00				

B)

A) – Хромитсодержащий шлам обогащения: 1 – хромпикотит; 2 – включение металлической меди. Б) – EDS-спектры

Рисунок 6 – Хромитсодержащий шлам обогащения, 1000x

Цветные металлы в пробах представлены в виде единичных зерен сплава свинца с цинком и медью.

Таким образом, полученные результаты минералогических исследований и рентгенофазового анализа показывают, что хром, железо, а также присутствующие в хромитсодержащих шламах обогащения цветные и редкоземельные металлы, в основном, представлены в оксидной форме.

## 2.2.3 Фазовые превращения, протекающие при нагреве хромитсодержащего шлама

Исследования по изучению фазовых превращений, протекающих при нагреве хромитсодержащего шлама проводили с использованием метода ТГ-ДТА.

Исследования проводились на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter.

Методика экспериментов заключалась в следующем. Перед нагревом печное пространство откачивалось (уровень достигаемого вакуума – 92 %) и затем продувалось инертным газом в течение 5 минут. Нагрев осуществлялся до температуры 1150 °С со скоростью 10 °С/мин, в атмосфере высокоочищенного аргона. Охлаждение проводилось до 300 °С со скоростью 15 °С/мин. Общий объем поступающего газа выдерживался в пределах 80 мл/мин. Обработка результатов производилась посредством программного обеспечения NETZSCH Proteus.

Результаты исследований приведены на рисунке 7.

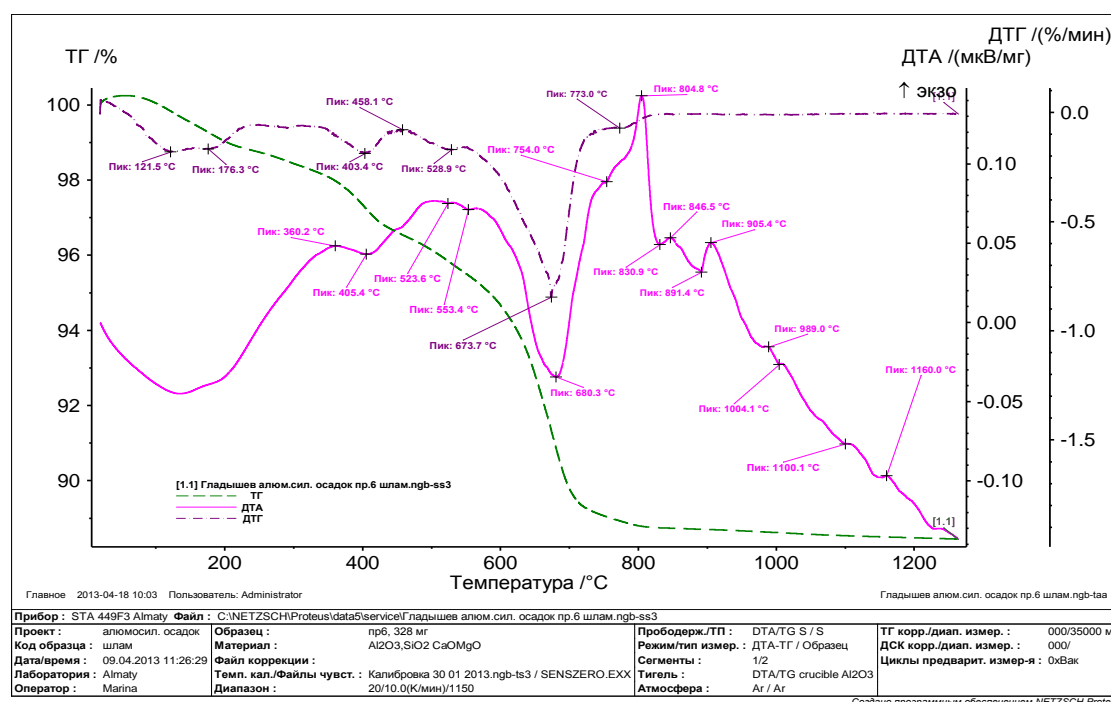


Рисунок 7 – Термограмма пробы хромитсодержащего шлама обогащения

Установлено, что при 360 °С происходит окисление примеси закисного железа. Минимум при 403 °С на кривой ДТГ может быть проявлением дегидратации гидрооксидов железа, магнезия и оксигидроксида хрома. Слабый максимум на этой же кривой при 458 °С может отражать окисление двухвалентного железа в магнетите или хромите остаточным кислородом. Наблюдаемые изменения кривых при 680 °С и 745 °С можно объяснить



удалением гидроксильной воды и разрушением решетки сложных оксидов железа и хрома. При 905 °С идет кристаллизация продуктов распада.

Наиболее интенсивный эндотермический эффект на кривой ДТА с максимальным развитием при 680 °С сопровождается снижением массы навески.

Экзотермический эффект при 805 °С отражает упорядочение структуры форстерита, а пик при 1160 °С – кристаллизацию аморфного энстатита.

Наличие экзотермического эффекта при 360 °С, эндотермических эффектов с экстремумами при 680 °С и 745 °С, а также экзотермического эффекта с пиком при 905 °С отражает наличие в пробе минерала маргарита –  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Сочетание эндотермического эффекта с экстремумом при 680 °С, эндотермического эффекта с экстремумом при 831 °С и экзотермического эффекта при 847 °С можно трактовать как проявление магнезиального хлорита – пеннина, кеммерерита, клинохлора.

В сочетании с экзотермическими пиками в температурном интервале 805 °С – 1160 °С, эндотермический эффект при 680 °С отражает проявление серпентина, который происходит в результате разрушения структуры минерала с одновременным удалением группы  $\text{OH}^-$  с образованием новых минеральных фаз – кристаллического форстерита и рентгеноаморфного энстатита.

Известно [20], что нагревание хлорита до температур, превышающих температуру экзотермического эффекта, приводит к образованию шпинелей. В работе [21] показано, что после дегидратации нескольких гидроксидов образуется твердый раствор шпинелидов. Процесс отображается на термограмме экзотермическим эффектом.

Полученные результаты показывают сложный характер изменения структуры шламов при нагреве. Можно предположить, что экзотермические эффекты, кроме вышеописанных процессов, отражают еще и реакции образования твердых растворов хромшпинелидов из продуктов дегидратации фазовых составляющих, присутствующих в исследуемой пробе.

Результаты комплексных исследований химического, фазового состава, а также форм нахождения ценных элементов приняты за основу расчета рационального состава хромитсодержащего шлама обогащения.

### **2.3 Расчет рационального состава хромитсодержащего шлама обогащения**

Как показали результаты химического и рентгенофазового анализа основные элементы и их соединения в хромитсодержащих шламах обогащения, в основном, находятся в виде своих оксидов.

Расчет рационального состава хромитсодержащего шлама сводился к количественному определению оксидов металлов с учетом их коэффициентов перевода. Расчет проводили на 100 г шлама.

Расчетное количество оксидов металлов в шламе ( $G_{MeO}$ ) составляет:

$$G_{Cr_2O_3} = 18,5 \text{ г} \cdot 1,461 = 27,03 \text{ г.}$$

$$G_{Fe_2O_3} = 5,64 \text{ г} \cdot 1,429 = 8,06 \text{ г.}$$

$$G_{FeO} = 1,238 \text{ г} \cdot 0,354 = 1,59 \text{ г.}$$

$$G_{MgO} = 17,6 \text{ г} \cdot 1,667 = 29,34 \text{ г.}$$

$$G_{SiO_2} = 11,2 \text{ г} \cdot 2,143 = 24,0 \text{ г.}$$

$$G_{Al_2O_3} = 1,39 \text{ г} \cdot 1,889 = 2,63 \text{ г.}$$

$$G_{NiO} = 0,27 \text{ г} \cdot 1,271 = 0,34 \text{ г.}$$

$$G_{CoO} = 0,014 \text{ г} \cdot 1,271 = 0,018 \text{ г.}$$

$$G_{ZnO} = 0,01 \text{ г} \cdot 1,246 = 0,013 \text{ г.}$$

На основании установленных расчетных количественных соотношений оксидов металлов составлен рациональный состав хромитсодержащего шлама обогащения, результаты которого представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Рациональный состав хромитсодержащего шлама обогащения

Соединения	Элементы, %											
	Cr	Fe	Mg	Si	Al	Ni	Co	Zn	ΣPЗЭ	O <sub>2</sub>	Проч.	Итого:
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,5									8,54		27,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5,64								2,42		8,06
FeO		1,24								0,35		1,59
MgO			17,6							11,73		29,34
SiO <sub>2</sub>				11,2						12,80		24,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					1,39					1,24		2,63
NiO						0,27				0,07		0,34
CoO							0,014			0,004		0,018
ZnO								0,01		0,003		0,013
ΣPЗЭ									0,025			0,025
Проч.											6,95	6,95
Всего:	18,5	6,88	17,6	11,2	1,39	0,27	0,01	0,01	0,025	37,157	6,95	100

Установлено, что основным хромсодержащим минералом в составе шлама является хромпикотит с содержанием 27 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Основные породообразующие минералы в шламах представлены в виде минералов: клинохризолит, лизардит и клинохлор с суммарным содержанием MgO в них 29,3 %.

Показано, что хром в основном представлен в форме хромпикатита (хромита). Высокое содержание хрома (18,5 %) в шламах обогащения позволяет считать, что данный продукт может служить дополнительным источником сырья для его извлечения.



### 3 Исследование сульфатирующего обжига хромитсодержащего шлама в присутствии восстановителя

За основу технологии комплексной переработки хромитсодержащего шлама обогащения Донского ГОК, содержащий хром, магний, цветные металлы и другие полезные компоненты принят способ сульфатирующего обжига совместно с твердым восстановителем – углем.

Решение основной задачи операции обжига сводилась к переводу в водорастворимые соединения магния, цветных и редкоземельных металлов с отделением хрома и его соединений в нерастворимый остаток - кек.

#### 3.1 Особенности поведения хрома, магния, железа, цветных металлов и РЗЭ при сульфатирующем обжиге

##### 3.1.1 Термодинамика сульфатирующего обжига

Оценку вероятного направления реакций взаимодействия оксидов металлов, присутствующих в шламе, с серной кислотой и углем, составляющих основу сульфатирующего обжига хромитсодержащего шлама обогащения проводили по изменению термодинамических величин системы. Основное внимание уделено реакциям сульфатизации оксидов хрома, железа, магния и цветных металлов (Ni, Co, Zn).

Термодинамический анализ проведен с учетом зависимости изобарно-изотермических потенциалов (энергия Гиббса) реакций от температуры.

Изменение энергии Гиббса ( $\Delta G_o^T$ ) рассчитывали по формуле:

$$\Delta G_T^\circ = \Delta H_T^\circ - \Delta S_T^\circ * T, \quad (1)$$

где,  $\Delta H_T^\circ$ ,  $\Delta S_T^\circ$  - стандартные значения энтальпии и энтропии системы;

T - абсолютная температура, K.

Исходные данные для расчетов получены из веб-сайта NIST-JANAF Thermochemical Tables [22].

Термодинамические расчеты реакций, принятые к анализу, проведены с использованием специальной программы.

Механизм сульфатизации оксидов хрома, магния и цветных металлов в зависимости от температуры (в интервале 723 - 1023 K) можно представить системой протекания следующих реакций:





Зависимость энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) от температуры для реакций взаимодействия оксидов хрома, железа и цветных металлов с серной кислотой (реакции 2 – 8) показаны на рисунках 8, 9.

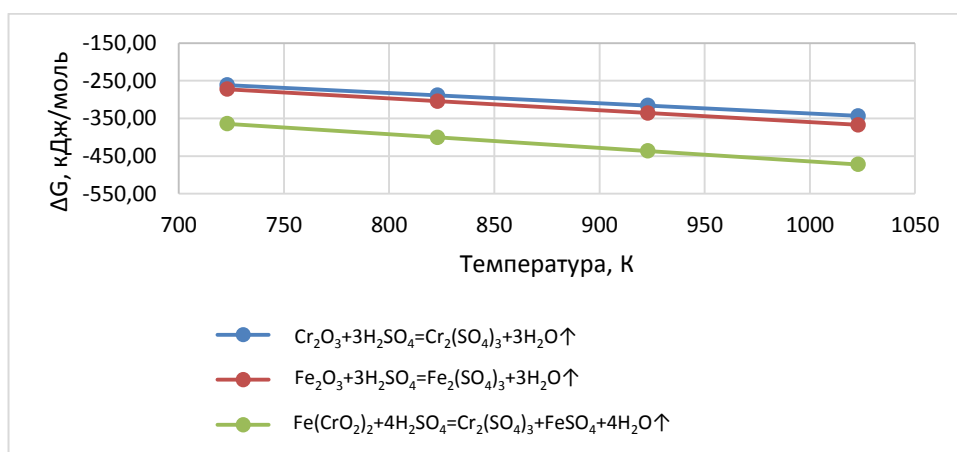


Рисунок 8 – Зависимость энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) реакций (2) - (4) от температуры

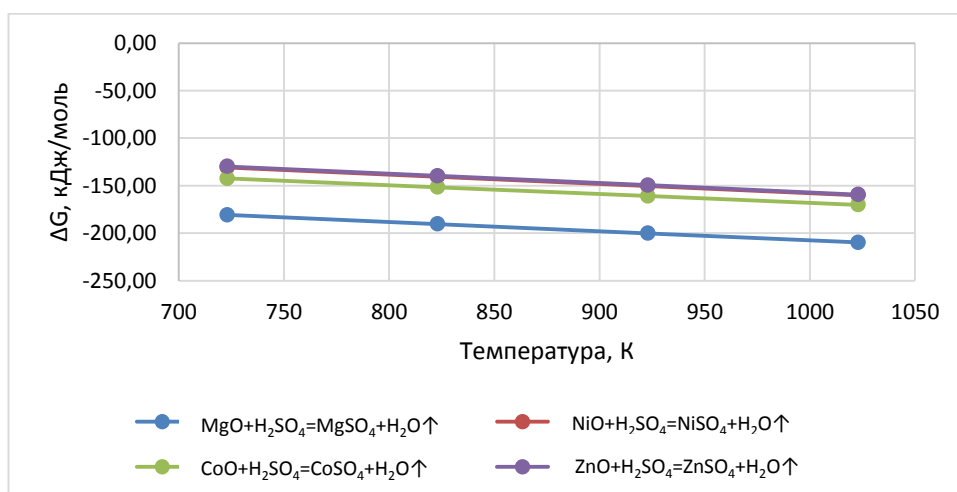


Рисунок 9 – Зависимость энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) реакций (5) - (8) от температуры

Видно, что термодинамическая вероятность протекания реакций (2) – (8), протекающих с образованием сульфатов Cr, Fe, Mg и

цветных металлов достаточно высока и с повышением температуры образование их сульфатов увеличивается. Установленная закономерность свидетельствует о том, что при обработке хромитсодержащих шламов обогащения практически все оксиды металлов будут переходить в водорастворимые соединения – сульфаты, что не позволит обеспечить селективного разделения металлов и их соединений.

С другой стороны, в условиях обжига можно предположить и разложение образовавшихся по реакциям (2) – (8) сульфатов металлов до своих оксидов. Однако, расчетные значения энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) для реакций разложения сульфатов хрома, железа и цветных металлов (9) – (14) показывают, что в исследованном интервале температур (723 - 1023 К), их разложение практически невозможно ввиду положительных значений энергии Гиббса (рисунок 10, 11).

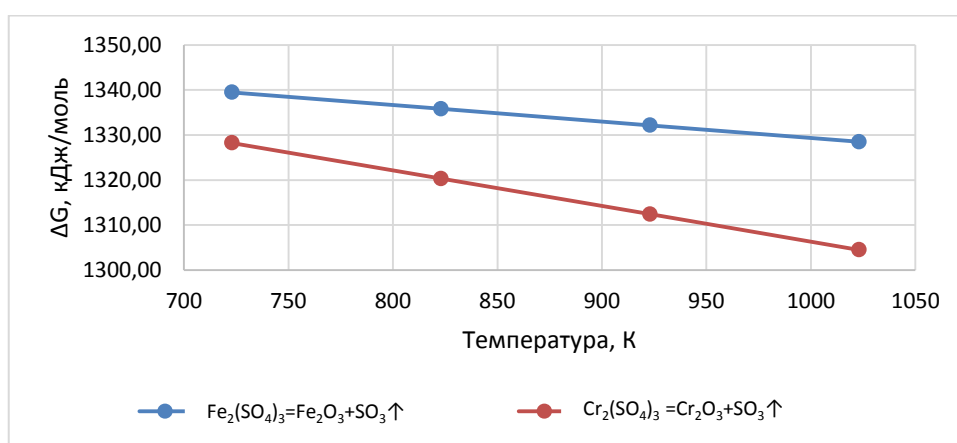


Рисунок 10 – Зависимость энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) реакций (9) и (10) от температуры

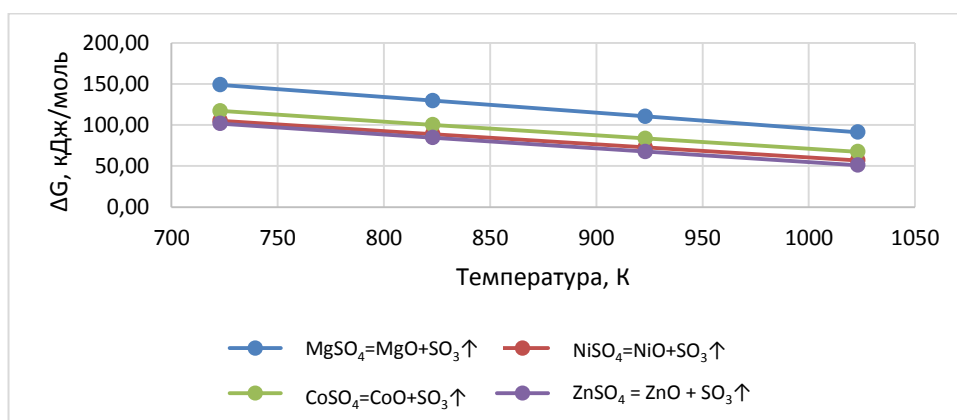


Рисунок 11 – Зависимость энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) реакций (11) – (14) от температуры

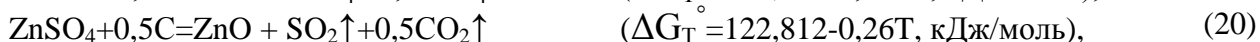
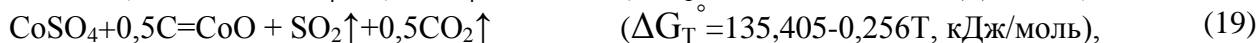
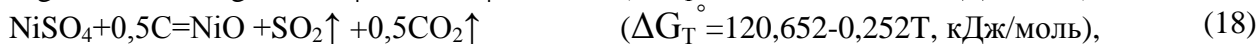
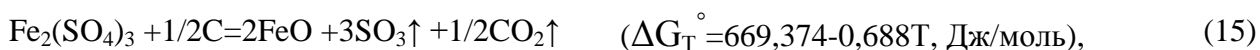
Приведенные на рисунках 8 - 9 данные показывают, что при сульфатизирующем обжиге хромитсодержащего шлама серной кислотой в

температурном интервале 723 - 1023 К образуются устойчивые водорастворимые соединения – сульфаты хрома, железа, магния и цветных металлов, которые составляют основу получаемого спека и при дальнейшей обработке выщелачиванием легко переходят в раствор. При этом практически исключается возможность селективного разделения металлов.

Исходя из этого, перед нами стояла задача разделения хрома и его соединений в виде нерастворимого осадка – кека, который при дальнейшей операции выщелачивания можно было легко отделить от раствора. При этом все остальные ценные металлы (Mg, Ni, Co, Zn) концентрируются в растворе.

Для достижения поставленной цели сульфатизирующий обжиг хромитсодержащего шлама проводили в присутствии восстановителя, в качестве которого использовали уголь.

Механизм взаимодействия сульфатов хрома, магния и цветных металлов с восстановителем можно представить системой протекания следующих реакций:



На рисунке 12 показана зависимость энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) реакций взаимодействия сульфатов хрома и железа (15) и (16) от температуры.

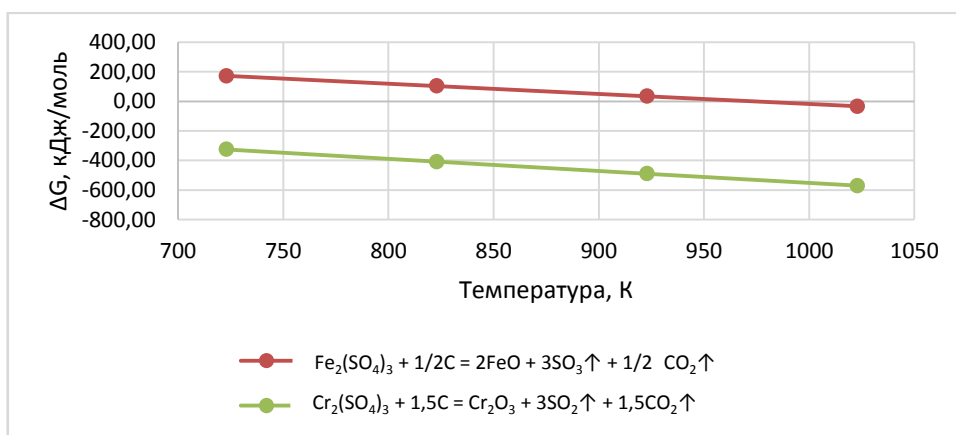


Рисунок 12 – Зависимость энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) реакций (15) и (16) от температуры

Данные рисунка 12 показывают, что вероятность протекания реакции (16) достаточно высока: при увеличении температуры обжига значение энергии Гиббса ~ в 2,5 раза превышает значение энергии Гиббса реакции

восстановления сульфата железа (15). Нетрудно видеть, что протекание реакции (15) возможна при высоких температурах – 1023 К и выше.

Зависимость свободной энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) реакций взаимодействия сульфатов магния и цветных металлов (17) – (20) от температуры показана на рисунке 13.

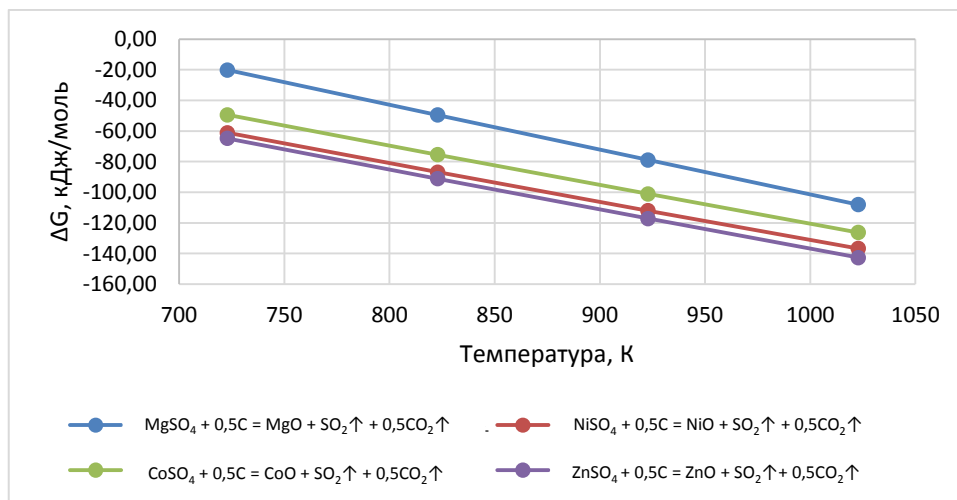


Рисунок 13 – Зависимость энергии Гиббса ( $\Delta G_T^\circ$ ) реакций (17) – (20) от температуры

Как видно на рисунке 13 возможность протекания реакций взаимодействия сульфатов магния и цветных металлов с восстановителем вполне вероятно, но в силу низких значений энергий Гиббса по сравнению с значениями энергии Гиббса реакции (16), их восстановление будут тормозиться, пока в системе не произойдет полного восстановления сульфата хрома.

Проведенные термодинамические расчеты реакций взаимодействия компонентов хрома, железа, магния, цветных и редкоземельных металлов с серной кислотой при сульфатизирующем обжиге показывают принципиальную возможность разделения хрома от других металлов в присутствии восстановителя (угля) с переводом хрома в осадок в виде нерастворимого кека и концентрированием магния, цветных металлов и РЗМ в растворе.

Таким образом, полученные результаты показывают принципиальную возможность разделения хрома от других металлов в виде нерастворимого кека при низких температурных интервалах обжига – 723 – 873 К в условиях восстановительно-сульфидирующего обжига. Установлено, что энергия Гиббса разложения сульфата хрома ~ в 2,5 раза превышает значения энергии Гиббса разложения сульфатов остальных металлов. При выбранных температурных интервалах разложение сульфатов магния, железа и цветных металлов невозможно, пока в системе присутствует сульфат хрома.

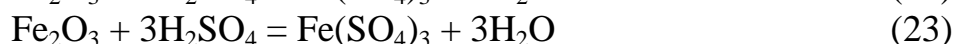
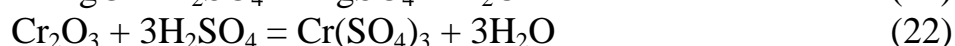
Для определения оптимального расхода серной кислоты и угля необходимо проведение экспериментальных исследований и уточнение их влияния на технологические показатели процесса обжига в целом.

### 3.1.2 Схема установки и методика проведения экспериментов

В проведенных исследованиях шлам обогащения хромитовой руды Донского ГОКа подвергали операции сульфатизирующего обжига с восстановителем (углем).

В качестве углеродсодержащего материала использовали уголь, количество которого составляло 10 % от массы шлама.

Перед обжигом шлам смешивали с древесным углем, затем в смесь добавляли концентрированную (96 %) серную кислоту. Количество концентрированной серной кислоты брали из расчета образования сульфатов магния, хрома и железа (с небольшим избытком на 8,2 %) по реакциям:



Количество концентрированной серной кислоты составило 160 % от массы шлама. Шихту загружали в печь и проводили обжиг при заданной температуре и продолжительности. Выделяющийся газ подвергали мокрой газоочистке. Полученные спеки измельчали и подвергали химическому и рентгенофазовому анализу.

Обжиг проводили в трубчатой вращающейся печи марки ST -1200RG, общий вид которой показан на рисунке 14.



Рисунок 14 – Общий вид трубчатой вращающейся печи

### 3.1.3 Результаты опытов и их обсуждение

Обжиг проводили при температуре 500 - 800 °С с выдержкой в течение 60 минут при каждой температуре.

Результаты химического состава спеков представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Химический состав полученных спеков при различной температуре обжига, % масс.

Элементы	Температура, °С			
	500	600	700	800
Cr	9,999	10,855	11,727	12,450
Mg	10,252	11,116	11,770	12,96
Fe	3,578	3,913	4,076	4,858
Si	6,726	7,440	9,000	9,987
Al	0,719	0,810	0,898	1,056
S	14,939	14,924	13,203	11,080
Ni	0,137	0,157	0,153	0,158
Co	0,015	0,009	0,014	0,015
Zn	0,010	0,010	0,012	0,015

Рентгенофазовые составы спеков приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Рентгенофазовый состав спеков, полученных при различной температуре

Температура, °С	Наименование	Формула	%
1	2	3	4
500	Сульфат магния	MgSO <sub>4</sub>	42,8
	Сульфат хрома	Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	16,8
	Микасайт	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	12,3
	Кварц	SiO <sub>2</sub>	10,8
	Хромит	(Fe <sub>0,534</sub> Mg <sub>0,432</sub> Mn <sub>0,007</sub> Al <sub>0,027</sub> ) (Al <sub>0,574</sub> Fe <sub>0,173</sub> Mg <sub>0,036</sub> Cr <sub>1,187</sub> NiO)	7,5
	Алюмо-железистый оксид	AlFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	6,2
	Оксид кремния	SiO <sub>2</sub>	3,7
600	Сульфат магния	MgSO <sub>4</sub>	52,6
	Сульфат хрома	Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	10
	Микасайт	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	6,8
	Хромит	(Fe <sub>0,534</sub> Mg <sub>0,432</sub> Mn <sub>0,007</sub> Al <sub>0,027</sub> ) (Al <sub>0,574</sub> Fe <sub>0,173</sub> Mg <sub>0,036</sub> Cr <sub>1,187</sub> NiO)	6,2
	Алюмо-железистый оксид	AlFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4,9

1	2	3	4
	Вюстит	$\text{Fe}_{0,872}\text{O}$	4,1
	Оксид хрома	$\text{Cr}_2\text{O}_{2,4}$	3,9
	Кварц	$\text{SiO}_2$	3,7
	Оксид железа	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,6
	Оксид кремния	$\text{SiO}_2$	2,5
	Оксид хрома	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	1,6
700	Сульфат магния	$\text{MgSO}_4$	77,3
	Алюмо-железистый оксид	$\text{AlFe}_2\text{O}_4$	6,7
	Хромит	$(\text{Fe}_{0,5}\text{Mg}_{0,5})(\text{Cr}_{1,64}\text{Fe}_{0,28}\text{Ti}_{0,02}\text{Al}_{0,06})\text{O}_4$	5,9
	Оксид хрома	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	4,4
	Вюстит	$\text{Fe}_{0,872}\text{O}$	3,1
	Кварц	$\text{SiO}_2$	2,5
800	Сульфат магния	$\text{MgSO}_4$	75,3
	Хромит	$(\text{Fe}_{0,52}\text{Mg}_{0,48})(\text{Cr}_{0,76}\text{Al}_{0,24})_2\text{O}_4$	8,3
	Оксид хрома	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	6,8
	Алюмо-железистый оксид	$\text{AlFe}_2\text{O}_4$	5,9
	Вюстит	$\text{Fe}_{0,872}\text{O}$	3,7

На рисунке 15 в качестве примера показана рентгенограмма образца спека, полученного при температуре обжига 600°C.

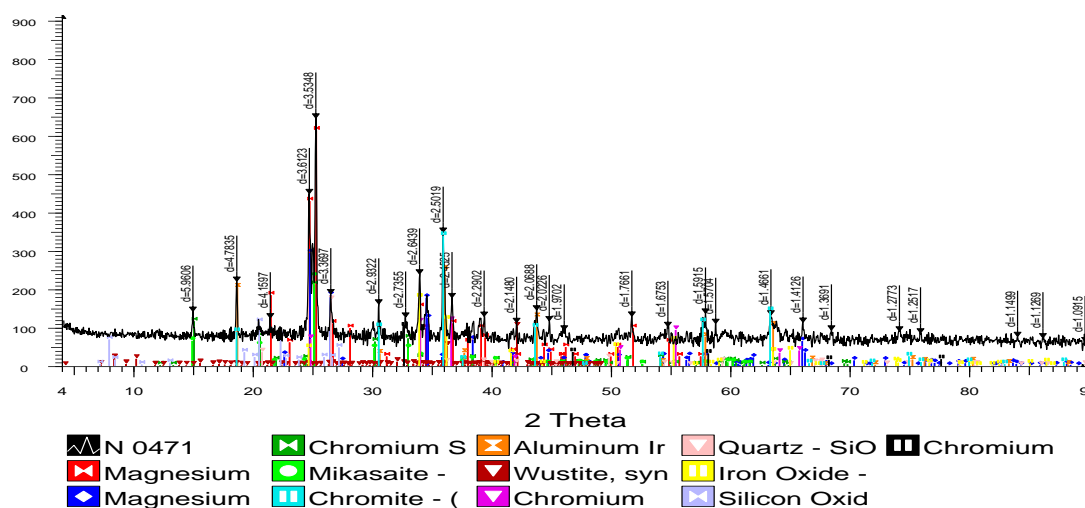


Рисунок 15 - Рентгенограмма спека при температуре 600 °С

Установлено, что при сульфатизирующем обжиге хромитсодержащих шламов обогащения в присутствии угля при температуре 500 °С наблюдаются принципиальные изменения фазового состава: в полученном

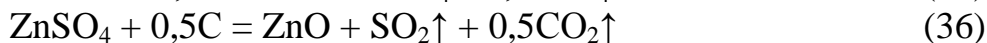
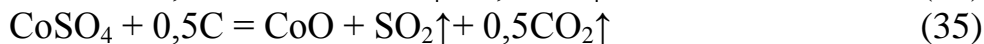
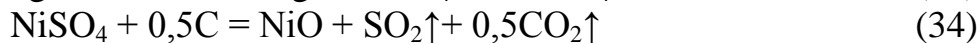
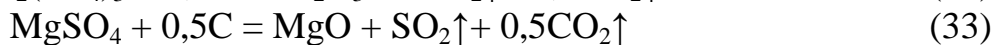
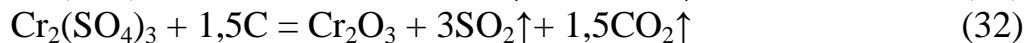
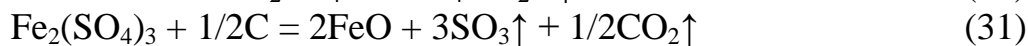
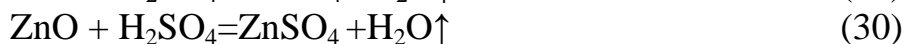
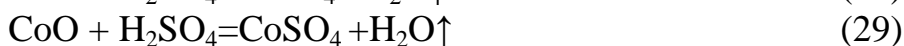
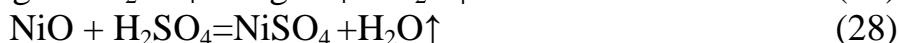
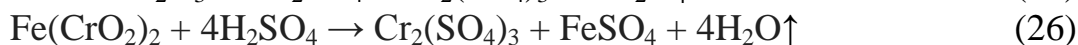
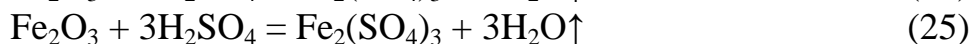
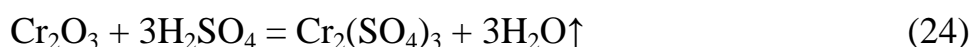


спеке практически отсутствуют фазы клинохризолита, лизардита, клинохлора. Конечный состав спека представлен, в основном, одной фазой – хромитом. В незначительном количестве обнаружены сульфаты Mg, Fe, Cr и оксида кремния. При температуре 600 °С в спеке, кроме сульфатов присутствуют оксиды металлов Cr и Fe. При температуре 700-800 °С в спеке присутствуют сульфат магния и оксиды металлов.

Показано, что с ростом температуры количество фаз оксида кремния в спеке уменьшается и при температуре 800 °С полностью переходит в аморфное состояние, которое невозможно определить рентгенофазовым методом анализа.

Результаты фазового состава спеков свидетельствуют о том, что при сульфатизирующем обжиге с восстановителем протекают химические реакции, которые были рассмотрены при термодинамическом анализе хромитсодержащего шлама обогащения. Это полностью подтверждает ранее сделанные выводы о селективном разделении ценных элементов в целевые продукты путем термодинамических расчетов.

Таким образом, полученные результаты показывают принципиальную возможность селективного извлечения ценных элементов из хромитсодержащих шламов путем сульфатизирующего обжига в присутствии твердого восстановителя (угля). Механизм данного процесса можно описать системой протекания реакций:



Результаты исследований влияния продолжительности обжига на изменение состава спека, полученные при сульфатизации хромитсодержащего шлама обогащения при температуре 500 °С в течение 1-4 часов представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Химические составы спеков, полученные при сульфатизирующем обжиге в зависимости от продолжительности обжига. T=500 °C, % масс.

Элементы	Время, час			
	1	2	3	4
Cr	9,999	10,284	10,009	9,777
Mg	10,252	10,695	10,214	9,866
Fe	3,578	3,740	3,635	3,472
Si	6,726	6,714	6,569	6,266
Al	0,719	0,738	0,683	0,718
S	14,939	15,864	15,114	14,465
Ni	0,137	0,140	0,139	0,134
Co	0,015	0,013	0,012	0,015
Zn	0,010	0,017	0,008	0,010

Видно, что продолжительность обжига на химический состав спеков практически не влияет. Установленная зависимость имеет большое значение для энергопотребления производства.

На следующем этапе изучено влияние расхода серной кислоты на конечные показатели обжига. Расход серной кислоты меняли исходя из соотношения серной кислоты к массе исходного шлама равной 0,6÷1,6. Опыты проводили при температуре 500 °C в течение 60 минут.

Результаты исследований приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Химический состав спеков, полученные при сульфатизирующем обжиге при различном расходе серной кислоты, % масс.

Элементы	Отношение хромитсодержащего шлама к H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			
	1:0,6	1:0,7	1,1	1:1,6
Cr	14,257	13,233	11,845	9,999
Mg	10,066	9,874	10,041	10,252
Fe	4,993	4,539	4,194	3,578
Si	5,679	5,619	6,088	6,726
Al	1,201	1,093	0,875	0,719
S	11,184	11,583	13,010	14,939
Ni	0,186	0,189	0,151	0,137
Co	0,021	0,024	0,018	0,015
Zn	0,012	0,013	0,010	0,010

Установлено, что увеличение расхода серной кислоты ведет к повышению содержания серы в спеке, что подтверждается характерным ростом наличия сульфатов в спеке,

Таким образом, в результате исследований установлены закономерности влияния температуры, продолжительности и расхода серной кислоты на конечные технологические показатели сульфатизирующего обжига в присутствии твердого восстановителя. Установлено, что наилучшие показатели обжига достигаются при оптимальной температуре 500 °С, продолжительности обжига - 1 час и расходе серной кислоты к массе шлама равной 1:1. При этом получаемый спек представлен одной фазой – хромитом. Это свидетельствует о том, что при сульфатизирующем обжиге уже на начальной стадии можно селективно извлечь хром с переводом сопутствующих элементов в раствор.

С целью уточнения полученных результатов были проведены укрупненные балансовые опыты, суть которых заключалась в следующем.

Исходную навеску хромитсодержащего шлама в количестве 200 г крупностью частиц -0,25 мм смешивали с 220 г концентрированной серной кислоты. К исходной навеске добавляли 20 г угля, после чего шихту обжигали при выбранных оптимальных условиях.

Выход спека после обжига составил 301,4 г. Результаты химического, рентгенофазового состава полученного спека приведены в таблице 11, 12 и на рисунке 16, соответственно.

Таблица 11 – Химический состав спека

Наименование компонентов	Содержание, %
Mg	11,679
Cr	12,276
Fe	4,579
Ni	0,180
Co	0,009
Zn	0,009
Si	7,432
Al	0,929
PЗЭ	0,017
O <sub>2</sub>	17,319
SO <sub>4</sub>	45,117
п.п	0,465

Таблица 12 - Рентгенофазовый анализ спека

Наименование	Формула	%
Хромит	$(\text{Fe}_{0,548}\text{Mg}_{0,443}\text{Mn}_{0,009})(\text{Al}_{0,487}\text{Fe}_{0,206}\text{Mg}_{0,020}\text{Cr}_{1,257}\text{Ni}_{0,004}\text{TiO})$	34,1
Гексагидрит	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20,5
Меказит	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	16,4
Кайсерит	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	14,7
Кварц	$\text{SiO}_2$	14,3

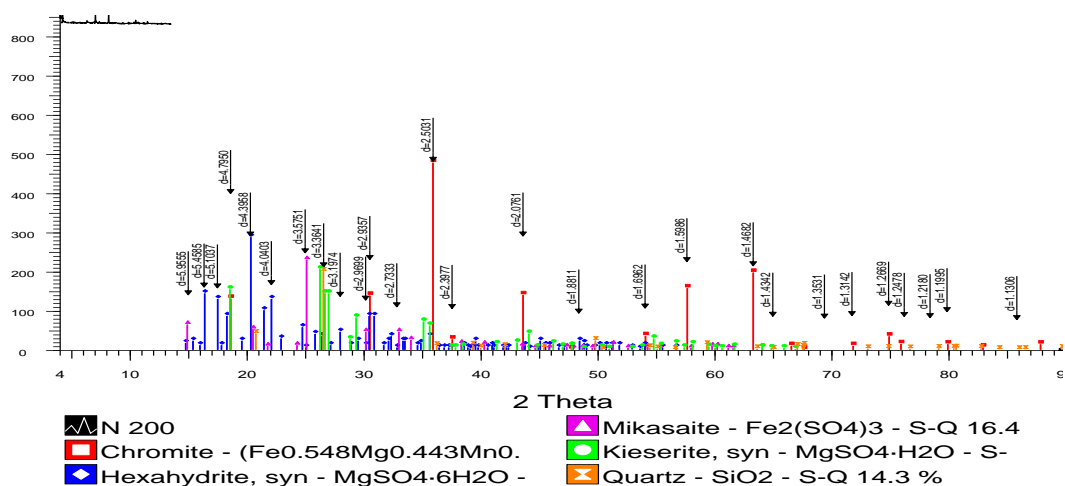


Рисунок 16 – Рентгенограмма спека

Из полученных результатов видно, что при оптимальных условиях сульфатизирующего обжига образование сульфата хрома исключено. Это указывает на то, что при последующей операции выщелачивания хром не извлекается в жидкую фазу (раствор), а остается в твердом остатке. При этом обеспечивается полное разделение хрома от магния, что полностью подтверждает механизм поведения магния и хрома при сульфатизирующем обжиге, которое было установлено в результате термодинамического анализа.

## 3.2 Выбор и оптимизация технологических параметров выщелачивания хромитсодержащего спека водой

### 3.2.1 Методика проведения экспериментов

Для проведения опытов использованы спеки, полученные при различных температурах обжига (500-800 °С), времени сульфатизации и различном расходе серной кислоты. Методика проведенных опытов заключалась в следующем. Измельченный до крупности частиц -0,25 мм спек смешивали с водой. Полученную пульпу выщелачивали при  $t = 80$  °С в течение 90 минут в термостатированной ячейке с механическим перемешиванием. Общая схема установки показана на рисунке 17.

По истечении необходимого времени выщелачивания пульпу фильтровали. Полученные продукты подвергали химическому анализу. По истечении необходимого времени выщелачивания пульпу фильтровали. Полученные продукты подвергали химическому анализу.



Рисунок 17 – Общий вид установки

### 3.2.2 Результаты опытов и их обсуждения

Основная цель проведенных опытов заключалась в принципиальной очистке хромитового спека от водорастворимых соединений сопутствующих элементов. Опыты проводились при избыточном расходе воды. Отношение Т:Ж (отношение твердой фазы к жидкой) – 1:10.

Результаты опытов по выщелачиванию спеков, полученных при различных температурах и времени обжига водой представлены в таблицах 13-15.

По полученным данным химического анализа кека проведены расчеты степени извлечения ценных элементов в раствор в зависимости от исследованных параметров. Изменения степени извлечения от различных параметров для каждого спека приведены на рисунках 18-20.

Таблица 13 – Результаты опытов по выщелачиванию спеков водой полученных при различных температурах сульфатирующего обжига

Температура, °С	Элементы	Содержание, %
1	2	3
500 °С	Mg	1,703
	Cr	19,453
	Si	19,069
	Fe	5,835
	Ni	0,086
	Co	0,013
600°С	Mg	1,564
	Cr	20,023
	Si	19,402
	Fe	6,025
	Ni	0,090
	Co	0,0076

1	2	3
700 °С	Mg	1,057
	Cr	22,874
	Si	21,448
	Fe	6,622
	Ni	0,146
	Co	0,019
800 °С	Mg	2,509
	Cr	21,945
	Si	20,910
	Fe	7,137
	Ni	0,287
	Co	0,027

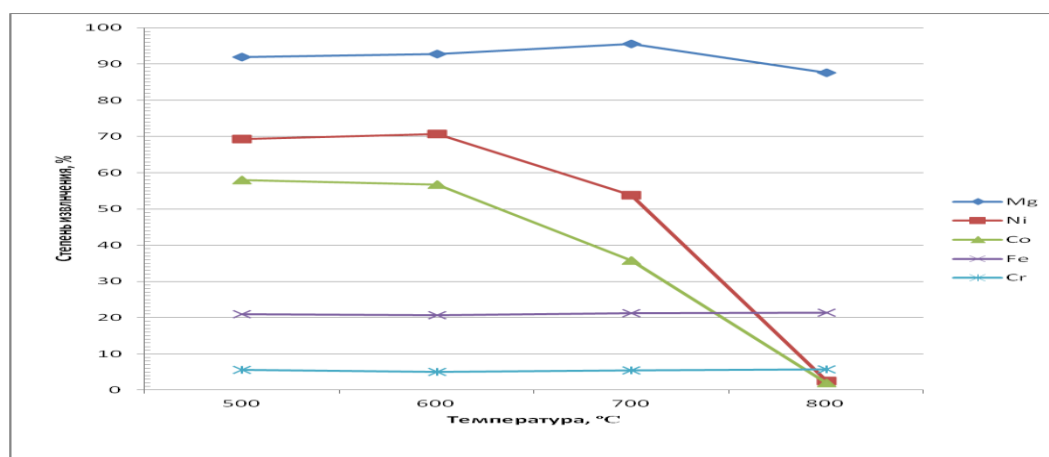


Рисунок 18 – Степень извлечения элементов в целевые продукты в зависимости от температуры сульфатизации (500-800 °С)

Результаты проведенных экспериментов указывают на низкое извлечение хрома в жидкую фазу (не более 6 %). Нетрудно видеть высокое извлечение магния в жидкую фазу до 96 % в температурном интервале от 500 до 700 °С. Переход магния из спеков, полученных при температуре выше 700 °С, ведет к резкому снижению его извлечения в жидкую фазу – с 95,6 % до 87,6 % (при температуре 800 °С).

Степень извлечения железа в жидкую фазу сильно не меняется, и остается в узком коридоре изменений в пределах от 20,9 % до 21,4 %. Извлечение никеля и кобальта резко начинает снижаться при температуре 700 °С, а при температуре равной 800 °С почти не извлекаются в жидкую фазу. Это указывает на то, что увеличение температуры выше 600 °С при сульфатирующем обжиге хромитсодержащего шлама обогащения не целесообразно.

Таблица 14 – Результаты опытов по выщелачиванию спеков, полученных при различном времени сульфатизации

Время, час	Элементы	Содержание, %
1	Mg	1,703
	Cr	19,453
	Si	19,069
	Fe	5,835
	Ni	0,086
	Co	0,013
2	Mg	1,856
	Cr	18,278
	Si	18,277
	Fe	5,603
	Ni	0,082
	Co	0,0104
3	Mg	2,266
	Cr	17,846
	Si	17,881
	Fe	5,411
	Ni	0,085
	Co	0,0097
4	Mg	1,942
	Cr	17,233
	Si	17,772
	Fe	5,140
	Ni	0,079
	Co	0,012

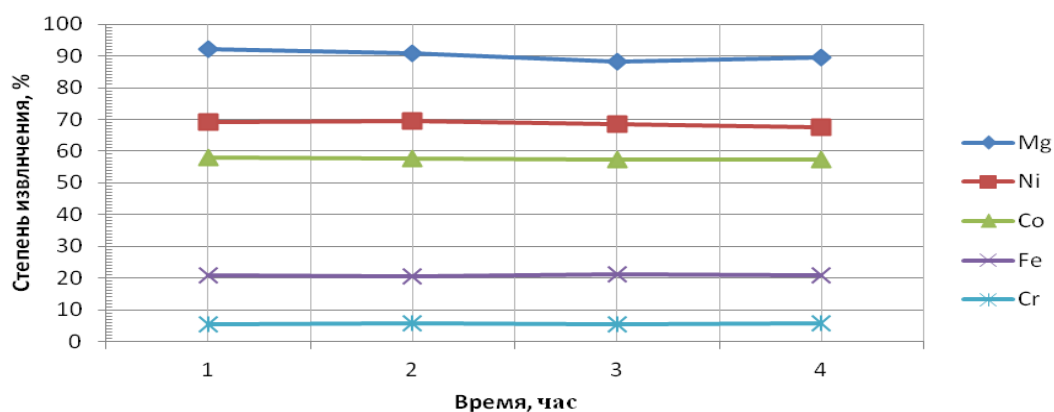


Рисунок 19 – Степень извлечения элементов в жидкую фазу в зависимости от времени сульфатизации

Приведенные данные показывают низкое извлечение хрома в жидкую фазу - не более 6 %. Извлечение других компонентов при повышении времени обжига спека практически не меняется и остается постоянным.

Таблица 15 – Результаты опытов после выщелачивания спеков в зависимости от расхода серной кислоты (отношение хромитсодержащего шлама к серной кислоте)

Расход серной кислоты	Элементы	Содержание, %
1:0,6	Mg	4,181
	Cr	15,291
	Si	19,549
	Fe	6,622
	Ni	0,153
	Co	0,019
1:0,7	Mg	3,103
	Cr	22,523
	Si	18,628
	Fe	6,517
	Ni	0,142
	Co	0,0184
1:1	Mg	2,379
	Cr	21,702
	Si	19,813
	Fe	5,886
	Ni	0,082
	Co	0,0135
1:1,6	Mg	1,703
	Cr	19,453
	Si	19,069
	Fe	5,835
	Ni	0,086
	Co	0,013

Из рисунка 20 видно, что степень извлечения магния в раствор при увеличении расхода серной кислоты растет от 74,7 до 92 %. Также наблюдается извлечение никеля и кобальта в раствор при повышении расхода серной кислоты. Степень извлечения железа в жидкую фазу сильно не меняется и варьируется в пределах от 19,1 до 20,9 %.

Степень извлечения хрома в раствор, независимо от роста серной кислоты, остается достаточно низким и не превышает 6 %.



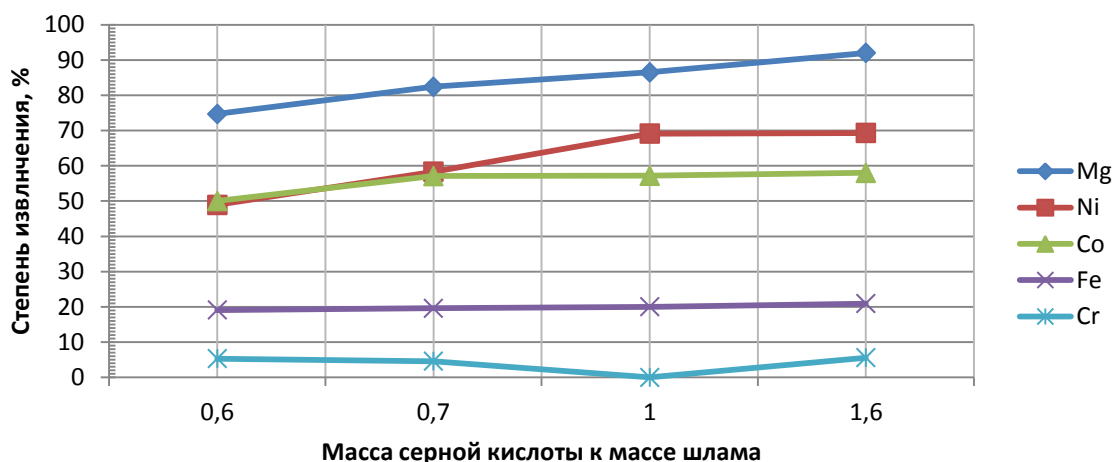


Рисунок 20 – Степень извлечения элементов в жидкую фазу в зависимости от расхода серной кислоты

*Определение оптимального расхода воды для выщелачивания спека.* В проведенных опытах по вышеописанной методике определяли оптимальный расход воды, необходимый для выщелачивания полученного после обжига спека. Отношение твердой фазы к жидкой меняли – от 1:2,5 до 1:10. Результаты опытов представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Результаты опытов выщелачивания спеков водой в зависимости от Т:Ж

Т:Ж	Элементы	Содержание, %
1	2	3
1:2,5	Mg	1,962
	Cr	20,504
	Si	21,779
	Fe	5,438
	Ni	0,104
	Co	0,0124
1:5	Mg	2,214
	Cr	20,681
	Si	21,566
	Fe	5,466
	Ni	0,104
	Co	0,0125
1:7,5	Mg	2,116
	Cr	21,371
	Si	20,817
	Fe	5,418
	Ni	0,082
	Co	0,0121

1	2	3
1:10	Mg	1,703
	Cr	19,453
	Si	19,069
	Fe	5,835
	Ni	0,086
	Co	0,013

Зависимость степени извлечения ценных элементов в жидкую фазу от расхода воды приведена на рисунке 21.

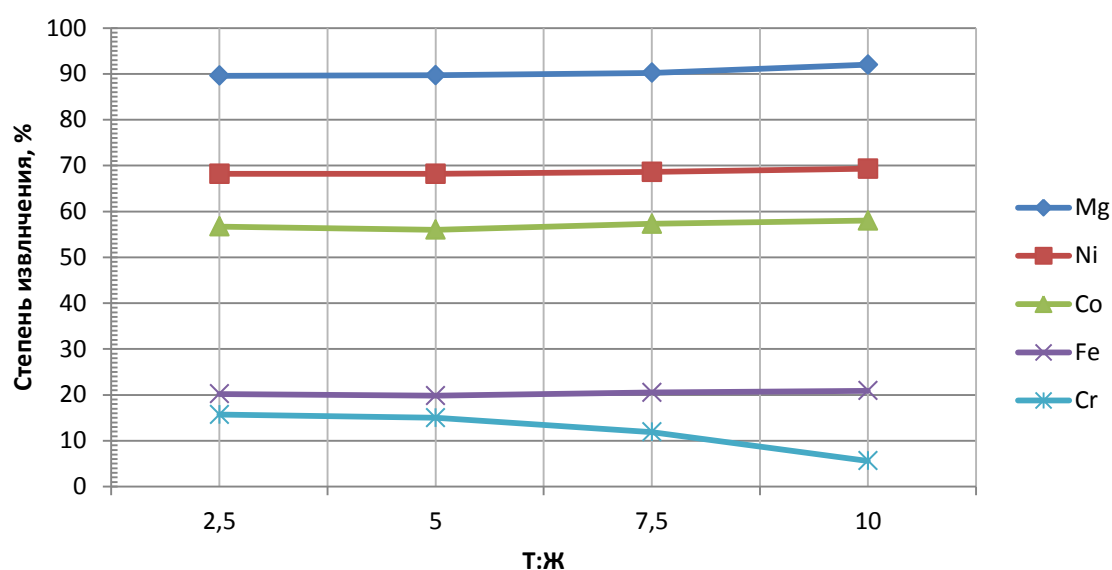


Рисунок 21 – Степень извлечения элементов в зависимости от Т:Ж

На рисунке 21 видно, что при увеличении Т:Ж извлечение хрома в жидкую фазу снижается при от 15,7 (Т:Ж=5) до 5,6 % (Т:Ж=10).

Незначительный рост степени извлечения магния в жидкую фазу от 89,6 до 92 % можно наблюдать при повышении Т:Ж от 7,5 до 10. Извлечение никеля, кобальта и железа в раствор сильно не меняется и, независимо от увеличения расхода воды, варьирует в узких пределах: Ni – 68,2 ÷ 69,3 % ; Co – 56,0 ÷ 58,0 %; Fe–19,8 ÷ 20,9 %.

Полученные результаты по выщелачиванию спеков водой показывают возможность разделения, полученного после обжига твердого, нерастворимого остатка содержащего хром от водорастворимых соединений магния, цветных металлов и редкоземельных элементов. При этом, как показывают результаты проведенных опытов, наилучшие результаты извлечения сопутствующих элементов в раствор достигаются при соотношении твердой фазы к жидкой фазе равном 1:10.

### 3.2.3 Характеристика продуктов выщелачивания

После выщелачивания спеков водой образуются два промпродукта: производственный раствор объемом 3,0 дм<sup>3</sup>, содержащий магний, цветные металлы и РЗЭ, состав которого приведен в таблице 17 и кек (черновой хромитовый концентрат) массой 131,5 г, химический состав и извлечение контролируемых компонентов которого приведены в таблице 18.

Результаты рентгенофазового анализа кека показаны в таблице 19 и на рисунке 22.

Таблица 17 - Состав производственного раствора

Элементы	Mg	Fe	Ni	Co	Zn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> св.
Концентрация, г/дм <sup>3</sup>	10,167	0,933	0,125	0,005	0,004	43,246	2,125

Таблица 18 – Химический состав и извлечение контролируемых компонентов чернового хромитового концентрата в раствор

Наименование компонентов	Содержание, %	Степень извлечения в раствор, %
Mg	3,574	86,6
Cr	28,137	не извл.
Fe	8,365	20,3
Ni	0,128	69,0
Co	0,009	57,1
Zn	0,011	46,4
Si	17,034	не извл.
Al	2,129	не извл.
РЗЭ	0,015	60,0
O <sub>2</sub>	39,696	-
SO <sub>4</sub>	0,035	-
прочие	0,878	14,3

Таблица 19 - Рентгенофазовый анализ чернового хромитового концентрата

Наименование	Формула	%
Хромит	(Fe <sub>0,52</sub> Mg <sub>0,48</sub> )(Cr <sub>0,72</sub> Al <sub>0,28</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	79,8
Лизардит-1М	(Mg,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	15,7
Меланофлогит	SiO <sub>2</sub>	4,5

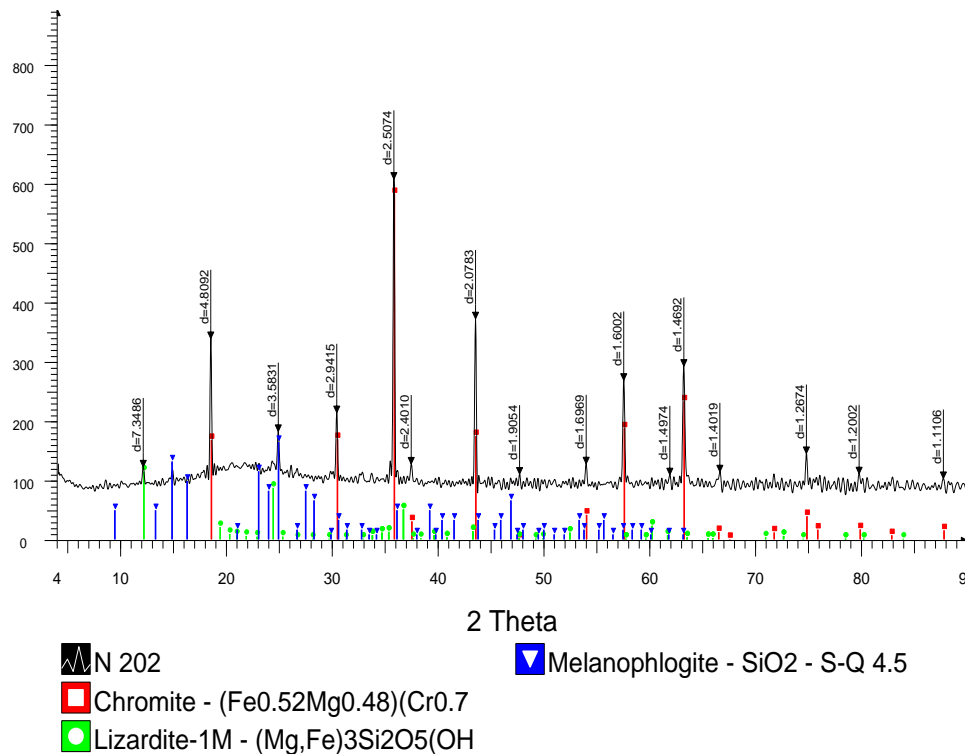


Рисунок 22 – Рентгенограмма черного хромитового концентрата

### 3.2.4 Распределение металлов между продуктами выщелачивания

Распределение элементов по продуктам, полученным после выщелачивания спеков водой, показано на рисунке 23.

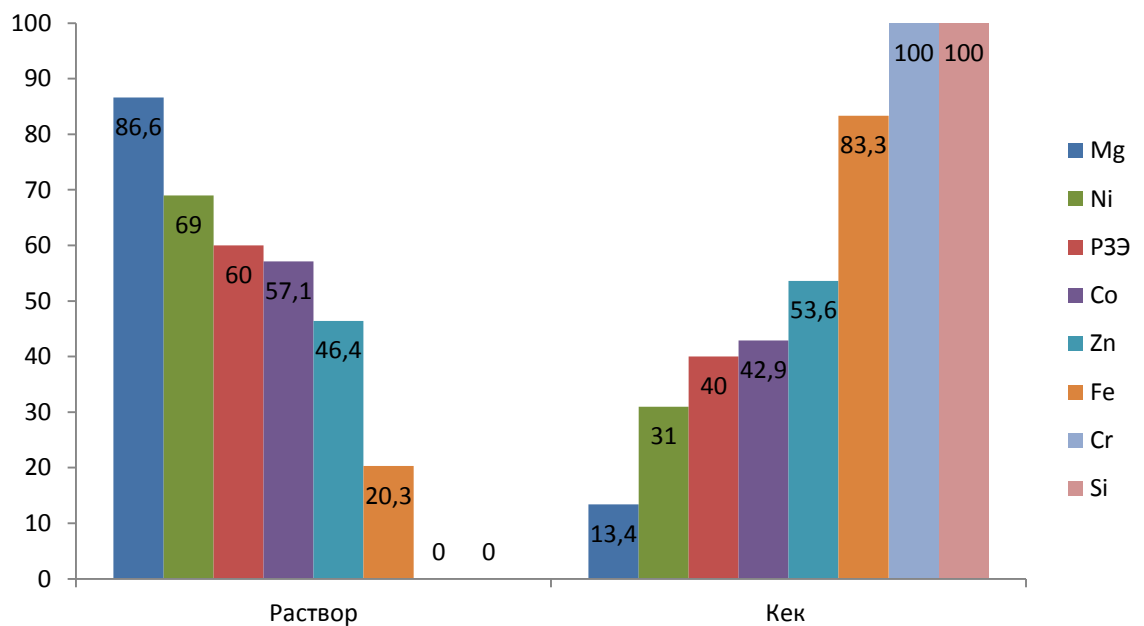


Рисунок 23 – Распределение элементов между кеком и раствором

## **4 Разработка способов извлечения хрома, цветных и редкоземельных металлов в целевые продукты из продуктов выщелачивания**

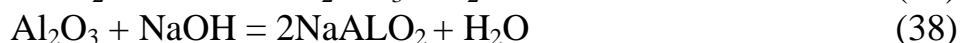
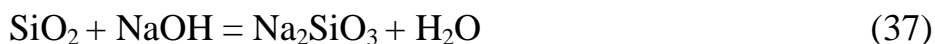
### **4.1 Способ переработки хромитсодержащего кека**

#### **4.1.1 Щелочной способ извлечения хрома в хромитовый концентрат**

Полученный после выщелачивания водой кек содержит высокое содержание кремнезема, наличие которого требует решения вопроса его удаления с целью получения товарного продукта в виде хромитового концентрата. Как показывают литературные данные, наиболее эффективным способом разделения кремнезема от хрома является щелочной способ выщелачивания кека. Выбор оптимальных параметров способа представляет традиционную задачу применительно к конкретному составу исходного материала.

В настоящей главе представлены результаты исследований щелочного выщелачивания кека, полученного после выщелачивания спека водой. Методика проведенных опытов заключалась в следующем. Хром, кремнезем содержащий кек, в количестве 10 г смешивали с щелочным раствором натрия. Полученную пульпу выщелачивали в термостатированной ячейке с механическим перемешиванием. После выщелачивания пульпу фильтровали. Полученные после фильтрации продукты – раствор и кек, подвергали химическому, рентгенофазовому анализу на содержание в них кремнезема и других ценных элементов. Опыты проводили при различных значениях Т:Ж, концентрации  $\text{Na}_2\text{O}$ , времени, температуры выщелачивания.

В основу щелочного способа выщелачивания положен механизм взаимодействия основных примесей (оксид кремнезема, оксид алюминия) со щелочью по реакциям:



с переводом примесей в раствор.

Результаты опытов приведены в таблицах 20 – 23.

Таблица 20 – Влияние Т:Ж на извлечение Si в раствор, при продолжительности опыта – 2 часа, концентрации Na<sub>2</sub>O – 200г/дм<sup>3</sup>, температуре опыта – 200 °С

Т:Ж	Наименование показателей		
	Количество кека, г	Содержание Si, %	Степень извлечение Si в раствор, %
1:2	13,2	11,527	83,91
1:3	13,5	9,957	85,27
1:4	9,2	8,495	84,0
1:5	9,1	8,862	82,2
1:10	6,3	3,611	89,06

Таблица 21 – Влияние концентрации Na<sub>2</sub>O на извлечение Si в раствор, при продолжительности опыта – 2 часа, Т:Ж = 1:10, температуре опыта – 200 °С

Концентрация Na <sub>2</sub> O, г/дм <sup>3</sup>	Наименование показателей		
	Количество кека, г	Содержание Si, %	Степень извлечение Si в раствор, %
100	7,0	5,006	83,14
200	6,3	3,611	89,06
300	6,5	3,368	89,45

Таблица 22 – Влияние продолжительности опыта на извлечение Si в раствор, при Т:Ж = 1:10, концентрации Na<sub>2</sub>O – 200 г/дм<sup>3</sup>, температуре опыта – 200 °С

Продолжительность опыта, час	Наименование показателей		
	Количество кека, г	Содержание Si, %	Степень извлечение Si в раствор, %
2	6,3	3,611	89,06
4	6,5	3,072	90,36
6	6,4	3,569	89,0

Таблица 23 – Влияние температуры опыта на извлечение Si в раствор, при Т:Ж = 1:10, концентрации Na<sub>2</sub>O – 200 г/дм<sup>3</sup>, продолжительности опыта – 2 часа

Температура опыта, °С	Наименование показателей		
	Количество кека, г	Содержание Si, %	Степень извлечение Si в раствор, %
100	6,7	3,611	89,98
200	6,3	3,611	89,06

Установлено, что оптимальные условия щелочного выщелачивания: Т:Ж=1:10, концентрация Na<sub>2</sub>O - 200 г/дм<sup>3</sup>, время выщелачивания - 2 ч, температура выщелачивания – 100 °С, обеспечивают высокое извлечение (~ 90 %) кремнезема в раствор.

Для улучшения фильтрации пульпы, полученной после выщелачивания, ее разбавляли водой с увеличением объема исходной навески в два раза. После фильтрации, промывки и сушки получены два продукта - кремнийсодержащий щелочной раствор объемом 2,63 дм<sup>3</sup> и твердый остаток в количестве 88,0 г. Составы полученных продуктов приведены в таблице 24 и 25.

Таблица 24 - Состав щелочного кремнийсодержащего раствора

Компоненты	SiO <sub>2</sub>	Al	Na <sub>2</sub> O
Концентрация, г/дм <sup>3</sup>	16,459	0,011	81,445

Таблица 25– Химический состав хромитового концентрата

Элементы	Содержание, %
Cr (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	42,045 (61,450)
SiO <sub>2</sub>	5,357
Fe	12,500
Mg	5,341
Al	3,150
Ni	0,191
Co	0,016
Zn	0,017
SO <sub>4</sub>	0,052
прочие	34,177

В таблице 26 и на рисунке 24 показаны результаты рентгенофазового анализа полученного твердого остатка (кека).

Таблица 26 – Результаты рентгенофазового анализа твердого остатка (кека)

Наименование	Формула	%
Хромит	(Fe <sub>0,52</sub> Mg <sub>0,48</sub> )(Cr <sub>0,76</sub> Al <sub>0,24</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	100

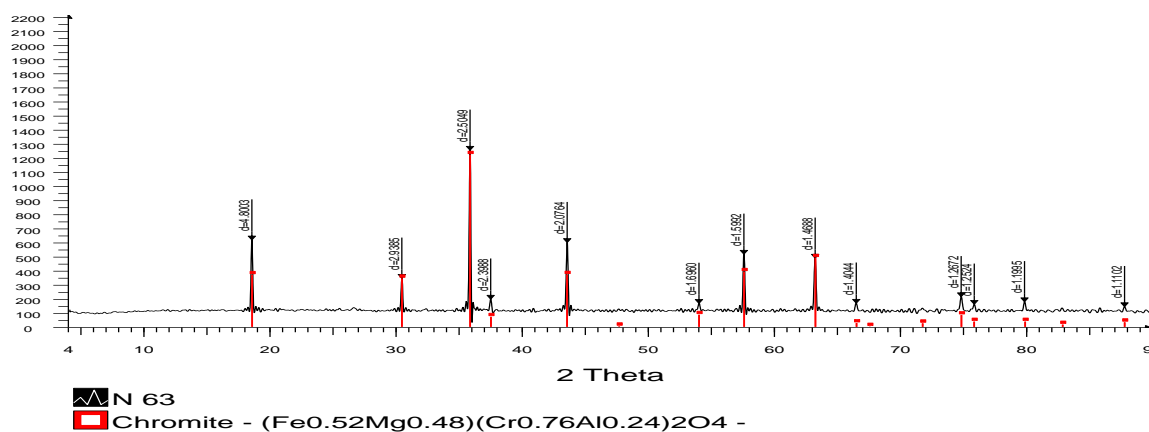


Рисунок 24 – Рентгенограмма хромитового концентрата

Полученный после щелочного выщелачивания твердый остаток (кек) по химическому составу соответствовал хромитовому концентрату, предъявляемым к составам хромовых концентратов для получения ферросплавов на Донском горно – обогатительном комбинате (Приложение Б).

Общий вид полученного хромитового концентрата показан на рисунке 25.



Рисунок 25 – Общий вид хромитового концентрата

Результаты исследований показали, что при щелочном выщелачивании 90 % кремния переходит в раствор. Извлечение алюминия в раствор составляет ~1 %.

#### 4.1.2 Извлечение диоксида кремния из раствора

Для выделения диоксида кремния из раствора использован метод карбонизации, включающий обработку раствора углекислым газом в течении одного часа при температуре 70 °С. Скорость подачи газа составляла 3 дм<sup>3</sup>/мин, контроль и регулирование которой осуществляли с помощью ротаметра.



Исходная навеска раствора – 2,63 дм<sup>3</sup>. Состав раствора приведен в таблице 24.

Процесс разделения жидкой и твердой фазы проводили на центрифуге с получением содового раствора и кремнегеля. Полученный кремнегель после промывки дистиллированной водой (pH=7,5) подвергали двухстадийной сушке.

В первой стадии кремнегель сушили в сушильном шкафу при температуре 105 °С.

На второй стадии сушку проводили во вращающейся трубчатой печи при температуре 500 - 700 °С.

После двухстадийной сушки полученный аморфный кремнезем взвешивали и подвергали химическому методу анализа. Количество полученного аморфного кремнезема после сушки составило 45,5 г. Общий вид аморфного кремнезема представлен на рисунке 26.



Рисунок 26 – Общий вид аморфного кремнезема

Химический состав полученного аморфного кремнезема приведен в таблице 27.

Таблица 27 - Химический состав полученного аморфного кремнезема

Наименование компонентов	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	п.п.п.
Содержание, %	92,3	0,50	0,21	0,05	0,12	0,02	0,5	6,3

На рисунке 27 показана микроструктура аморфного кремнезема

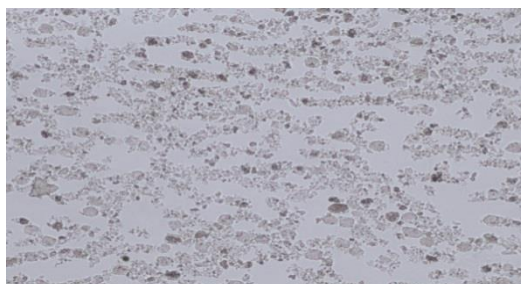


Рисунок 27 – Аморфный кремнезем 200x

Удельную поверхность частиц и средний размер пор полученного аморфного кремнезема определили методом однотоочечного БЭТ-анализа на приборе «Сорбтометр М» (фирма «Катакон», Россия). Суть БЭТ-анализа (метод Брунауэра-Эммета-Тейлера) состоит в анализе количества сорбированного газа (азота) при постоянной температуре и постепенном повышении давления по изотерме газа.

Размер частиц полученного аморфного кремнезема рассчитывали по формуле:

$$d = \frac{6}{S_{уд} \cdot \rho} \quad (39)$$

где  $d$  – диаметр частиц, мм;  $S_{уд}$  – удельная поверхность,  $\text{м}^2/\text{г}$ ;  
 $\rho$  – плотность твердого тела,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

Истинная плотность различных видов аморфного кремнезема находятся в пределах  $1750\text{-}2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , т.е. в среднем  $1875 \text{ кг}/\text{м}^3$ , или  $1875000 \text{ г}/\text{м}^3$ . В расчетах принята средняя величина плотности [23-25].

Удельная поверхность аморфного кремнезема составила  $117,15 \text{ м}^2/\text{г}$ , размер частиц –  $0,027 \text{ мм}$ , удельный объем пор –  $0,05 \text{ см}^3/\text{г}$ , средний размер пор  $1,716 \text{ нм}$ . Высокие показатели установленных значений показывают, что полученный аморфный кремнезем имеет плотную упорядоченную структуру с минимальными размерами зерен и практически не содержит пор, в отличие от кремнезема, полученного по известным технологиям.

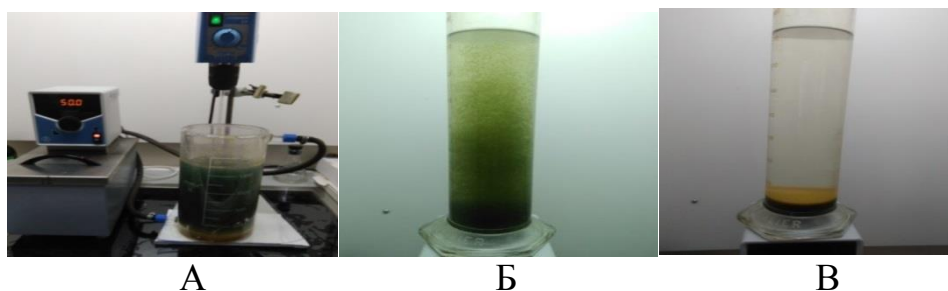
По химическому составу и микроструктуре полученный кремнегель соответствует марке БС – 100. При этом достигнуто высокое извлечение (до 97 %) кремнезема в товарный продукт.

## **4.2 Переработка производственного раствора выщелачивания**

### **4.2.1 Извлечение цветных металлов и редкоземельных элементов в концентрат путем нейтрализации производственного раствора гидрооксидом аммония**

Для получения концентрата цветных металлов, содержащего РЗЭ использовали способ нейтрализации производственного сернокислого раствора 25 % раствором аммиака  $\text{pH}=8,5$ . Нейтрализацию проводили в термостатированной ячейке с механическим перемешиванием при температуре  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  и продолжительности 90 минут. По истечении заданного времени полученная пульпа подвергалась декантации и фильтрации.

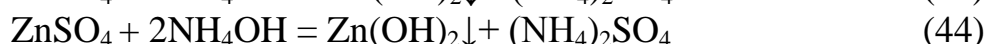
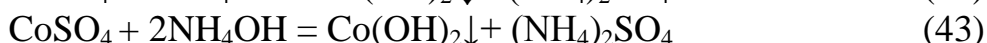
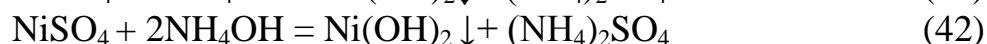
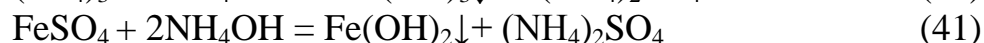
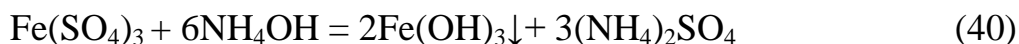
Общий вид процесса нейтрализации показан на рисунке 28.



А) – нейтрализация раствора; Б) – пульпа, полученная после нейтрализации; В) – декантация

Рисунок 28 – Последовательность проведения процесса нейтрализации продукционного раствора

Механизм извлечения цветных металлов из продукционного сернокислого раствора можно описать системой протекания следующих реакции:



После нейтрализации получены два продукта: магнийсодержащий раствор объемом 3,470 дм<sup>3</sup>, и концентрат цветных металлов, содержащий РЗЭ.

Полученный раствор содержал, г/дм<sup>3</sup>: Mg – 8,790; (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 53,754; NH<sub>4</sub>OH<sub>своб.</sub> – 36,887.

Химический состав концентрата цветных металлов показан в таблице 28.

Таблица 28 – Состав концентрата цветных металлов, содержащий РЗЭ

Наименование элементов	Содержание, %
Fe	62,2
Ni (NiO)	8,311 (10,565)
Co	0,355
РЗЭ	0,667
Zn	0,288
Прочие	28,155

Общий вид полученного концентрата цветных металлов, содержащих РЗЭ, показан на рисунке 29.



Рисунок 29 – Общий вид концентрата цветных металлов

На основании экспериментальных данных рассчитано распределение элементов по продуктам нейтрализации. Результаты представлены на рисунке 30.

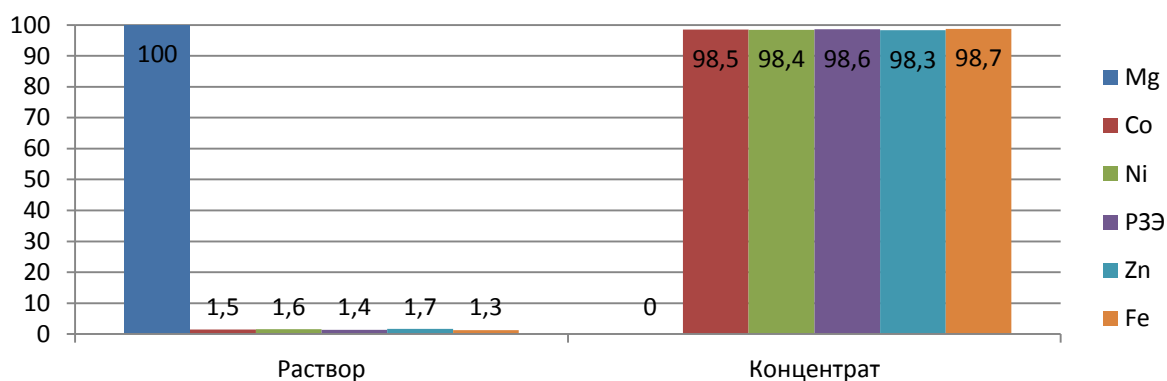


Рисунок 30 – Распределение элементов по продуктам нейтрализации

#### 4.2.2 Извлечение магния из производственного раствора, полученного после нейтрализации

С целью получения товарного магнийсодержащего продукта раствор выщелачивания, после выделения концентрата цветных металлов, содержащих РЗЭ, объемом 3,469 дм<sup>3</sup>, подвергали дополнительной обработке. Методика опытов заключалась в следующем. Раствор подвергали выпариванию при температуре 100 °С. Далее пульпу охлаждали до 20-25 °С и подвергали фильтрации. В результате опытов получен порошок белого цвета массой 255 г, общий вид которого показан на рисунке 31.



Рисунок 31 – Порошкообразный осадок, полученный после выпаривания производственного раствора

Полученный осадок подвергался химическому и рентгенофазовому анализам. Результаты химического анализа осадка показали высокое до 97 % содержание магния в нем.

В таблице 29 и на рисунке 32 приведены результаты рентгенофазового анализа полученного образца.

Таблица 29 – Рентгенофазовый анализ осадка выпаривания раствора

Наименование	Формула	%
Буссингаултит	$(\text{NH}_4)_2(\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6)(\text{SO}_4)_2$	87,1
Маскагнит	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	12,9

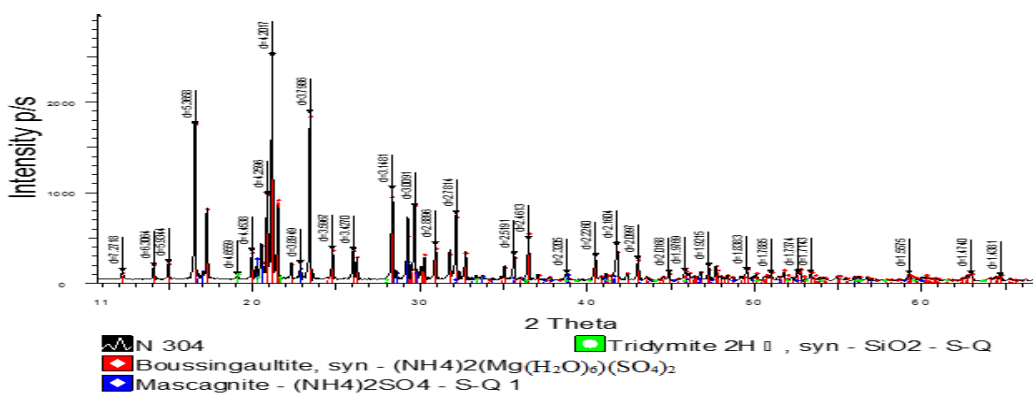


Рисунок 32 – Рентгенофазовый анализ осадка

Как показывают результаты рентгенофазового анализа, полученный твердый осадок, в основном, представлен двумя солями – магнием содержащий буссингаултит и маскагнит, представленный в виде сульфата аммония с содержанием (таблица 29). Наличие последнего, безусловно, будет оказывать влияние на физико-химические свойства сульфата магния. С целью проверки данного предположения, а также выработки оптимальных решений для получения конечного товарного продукта в виде чистого сульфата магния нами проведены дополнительные исследования с использованием метода ТГ-ДТА.

Опыты проводили в двух режимах нагрева исходного образца – 620 °С и 920 °С.

Предварительный нагрев был осуществлен с целью определения температуры плавления пробы. На кривой ДТА (рисунок 33) зафиксированы эндотермические эффекты с экстремумами при 188,4 °С, 339,3 °С, 483 °С, 545,2 °С. Все эффекты развиты на фоне снижения массы навески. После последнего эффекта масса стабилизировалась. На кривой ДТА выявлены дополнительные эндотермические эффекты с максимальным развитием при 490,4 °С и 567 °С. Все эндотермические эффекты кривой ДТА отражают поэтапную дегидратацию и удаление аммониевой группы. Эффекты на кривой ДТА являются проявлением плавления сульфата аммония (490,4 °С) и энантиотропного полиморфного превращения кварца (567 °С). Проба в ходе нагрева до 620 °С потеряла 66 % массы, но не расплавилась.

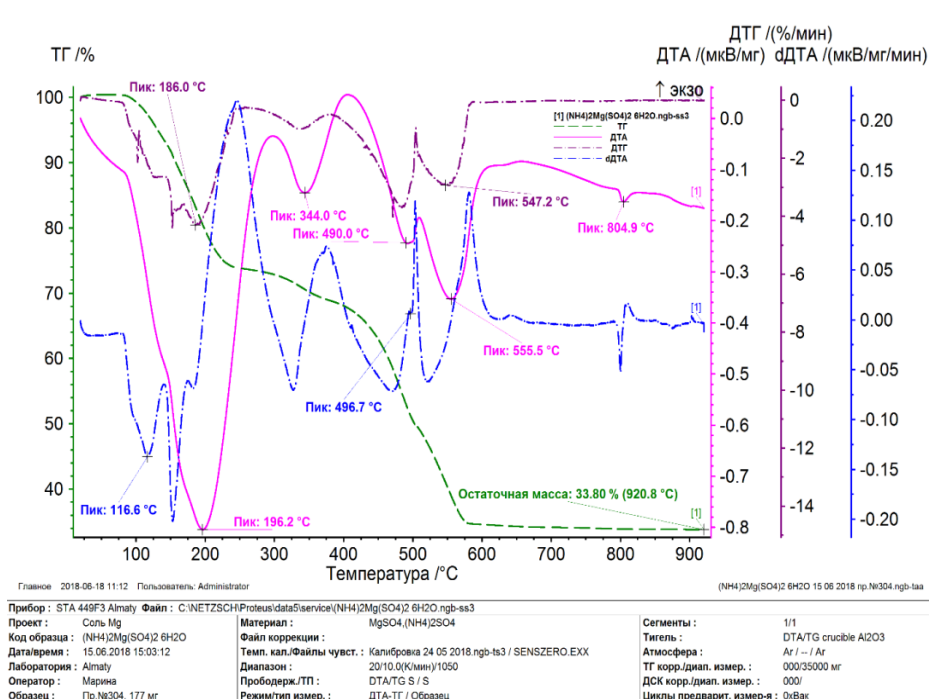


Рисунок 33 – Термограмма твердого осадка, полученного при нейтрализации продукционного раствора при нагреве до 620 °С.

На рисунке 34 приведены результаты изменения фазового состава твердого осадка при нагреве исходной пробы до 920 °С.



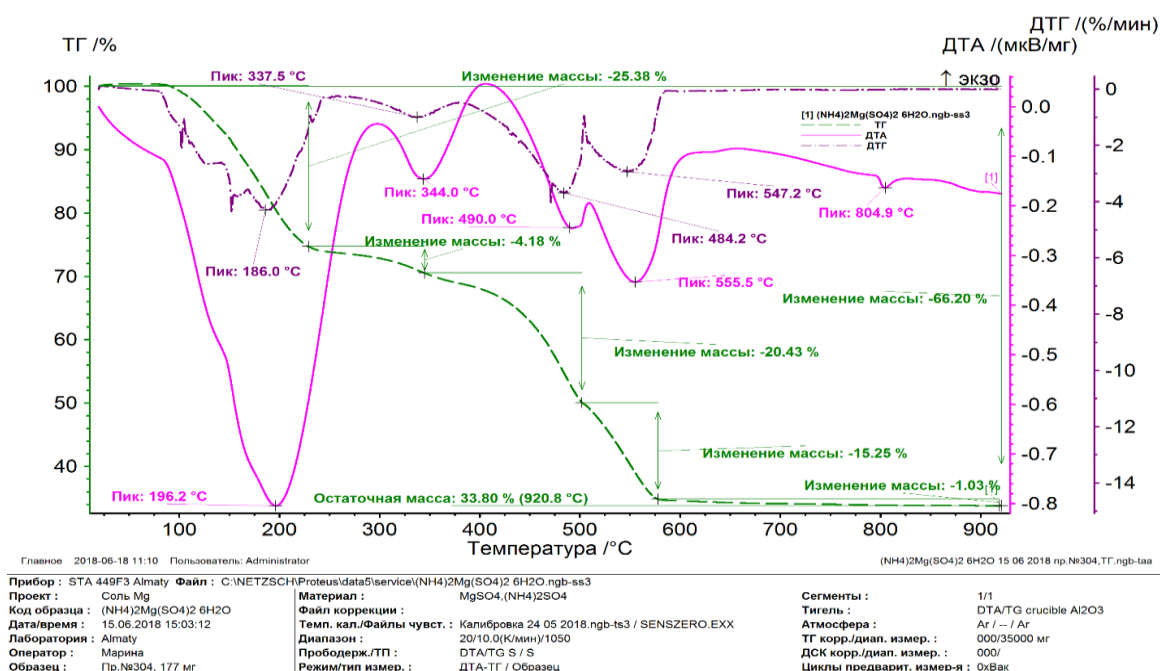


Рисунок 34 – Термограмма твердого осадка, полученного при нейтрализации производственного раствора при нагреве до 920 °С

Видно, что на кривой ДТА при 804,9 °С наблюдается эндотермический эффект с максимальным развитием. Эффект не сопровождается изменением массы, поэтому можно предположить, что при данной температуре происходит плавление смеси солей, присутствующих в пробе.

Согласно результатам термического анализа, при нагреве пробы до температуры 920,8 °С, снижение массы составляет 33,80 %. Основная потеря массы проявляется при нагреве до температуры 580 °С. Рост температуры нагрева на потерю массы влияет незначительно (потеря массы 1,03 %).

Исходя из полученных данных, для получения чистого сульфата магния, полученный осадок двойного сульфата был подвергнут обжигу при температуре 700 °С, в течение 1 часа. После обжига получен чистый безводный порошок в количестве 151 г, содержащий до 99 % сульфата магния (MgSO<sub>4</sub>).

*Применение сульфата магния.* Сульфат магния получил широкое использование в качестве магниевое удобрения, в котором содержится основной питательный элемент – магний [26]. Магний необходим растениям в течение всей жизни, особенно в начале их развития и в период плодоношения. Магний входит в состав хлорофилла, фитина (Mg – соль гексафосфорнокислого эфира инозита) и пектинов (Ca-Mg соли полисахаридов, состоящих из остатков галактуроновой кислоты); активизирует многие ферменты; стимулирует поступление фосфора из почвы и его усвоение растительными организмами; обеспечивает (вместе с Ca и Mn) стабильность в клетках структуры хромосом и коллоидных систем; повышает защитные реакции, напряжение засухоустойчивость.

При недостатке Mg в сельскохозяйственных культурах (менее 0,2 % MgO на сухую массу) усиливается активность пероксидазы, снижается содержание аскорбиновой кислоты и глюкозы; это вызывает магниевое голодание - хлороз и мраморность листьев. В качестве магниевых удобрений используют (непосредственно или после переработки) прир. магнийсодержащее сырье: карбонаты и силикаты Mg, его соли, встречающиеся в калийных и борных рудах, и соли, получаемые из морских вод и соленых озер. Кроме того, Mg входит в состав сложных (азот-, калий- и фосформгниевых), смешанных и других. удобрений, а также отходов промышленности. Наиболее распространены: доломитовая мука  $MgCO_3CaCO_3$  (18–20 % MgO), доломитовая мука + аммиачная селитра (мех. смесь 1:1, 10 % MgO), полуобожженный доломит  $MgO \cdot CaCO_3$  (27 % MgO); дунитовая мука  $Mg_2SiO_4$  (47 % MgO), серпентинитовая мука  $Mg_3H_4Si_2O_9$  (до 45 % MgO, осн. минерал – серпентин), вермикулит, или гидрослюда (14–30 % MgO); жженая магнезия (не менее 89 % MgO); эпсомит, или сульфат магния  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  (13,7 % MgO); аммошениит  $(NH_4)_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$ ; магниевый плавненный фосфат  $\alpha Ca_3(PO_4)_2 \cdot MgSiO_3$  (12 %), техн. магний аммоний фосфат  $MgNH_4PO_4 \cdot H_2O$  (45,5–48,06 % MgO); калийно-магниевый концентрат  $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$  (содержит 9 % MgO), калимагнезия  $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$  (8–10 % MgO), полигалит  $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (5 % MgO); карналлит  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$  (14 % MgO), каинит  $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$  (10 % MgO); борат магния  $Mg_3(BO_3)_2$  (19 % MgO). Магниевые удобрения применяют на кислых супесчаных дерново-подзолистых, а также на краснозменных и торфяно-болотных почвах для предпосевного внесения (или при обнаружении признаков магниевого голодания) под картофель, сахарную свеклу, рожь овес, гречиху, бобовые кукурузу, коноплю, просо, чай, цитрусовые и других. Дозы внесения в СССР 30-60 кг/га (в пересчете на MgO). Использование магниевых удобрений можно совмещать с известкованием урожайности сельскохозяйственных культур, а также способствует повышению содержания крахмала в картофеле, сахара в сахарной свекле, витаминов в овощах, протеина в зеленой массе кукурузы и других, а также в схожести семян и т.д.



## 5 Принципиальная технологическая схема комплексной переработки хромитсодержащих шламов обогащения

Комплекс проведенных исследований позволил разработать общую технологическую схему переработки хромитсодержащих шламов обогащения с селективным извлечением ценных элементов в товарные продукты, которая представлена на рисунке 35.

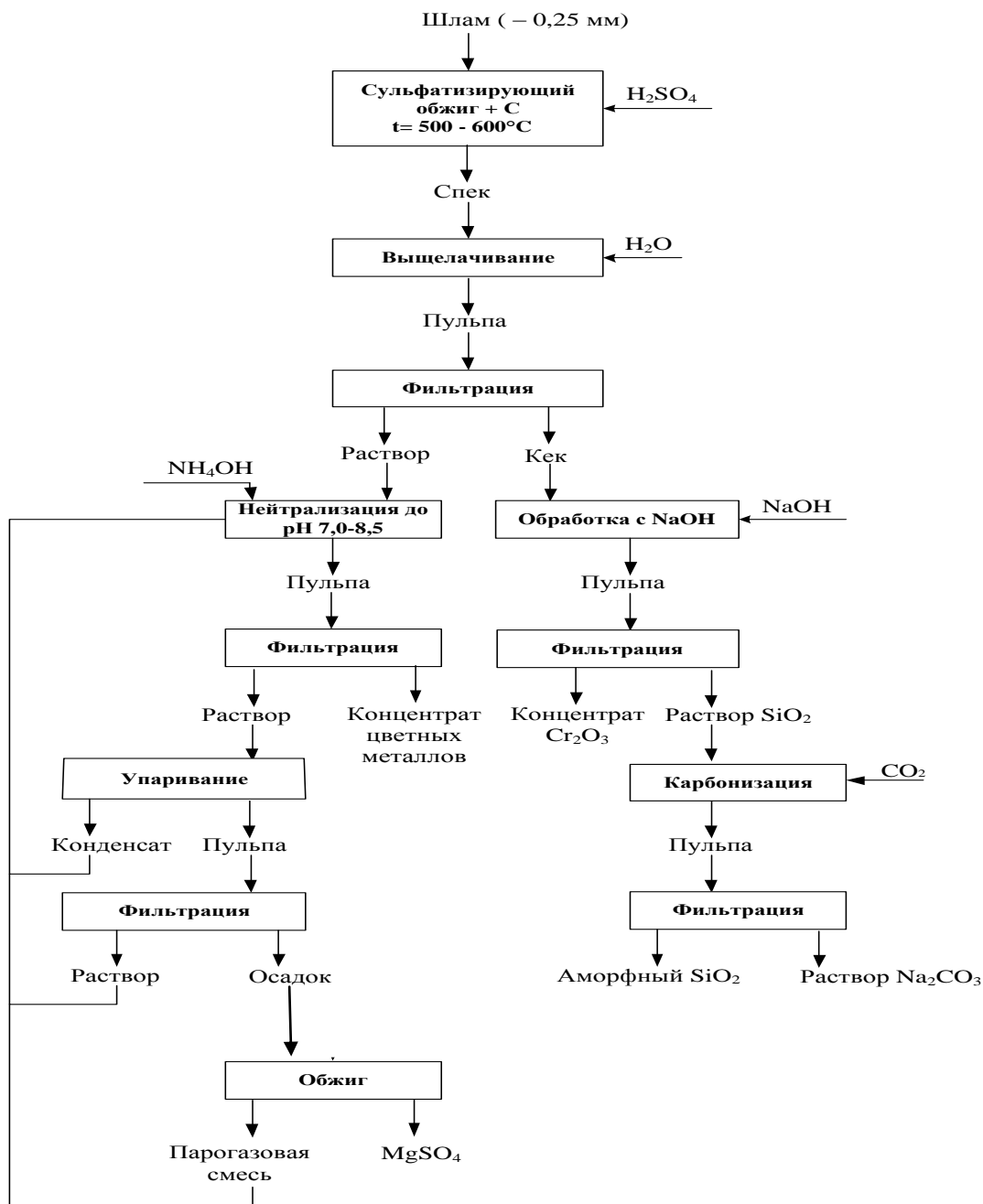


Рисунок 35 – Технологическая схема комплексной переработки хромитсодержащих шламов обогащения

Оптимальные технологические параметры и режимы проведения основных узлов (операций) технологии представлены в таблице 30.

Таблица 30 – Оптимальные параметры основных операций технологической схемы

№№\ пп	Наименование операции	Параметры	Значения
1	Сульфатизирующий обжиг хромитсодержащего шлама обогащения с получением спека	Температура Продолжительность Т:Ж H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : шлам	500 °С 1 час 1:10 1:1
2	Выщелачивание спека водой с получением продукционного раствора и кека (черновой хромитовый концентрат)	Т:Ж Температура Продолжительность	1:10 80 °С 1,5 часа
3	Обработка в NaOH с получением кремнийсодержащего раствора и хромитового концентрата	Температура Продолжительность Т:Ж C <sub>Na2Oкв</sub>	100 °С 2 часа 1:10 200 г/дм <sup>3</sup>
4	Карбонизация с получением аморфного кремнезема	Температура Продолжительность Скорость подачи газа	70 °С 1 час 3 дм <sup>3</sup> /мин
5	Нейтрализация с получением концентрата цветных металлов	рН Температура	8,5 50 °С
6	Выпарка с получением осадка двойной соли	Температура	100 °С
7	Обжиг с получением сульфата магния	Температура	700 °С

Внешний вид и химические составы товарных продуктов, полученных в результате проведенных исследований по разработанной технологической схеме, показаны на рисунке 36.

## Хромитсодержащий шлам обогащения

Компоненты	Содержание, %
Cr	18,5
Fe	6,879
Mg	17,599
Al	1,393
Ni	0,271
Co	0,014
Zn	0,01
ΣPЗЭ	0,025
Si	11,2
O <sub>2</sub>	37,157
прочие	6,95



### Хромитовый концентрат



Компоненты	Содержание, %
Cr	42,045
Si	2,500
Fe	12,500
Mg	5,341
Al	3,150
Ni	0,191
Co	0,016
Zn	0,017
SO <sub>4</sub>	0,052
прочие	34,177

### Аморфный кремнезем



Элементы	Содержание, %
SiO <sub>2</sub>	92,3
Na <sub>2</sub> O	0,50
CaO	0,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12
Cl	0,02
SO <sub>4</sub>	0,5
п.п.п.	6,3

### Концентрат цветных металлов



Компоненты	Содержание, %
Fe	62,2
Ni	8,311
Co	0,355
PЗЭ	0,667
Zn	0,288
прочие	28,155

### Сульфат магния



Компоненты	Содержание, %
MgSO <sub>4</sub>	99,0
п.п	1,0

Рисунок 36 – Состав, общий вид исходного сырья и товарных продуктов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании комплексных физико-химических исследований, включающих минералогические исследования и рентгенофазовый метод анализа изучен вещественный состав хромитсодержащих шламов, полученных в результате обогащения хромовой руды Донского ГОК. Установлено, что основным хромсодержащим минералом в составе шлама является хромпикотит с содержанием 27 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Основные породообразующие минералы в шламах представлены в виде минералов клинохризолит, лизардит и клинохлор с содержанием 29,3 %  $\text{MgO}$ .

Установлены формы нахождения хрома, железа, цветных и редкоземельных металлов в хромитсодержащих шламах обогащения. Показано, что хром в основном представлен в форме хромпикатита (хромита). Высокое содержание хрома (18,5 %) в шламах обогащения позволяет считать, что данный продукт может служить дополнительным источником сырья для его извлечения.

На основании полученных результатов по изучению вещественного состава рассчитан рациональный состав хромитсодержащего шлама. Установленные высокие содержания магния, цветных металлов и РЗМ в шламах указывают на принципиальную возможность и целесообразность их попутного извлечения в целевой продукт.

Проведенные термодинамические расчеты реакций взаимодействия компонентов хрома, железа, магния, цветных и редкоземельных металлов с серной кислотой при сульфатизирующем обжиге показывают принципиальную возможность разделения хрома от других металлов в присутствии восстановителя (угля) с переводом хрома в осадок в виде нерастворимого кека и концентрированием магния, цветных металлов и РЗМ в растворе. Полученные результаты показывают принципиальную возможность разделения хрома от других металлов в виде нерастворимого кека при низких температурных интервалах обжига – 723 – 873 К в условиях восстановительно-сульфидирующего обжига. Установлено, что энергия Гиббса разложения сульфата хрома ~ в 2,5 раза превышает значения энергии Гиббса разложения сульфатов остальных металлов. При выбранных температурных интервалах разложение сульфатов магния, железа и цветных металлов невозможно, пока в системе присутствует сульфат хрома

Разработана принципиальная технологическая схема комплексной переработки хромитсодержащих шламов обогащения, включающая следующие основные операции:

- низкотемпературный сульфатизирующий обжиг хромитсодержащих шламов в присутствии твердого восстановителя (угля);
- выщелачивание спека водой с выделением хрома в кек и получением производственного раствора;
- щелочную обработку кека с выделением хромитового концентрата;
- карбонизацию с получением аморфного кремнезема;

- нейтрализацию с получением концентрата цветных металлов;
- выпарку с получением осадка двойной соли;
- обжиг с получением сульфата магния.

Определены оптимальные параметры сульфатирующего обжига хромитсодержащего шлама обогащения в присутствии восстановителя. Установлено, что высокое извлечение хрома в спек достигается при следующих оптимальных параметрах: температура обжига – 500 °С, продолжительность обжига – 1 час, расход серной кислоты – 100% от веса исходного шлама.

Экспериментально отработаны и выявлены оптимальные параметры каждой операции, составляющей основу селективного извлечения ценных элементов в товарные продукты.

Установлено, что оптимальными условиями щелочного выщелачивания черного хромитового концентрата являются: Т:Ж=1:10, концентрации  $\text{Na}_2\text{O}$  - 200 г/дм<sup>3</sup>, время выщелачивания – 2 ч, температуры выщелачивания – 100 °С. При выбранных параметрах получен хромитовый концентрат, состав которого соответствует требованиям, предъявляемым к составу хромовых концентратов, получаемых на Донском горно – обогатительном комбинате (Приложение Б).

Установлено, что для получения аморфного кремнезема карбонизацией оптимальными условиями являются: температура – 70 °С, время – 1 час, скорость подачи газа составляла 3 дм<sup>3</sup>/мин. Полученный аморфный кремнезем имел следующий состав, %:  $\text{SiO}_2$  – 92,3;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,50;  $\text{CaO}$  – 0,21;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,05;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,12;  $\text{Cl}$  – 0,02;  $\text{SO}_4$  – 0,5; п.п.п. – 6,3, который соответствует марки БС – 100 .

Концентрат цветных металлов, содержащий РЗЭ из сернокислого раствора был получен нейтрализацией при следующих условиях: рН=8,5, температура – 50 °С, время – 1,5 часа. Состав концентрата цветных металлов следующий, %: Ni – 8,311; Co – 0,355; РЗЭ – 0,667; Zn – 0,288; Fe – 62,2;  $\text{O}_2$  – 27,422.

Сульфат магния ( $\text{MgSO}_4$  – 99,0 %) из производственного магнийсодержащего раствора был получен в две стадии: выпариванием при температуре 100 °С с дальнейшим обжигом продукта при температуре 700 °С в течение 1 часа.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Поисковые исследования по извлечению соединений хрома из шламов хроматного производства / О.В. Колесова, С.В. Островский, В.Н. Басов // Вестник ПНИПУ. – 2014. – №4. – С.76-90.
- 2 Природное сырье — перспективы добычи /Ю. Алексеев // Мысль. - 2003. - № 10. - С. 43-45.
- 3 Проблемы становления рынка черных металлов в Казахстане / Р.С. Каренов // Вестник КарГУ. Сер. Экономика. – 2007. – № 4(48). – С. 9–25.
- 4 Haruna A, Uzairu A, Harrison GFS (2011) Chemical fractionation of trace metals in sewage water-irrigated soils. // International Journal of Environmental Research 5: 733-744.
- 5 Serbaji M.M., Azri C., Medhioub K. Anthropogenic Contributions to Heavy Metal Distributions in the Surface and Sub-surface Sediments of the Northern Coast of Sfax, Tunisia // Int. J. Environ Res 6. –2012. –P.613-626.
- 6 Manfe M.M., Attar S.J., Parande M., Topare N.S. Treatment Of Cr (Vi) Contaminated waste water Using Biosorbent Prunus Amygdalus (Almond) Nut Shell Carbon // Int. J. of Chemical Sciences 10. –2012. –P.609-618.
- 7 Akar Sen G. Application of full factorial experimental design and response surface methodology for chromite beneficiation by Knelson concentrator // Minerals. –2016. Vol. 6, Iss. 1. –P.5-8.
- 8 Kumar C.R., Tripathy S.K., Rao D.S. Characterisation and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density separator // J. Miner. Mater. Charact. Eng.–2009. Vol. 8, Iss. 5. –P.367–378.
- 9 Tripathy S.K., Ramamurthy Y., Singh V. Recovery of chromite values from plant tailings by gravity concentration // J. Miner. Mater. Charact. Eng.–2011. Vol. 10, Iss. 1. –P.13–25.
- 10 Tripathy S.K., Banerjee P.K., Suresh N. Magnetic separation studies on ferruginous chromite fine to enhance Cr : Fe ratio // Int. J. Miner. Metall. Mater. – 2015. Vol. 22, Iss. 3. –P.217–224.
- 11 Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Хромовые руды. М.,- 2007.- 36 с.
- 12 Электронный ресурс: <http://www.cmmarket.ru/markets/chworld.htm>
- 13 Обогащение и окусковывание хромитовых руд за рубежом / Т.Т. Бердышева //БНТИ. Черная металлургия. - 1977. - №23. - С.3-18
- 14 Патент 2522 Япония. Процесс переработки железоксидных руд, содержащих никель, хром и кобальт / Ё. Такахаши и др. – Оpubл. 15.04.1964
- 15 Патент 2208060 РФ. Способ производства хромитового концентрата из убогих вкрапленных хромитсодержащих руд / С.Р. Калмуков, В.Ф. Колесников, З.А. Нургалиев. – Оpubл. 10.07.2003
- 16 Реферат №66. Обогащение полезных ископаемых // Экспресс-информация, 1968. – №39, -43 с.

- 17 Патент 2344076. Способ переработки магний хромсодержащего рудного сырья / И.А. Богданов, Г.С. Мурадов, В.Ф. Плюхин, Ю.Н. Лосев. – Оpubл. 20.01.2009, Бюл. № 9.
- 18 Патент 2097322 РФ. Способ комплексной переработки серпентинита / В.В. Велинский, Г.М. Гусев. – Оpubл. 27.11.1997 г.
- 19 Патент 2535254 РФ. Способ комплексной переработки серпен-хромитового рудного сырья / И. А. Фарбер Г.С. Мурадов, Ю.Н. Лосев. – Оpubл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
- 20 Рябин В.А., Киреева М.В., Берг Н.А. и др. Неорганические соединения хрома / Справочник Л.: Химия, 1981. –208 с., ил.
- 21 Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов / М.: Metallургия, 1991. – 432 с.
- 22 Электронный ресурс: <http://kinetics.nist.gov/janaf>
- 23 Райзман В.Л., Ни Л.П., Мальц Н.С. и др. Химическое кондиционирование высококремнистого алюминиевого сырья / Обзорная информация ЦНИИцветмет экономики и информации.- М., 1987. -Вып. 3-60 с.
- 24 Рабатова Л.С. Физико-химия и технологии получения цеолитов  $Na_x$  и  $Na_y$  при комплексной переработке зол ТЭЦ -Дисс. канд. техн. наук. – Алматы, 2002. – 135с.
- 25 Вольдман Г.М., Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов / М.: Интермет Инжиниринг, 2003 – 464 с.: ил.16
- 26 Электронный ресурс: <http://es.niv.ru/doc/encyclopedia/chemistry/articles/912/magnievye-udobreniya.htm>

Приложение А

Оттиски публикации по теме магистерской диссертации

**МАТЕРИАЛЫ**  
**XXIII Международной научно-технической**  
**конференции**

**«Научные основы и практика переработки**  
**руд и техногенного сырья»**  
**10–13 апреля 2018 г.**

**Екатеринбург – 2018**



УДК 622.7

Н34 Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIII Международной научно-технической конференции, 10–13 апреля 2018 г., проводимой в рамках XVI Уральской горно-промышленной декады 09–18 апреля 2018 г., Екатеринбург: Издательство «Форт Диалог-Исеть», 2018. – 480 с.

В сборнике материалов конференции рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с теорией и практикой переработки руд и техногенного сырья, в том числе освещены вопросы опробования, рудоподготовки, технологической минералогии, гравитационных, магнитных, электрических, флотационных и химических методов обогащения минерального сырья.

Материалы могут представлять интерес для специалистов предприятий горнодобывающей и металлургической промышленности и быть полезными для студентов и аспирантов.

ISBN 978-5-91128-166-3

УДК 622.7

ISBN 978-5-91128-166-3

© ООО «Таилс КО», 2018

## Продолжение приложения А

2. Pilusa J., Muzenda E. Beneficiation of Pyrolytic Carbon Black // *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. – 2013 – V. 7, № 10. – P. 733-737.
3. Андрейков Е.И., Амосова И.С., Гриневиц Н.А., Чупахин О.Н. Утилизация отработанных автомобильных шин с использованием термического сольволиза // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2005, № 13. – С. 725-729.
4. Папин А.В., Игнатова А.Ю., Неведров А.В., Шиканова К.А. Технология переработки твердого остатка пиролиза автошин в формованное топливо // *Ползуновский вестник*. – 2015, № 2. – С. 106-110.
5. Koreňová Z., Juma M., Annus J., Markoš J., Jelemenský L. Kinetics of pyrolysis and properties of carbon black from a scrap tire // *Chemical papers*. – 2006. – V. 60, № 6. – P. 422-426.
6. Mager K., Meurer U., Garcia-Egocheaga B., Goicoechea N., Rutten J., Saage W. and Simonetti F. Recovery of Zinc Oxide from Secondary Raw Materials: New Developments of the Waelz Process in Recycling of Metals and Engineered Materials (eds. D.L. Stewart, J.C. Daley and R.L. Stephens) – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
7. Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. – Екатеринбург: Полиграфист, 2007. – 503 с.
8. Борозняк И.Г. Производство сажи. – М.: Химия, 1975.
9. Carbon Black: Science and Technology. Edited by J.-B. Donnet, R.C. Bansal, M.-J. Wang. Second Edition, revised and expanded. – N.-Y. – Basel: Marcel Dekker, Inc., 1993. – 461 P.

УДК 669.027.32/33

### **СУЛЬФАТИЗИРУЮЩИЙ ОБЖИГ ХРОМИТСОДЕРЖАЩЕГО ШЛАМА ОБОГАЩЕНИЯ**

Гладышев С.В., Абдулвалиев Р.А., Досмухамедов Н.К., Омарова С.А.  
АО «Институт металлургии и обогащения», НАО «Казахский национальный  
исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева»,  
г. Алматы, Республика Казахстан

Мелкодисперсный хромитсодержащий шлам обогащения гравитационными методами не обогащается из-за трудности разделения сложных минералов. В связи с этим рассмотрена возможность химического обогащения шлама при комплексной переработке с получением хромитового концентрата.

В работе исследовано поведение компонентов хромитсодержащего шлама в условиях сульфатизирующего обжига с восстановителем в зависимости от температуры, продолжительности и количества добавляемой в шихту концентрированной серной кислоты. Цели исследований – выбор оптимальных условий обжига для получения спека, содержащего водорастворимые сульфаты металлов. Хромитсодержащие руды и соответственно шламы обогащения содержат цветные металлы и редкоземельные эле-

## Продолжение приложения А

менты, поэтому их попутное извлечение повысит рентабельность переработки.

В проведенных исследованиях использована проба шлама обогащения хромитовой руды Донского ГОКа (Казахстан) состава, масс. %: Cr 18,5; Fe 6,879; Mg 17,599; Si 11,197; Al 1,393; Ni 0,271; Co 0,014; Zn 0,014; ΣРЗЭ 0,025. Основными фазами являются: хромит, клинохризолит, лизардит и клинохлор.

Шлам подвергали операции сульфатизирующего обжига с восстановителем (углеродом) при температуре 500-800 °С. В качестве углеродсодержащего материала использовали древесный уголь, количество которого составляло 10 % от массы шлама. Перед обжигом шлам смешивали с древесным углем, затем в смесь добавляли концентрированную (96 %) серную кислоту. Количество концентрированной серной кислоты брали из отношения к массе шлама. Шихту загружали в печь и проводили обжиг при выбранной температуре в течение одного часа. В результате обжига получены спеки (таблица 1).

В результате обжига шлама при температуре 500 °С произошли изменения фазового состава – исчезли фазы клинохризолита, лизардита, клинохлора. От исходного состава осталась только одна фаза – хромит. В спеке присутствуют сульфаты Mg, Fe, Cr и оксид кремния. При температуре 600 °С в спеке, кроме сульфатов присутствуют оксиды металлов Cr и Fe. При температуре 700-800 °С в спеке присутствуют сульфат магния и оксиды металлов. Количество фаз оксида кремния в спеке с увеличением температуры обжига уменьшается и при температуре 800 °С полностью переходит в рентгеноаморфное состояние, не определяется при рентгенофазовом анализе.

При обжиге часть серной кислоты разлагается с образованием газа SO<sub>3</sub>, а другая образует в спеке сульфаты. С увеличением температуры обжига содержание SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в спеке уменьшается от 35,7 до 21,9 % (рисунок 1).

Для определения влияния продолжительности обжига на состав спека проведены опыты по сульфатизации хромитсодержащего шлама обогащения при температуре 500 °С в течение 1-4 часов. Установлено, что на химический состав спеков продолжительность обжига практически не влияет.

При исследовании зависимости состава спека от количества добавляемой серной кислоты обжиг проводили при температуре 500 °С в течение одного часа.

С увеличением добавления серной кислоты к шламу увеличивается содержание SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в спеке с 22,6 до 35,7 %, то есть повышается количество сульфатов (рисунок 2).

Продолжение приложения А

Таблица 1 – Рентгенофазовый состав спеков в зависимости от температуры

Температура, °С	Наименование	Формула	%
500	Сульфат магния	MgSO <sub>4</sub>	42,8
	Сульфат хрома	Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	16,8
	Микасайт	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	12,3
	Кварц	SiO <sub>2</sub>	10,8
	Хромит	(Fe <sub>0,534</sub> Mg <sub>0,432</sub> Mn <sub>0,007</sub> Al <sub>0,027</sub> ) (Al <sub>0,574</sub> Fe <sub>0,173</sub> Mg <sub>0,036</sub> Cr <sub>1,187</sub> NiO)	7,5
	Алюмо-железистый оксид	AlFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	6,2
	Оксид кремния	SiO <sub>2</sub>	3,7
600	Сульфат магния	MgSO <sub>4</sub>	52,6
	Сульфат хрома	Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	10
	Микасайт	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	6,8
	Хромит	(Fe <sub>0,534</sub> Mg <sub>0,432</sub> Mn <sub>0,007</sub> Al <sub>0,027</sub> ) (Al <sub>0,574</sub> Fe <sub>0,173</sub> Mg <sub>0,036</sub> Cr <sub>1,187</sub> NiO)	6,2
	Алюмо-железистый оксид	AlFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4,9
	Вюстит	Fe <sub>0,872</sub> O	4,1
	Оксид хрома	Cr <sub>2</sub> O <sub>2,4</sub>	3,9
	Кварц	SiO <sub>2</sub>	3,7
	Оксид железа	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,6
	Оксид кремния	SiO <sub>2</sub>	2,5
	Оксид хрома	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,6
700	Сульфат магния	MgSO <sub>4</sub>	77,3
	Алюмо-железистый оксид	AlFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	6,7
	Хромит	(Fe <sub>0,5</sub> Mg <sub>0,5</sub> )(Cr <sub>1,64</sub> Fe <sub>0,28</sub> Ti <sub>0,02</sub> Al <sub>0,06</sub> )O <sub>4</sub>	5,9
	Оксид хрома	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,4
	Вюстит	Fe <sub>0,872</sub> O	3,1
	Кварц	SiO <sub>2</sub>	2,5
800	Сульфат магния	MgSO <sub>4</sub>	75,3
	Хромит	(Fe <sub>0,52</sub> Mg <sub>0,48</sub> )(Cr <sub>0,76</sub> Al <sub>0,24</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	8,3
	Оксид хрома	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,8
	Алюмо-железистый оксид	AlFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5,9
	Вюстит	Fe <sub>0,872</sub> O	3,7

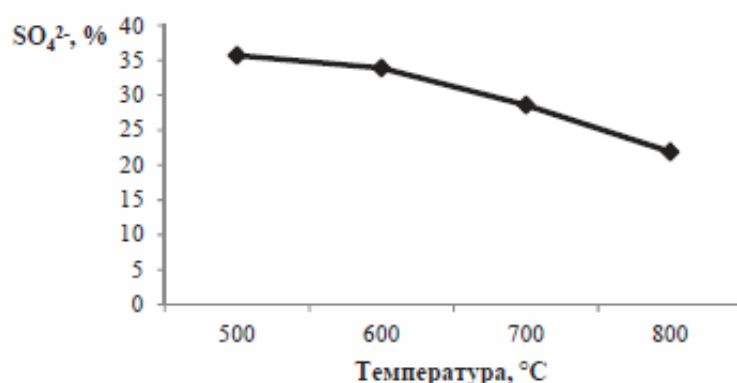


Рисунок 1 – Степень связывания  $SO_4^{2-}$  в сульфаты спека в зависимости от температуры обжига



## Продолжение приложения А

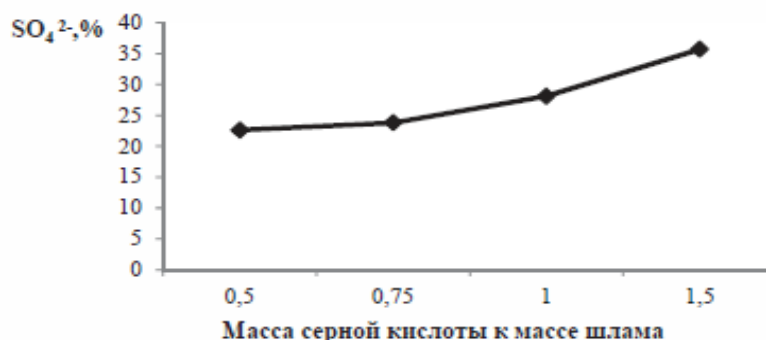


Рисунок 2 – Степень связывания  $SO_4^{2-}$  в сульфаты шлака в зависимости от количества добавляемой серной кислоты

Таким образом, установлена зависимость сульфатизирующего обжига хромитсодержащего шлака обогащения с восстановителем от температуры, продолжительности и количества добавляемой концентрированной серной кислоты. Установлено, что оптимальной температурой для образования сульфатов в шлаке является  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , продолжительность 1 час, с добавлением концентрированной серной кислоты в соотношении 1,0-1,5 к массе шлака, при этом степень связывания  $SO_4^{2-}$  в сульфаты шлака составляет 28,1-35,7 %. Расход серной кислоты на образование сульфатов в шлаке составил 439-558 кг на 1000 кг исходного хромитсодержащего шлака.

УДК 669.027.32/33

### СПОСОБ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Кенжалиев Б.К., Абдулвалиев Р.А., Гладышев С.В., Дюсенова С.Б.,  
Омарова С.А., Имангалеева Л.М.

АО «Институт металлургии и обогащения»,  
НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет  
им. К.И. Сатпаева», г. Алматы, Казахстан

Для переработки труднообогатимых руд, хвостов обогащения, отходов производства разработан способ предварительной подготовки. Способ позволяет за счет химической активации изменить фазовый состав сырья, отделить цементирующую поверхность рудных минералов слой силикатной породы, дезинтегрировать обрабатываемый материал. Химическая активация проводится регенерируемым раствором бикарбоната натрия с содержанием  $120\text{ г/дм}^3\text{ NaHCO}_3$  при температуре  $120\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Химический состав сырья при активации практически не меняется, но происходит изменение фазового состава. После активации, за счет изменения фазового

---

---

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ № 6 2018 ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 1812-7339

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 1,252

Журнал издается с 2003 г.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,582

Электронная версия: <http://fundamental-research.ru>

Правила для авторов: <http://fundamental-research.ru/ru/rules/index>

Подписной индекс по каталогу «Роспечать» – 33297

*Главный редактор*

*Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор*

*Зам. главного редактора*

*Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н., профессор*

*Ответственный секретарь редакции*

*Бизенкова Мария Николаевна*

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.т.н., проф. Бошенятов Б.В. (Москва); д.т.н., проф. Важенин А.Н. (Нижний Новгород); д.т.н., проф. Гилёв А.В. (Красноярск); д.т.н., проф. Гоц А.Н. (Владимир); д.т.н., проф. Грызлов В.С. (Череповец); д.т.н., проф. Захарченко В.Д. (Волгоград); д.т.н. Лубенцов В.Ф. (Невинномысск); д.т.н., проф. Мадера А.Г. (Москва); д.т.н., проф. Пачурин Г.В. (Нижний Новгород); д.т.н., проф. Пен Р.З. (Красноярск); д.т.н., проф. Петров М.Н. (Великий Новгород); д.т.н., к.ф.-м.н., проф. Мишин В.М. (Пятигорск); д.т.н., проф. Калмыков И.А. (Ставрополь); д.т.н., проф. Шалумов А.С. (Ковров); д.т.н., проф. Леонтьев Л.Б. (Владивосток); д.т.н., проф. Дворников Л.Т. (Красноярск); д.т.н., проф. Снежко В.А. (Москва); д.э.н., проф. Алибеков Ш.И. (Кизляр); д.э.н., проф. Бурда А.Г. (Краснодар); д.э.н., проф. Василенко Н.В. (Отрадное); д.э.н., доцент, Гиззатова А.И. (Уральск); д.э.н., проф. Головина Т.А. (Орел); д.э.н., доцент, Довбий И.П. (Челябинск); д.э.н., доцент, Дорохина Е.Ю. (Москва); д.э.н., проф. Зарецкий А.Д. (Краснодар); д.э.н., проф. Зобова Л.Л. (Кемерово); д.э.н., доцент, Каранина Е.В. (Киров); д.э.н., проф. Киселев С.В. (Казань); д.э.н., проф. Климовец О.В. (Краснодар); д.э.н., проф. Князева Е.Г. (Екатеринбург); д.э.н., проф. Коваленко Е.Г. (Саранск); д.э.н., доцент, Корнев Г.Н. (Иваново); д.э.н., проф. Косякова И.В. (Самара); д.э.н., проф. Макринова Е.И. (Белгород); д.э.н., проф. Медовый А.Е. (Пятигорск); д.э.н., проф. Покрыган П.А. (Москва); д.э.н., доцент, Потышняк Е.Н. (Харьков); д.э.н., проф. Пospelов В.К. (Москва); д.э.н., проф. Роздольская И.В. (Белгород); д.э.н., доцент, Самарина В.П. (Старый Оскол); д.э.н., проф. Серебрякова Т.Ю. (Чебоксары); д.э.н., проф. Скуфьина Т.П. (Апатиты); д.э.н., проф. Титов В.А. (Москва); д.э.н., проф. Халиков М.А. (Москва); д.э.н., проф. Цапулина Ф.Х. (Чебоксары); д.э.н., проф. Чиладзе Г.Б. (Тбилиси); д.э.н., доцент, Федотова Г.В. (Волгоград); д.э.н., доцент, Ювица Н.В. (Астана); д.э.н., доцент, Юрьева Л.В. (Екатеринбург)

## Продолжение приложения А

---

Журнал «Фундаментальные исследования» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство – ПИ № ФС 77-63397.

Все публикации рецензируются.  
Доступ к электронной версии журнала бесплатен.

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 1,252.  
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,582.

Учредитель, издательство и редакция:  
ИД «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47

Ответственный секретарь редакции –  
*Бизенкова Мария Николаевна* –  
+7 (499) 705-72-30  
E-mail: [edition@rae.ru](mailto:edition@rae.ru)

Подписано в печать 18.07.2018  
Дата выхода номера 18.08.2018

Формат 60x90 1/8  
Типография  
ООО «Научно-издательский центр  
Академия Естествознания»,  
г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

Технический редактор  
Митронова Л.М.  
Корректор  
Галенкина Е.С.

Распространение по свободной цене  
Усл. печ. л. 29,88  
Тираж 1000 экз. Заказ ФИ 2018/6

© ИД «Академия Естествознания»

## СОДЕРЖАНИЕ

**Технические науки (05.17.00)**

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ БЛОЧНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Здоренко Н.М., Бессмертный В.С., Дюмина П.С., Бондаренко Д.О., Кочурин Д.В.</i> .....	9
ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ CR, FE, ЦВЕТНЫХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ХРОМИТСОДЕРЖАЩИХ ШЛАМАХ ОБОГАЩЕНИЯ <i>Омарова С.А., Гладышев С.В., Жолдасбай Е.Е., Досмухамедов Н.К.</i> .....	15
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОКРЕМНЕЗЕМА (ЗОЛЬ, НАНОПОРОШОК) И МИКРОКРЕМНЕЗЕМА <i>Потапов В.В., Горев Д.С.</i> .....	23
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ВОЛОКНОПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФОНА <i>Чеченов И.З., Слонов А.Л., Теунова К.Х., Ржевская Е.В., Мусов Х.В., Афаунов Ш.А., Локьяева З.А., Хаширова С.Ю.</i> .....	30
ТЕРМОДИНАМИКА ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА <i>Шарифова У.Н., Мамедов А.Н., Гасымова А.М., Самедзаде Г.М.</i> .....	35

**Экономические науки (08.00.01, 08.00.05, 08.00.10, 08.00.12, 08.00.13, 08.00.14)**

ОСОБЕННОСТИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МАРКЕТИНГОВОЙ ПОЛИТИКИ ПРЕДПРИЯТИЯ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТОРГОВЛИ <i>Абдрахманова И.В., Луцик И.В., Подгорная И.А.</i> .....	41
НАЛОГОВЫЕ ВЫЧЕТЫ ПО НАЛОГУ НА ДОХОДЫ ФИЗИЧЕСКИХ ЛИЦ В КОНТЕКСТЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА СПРАВЕДЛИВОСТИ НАЛОГООБЛОЖЕНИЯ <i>Алиев Б.Х., Мусаева Х.М.</i> .....	46
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕХОДА ОТ «БУМАЖНОЙ» ЭКСПЕРТИЗЫ К ЭЛЕКТРОННОЙ <i>Антоновская Е.А., Петров В.О.</i> .....	51
ИННОВАЦИОННЫЙ АУТСОРСИНГ КАК ФОРМА ИНФРАСТРУКТУРНОЙ СЕРВИСНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ <i>Балдин О.В.</i> .....	56
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОСТИЖЕНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ РЕГИОНА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ СБАЛАНСИРОВАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ <i>Блинова Е.А., Есипова О.В.</i> .....	62
ИНСТИТУТ СОЦИАЛЬНОГО СТРАХОВАНИЯ КАК БАЗОВЫЙ ИНСТИТУТ СОЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ <i>Вафин Э.Я.</i> .....	67
ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЙ КЛАСТЕР КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ТЕРРИТОРИЙ <i>Волынчук А.Б., Крылова И.А.</i> .....	72
СПЕЦИФИКА ГЧП-ПРОЕКТОВ В СФЕРЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ: МИРОВОЙ ОПЫТ <i>Гоосен Е.В., Клишин В.И., Ковригина С.В.</i> .....	78



## Продолжение приложения А

4

---

РОССИЯ – ТУРКМЕНИСТАН: ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМНОЙ ТОРГОВЛИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ	
<i>Горюнов И.Д.</i> .....	83
ПРОБЛЕМЫ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ГРАЖДАН ПОЖИЛОГО ВОЗРАСТА, ПРОЖИВАЮЩИХ В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ	
<i>Гражданкина Л.Ю., Горбунова В.В.</i> .....	89
ДЕВЕЛОПМЕНТ КАК ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОСНОВА РАЗВИТИЯ РЫНКА ЖИЛОЙ НЕДВИЖИМОСТИ	
<i>Грахов В.П., Мохначев С.А., Тарапуха Н.Л., Пушкарев В.О.</i> .....	94
АНАЛИЗ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ТРУДОМ ПЕРСОНАЛА, ЗАНЯТОГО В ВАХТОВОМ МЕТОДЕ РАБОТЫ	
<i>Дмитриева Н.А., Борисова У.С.</i> .....	99
СТРАНА ПРОИСХОЖДЕНИЯ ТОВАРА, СОДЕРЖАЩЕГО ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ: ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ	
<i>Довженко П.В., Кирбитова С.В., Кожина Н.А., Останин В.А.</i> .....	104
ОСОБЕННОСТИ ДЕМОГРАФИИ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ, КАК ОДНОГО ИЗ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ФАКТОРОВ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ СОЦИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ	
<i>Егорова М.С.</i> .....	109
ВЛИЯНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО РЫНКА ГОРОДА АСТАНЫ НА СОЦИО-ЭКОНОМИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ РЕГИОНА	
<i>Задворнева Е.П.</i> .....	117
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА РЕАЛЬНЫХ ОПЦИОНОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МОМЕНТА ИНВЕСТИРОВАНИЯ	
<i>Закревская Е.А., Деткова М.Е.</i> .....	122
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭКСПОРТА ЛЕСНОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ	
<i>Кархова С.А.</i> .....	127
МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИКА ОРГАНИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКОГО ТУРИЗМА	
<i>Кириллов А.Н., Мальцев А.В., Балашова М.В.</i> .....	133
ГОРОДСКАЯ АГЛОМЕРАЦИЯ КАК ФАКТОР УСИЛЕНИЯ НЕРАВЕНСТВА ВОСПРОИЗВОДСТВА ТРУДОВОГО ПОТЕНЦИАЛА	
<i>Козлова О.А., Макарова М.Н.</i> .....	138
РИСКИ СОЦИАЛЬНОГО И ИМУЩЕСТВЕННОГО НЕРАВЕНСТВА В КОНТЕКСТЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАКОПЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ	
<i>Корчак Е.А.</i> .....	143
АНАЛИЗ РЫНКА НЕДВИЖИМОСТИ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ	
<i>Лаврова Е.В., Моргун Т.Н., Полякова О.Е.</i> .....	148
АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ РЕГИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ПРИДОРОЖНОГО СЕРВИСА НА ПРИМЕРЕ АВТОДОРОГИ А-189 «РАЗДОЛЬНОЕ – ХАСАН» ПРИМОРСКОГО КРАЯ	
<i>Лисов И.К., Терская Л.А., Щур В.В.</i> .....	154

О ФОРМИРОВАНИИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ БЛОКОВ БАЗ ДАННЫХ: «РЕГИОН – ОТРАСЛЬ – ПРЕДПРИЯТИЕ»	
<i>Меркулова Ю.В.</i> .....	160
ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДА ДОРОЖНОГО КАРТИРОВАНИЯ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ФИНАНСОВОГО КОНТРОЛЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ	
<i>Молчанов С.В.</i> .....	166
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТА: ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ	
<i>Муллахмедова С.С., Шахтазова Р.Д., Абдуллаев Р.З.</i> .....	172
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ МОРСКИМИ СУДАМИ	
<i>Муратов А.Ю.</i> .....	178
СЕРВИС КАК СИСТЕМНЫЙ БИЗНЕС ИЛИ ПРЕИМУЩЕСТВО ПЕРЕД КОНКУРЕНТАМИ И ИМИДЖ КОМПАНИИ	
<i>Панасенко В.Е.</i> .....	183
КРИПТОВАЛЮТА КАК НОВЕЙШАЯ ФОРМА ДЕНЕГ В СОВРЕМЕННОЙ ЭКОНОМИКЕ	
<i>Петров В.Ю., Борцова А.В.</i> .....	188
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ И МУНИЦИПАЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ	
<i>Петрова С.В., Уфимцев А.М., Матвеева О.Л.</i> .....	193
ВНУТРИФИРМЕННАЯ КОНКУРЕНЦИЯ ПЕРСОНАЛА	
<i>Полковникова С.Г., Крумина К.В.</i> .....	198
ПРЯМЫЕ ИНОСТРАННЫЕ ИНВЕСТИЦИИ КАК ФАКТОР УГЛУБЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	
<i>Садыкова Э.Ц., Михеева А.С., Мункуева В.Д.</i> .....	205
ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ КАК ФАКТОРЫ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И АРКТИЧЕСКИЙ ВЕКТОР ИССЛЕДОВАНИЙ	
<i>Скуфьина Т.П., Баранов С.В.</i> .....	211
СИСТЕМА КРИТЕРИЕВ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ ИННОВАЦИОННО-ИНВЕСТИЦИОННОЙ СТРАТЕГИИ ПРЕДПРИЯТИЯ	
<i>Хакимова К.Р.</i> .....	217
ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И РИСК СТРУКТУРЫ РАБОЧЕГО КАПИТАЛА ПРЕДПРИЯТИЯ	
<i>Халиков М.А., Никифорова М.А.</i> .....	222
УЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ЭФФЕКТИВНОГО АГРОБИЗНЕСА	
<i>Цапулина Ф.Х., Иванов Е.А.</i> .....	229
АНАЛИЗ ЦЕНООБРАЗУЮЩИХ ФАКТОРОВ В СФЕРЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ	
<i>Цуканова О.А., Захарова Е.А.</i> .....	235

УДК 669.1

**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ СR, FE, ЦВЕТНЫХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ХРОМИТСОДЕРЖАЩИХ ШЛАМАХ ОБОГАЩЕНИЯ**<sup>1</sup>Омарова С.А., <sup>1,2</sup>Гладышев С.В., <sup>1</sup>Жолдасбай Е.Е., <sup>1</sup>Досмухамедов Н.К.<sup>1</sup>НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева», Алматы, e-mail: [nurdos@bk.ru](mailto:nurdos@bk.ru), [a.omarova.saltanat@gmail.com](mailto:a.omarova.saltanat@gmail.com);<sup>2</sup>АО Институт металлургии и обогащения, Алматы

В работе представлены результаты комплексных физико-химических исследований вещественного состава накопленных хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОК. Показано, что основным хромсодержащим минералом в составе шлама является хромпикотит с содержанием 27% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Основные породообразующие минералы в шламах представлены в виде клинохризолита, лизардита и клинохлора с содержанием 29,3% MgO. Проведены исследования по изучению формы нахождения хрома, железа, цветных и редкоземельных металлов в хромитсодержащих шламах обогащения. Установлено, что хром в основном представлен в форме хромпикотита (хромита). Исследованиями рентгенофазового анализа установлено, что содержание хромита в шламах составляет 27,5%. Высокое содержание хрома (до 19%) в шламах обогащения позволяет считать, что данный продукт вполне может служить дополнительным источником сырья для его извлечения. На основании полученных результатов физико-химических исследований рассчитан рациональный состав хромитсодержащего шлама. Высокое содержание цветных металлов и РЗМ (ΣРЗМ-0,025%) в шламах указывает на принципиальную возможность их попутного извлечения в целевые продукты. Полученные результаты использованы при организации и разработке комплексной безотходной технологии переработки накопленных хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОК.

**Ключевые слова:** хромитсодержащие шламы, обогащение, вещественный состав, формы нахождения, хром, железо, цветные и редкоземельные металлы

**FORMS OF OCCURRENCE OF CR, FE, NON-FERROUS AND RARE-EARTH METALS IN CHROMIUM-CONTAINING INSULATING SLAGS**<sup>1</sup>Omarova S.A., <sup>1,2</sup>Gladyshev S.V., <sup>1</sup>Zholdasbay E.E., <sup>1</sup>Dosmukhamedov N.K.<sup>1</sup>The non-commercial joint-stock company «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev», Almaty, e-mail: [nurdos@bk.ru](mailto:nurdos@bk.ru), [a.omarova.saltanat@gmail.com](mailto:a.omarova.saltanat@gmail.com);<sup>2</sup>JSC Institute of metallurgy and enrichment, Almaty

The paper presents the results of complex physical and chemical studies of the material composition of the accumulated chromite-containing slurries of Donskoi GOK enrichment. It is shown that the main chromium-containing mineral in the sludge is chrompicotite with a content of 27% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The main rock-forming minerals in the slimes are represented in the form of clinochrizolite, lizardite and clinocllore with a content of 29.3% MgO. Studies have been carried out to study the shape of the presence of chromium, iron, non-ferrous and rare-earth metals in chromite-containing concentration sludge. It has been established that chromium is mainly present in the form of chrome picatite (chromite). Studies of X-ray phase analysis revealed that the content of chromite in slimes is 27.5%. The high content of chromium (up to 19%) in the enrichment sludge allows us to consider that this product may well serve as an additional source of raw materials for its recovery. Based on the results of physical and chemical studies, a rational composition of chromite-containing sludge is calculated. The high content of non-ferrous metals and REM (ΣREM-0.025%) in slimes indicate the principal possibility of their associated extraction into the target products. The obtained results were used in the organization and development of a comprehensive non-waste technology for the processing of accumulated chromite-containing slurries of enrichment at the Donskoi GOK.

**Keywords:** chromite-containing slimes, enrichment, material composition, forms of finding, chromium, iron, non-ferrous and rare-earth metals

Минерально-сырьевая база хромоворудной промышленности мира характеризуется высокой степенью концентрации: до 84% мировых подтвержденных запасов хромитов сосредоточено в ЮАР, Казахстане и Зимбабве, ~4% запасов приходится на Индию, Финляндию, Филиппины, Турцию и Албанию, 12% – доля остальных стран [1, 2].

Территориальная структура мировой добычи товарной хромовой руды в целом аналогична структуре минерально-сырьевой базы. Почти 90% производства в основном сосредоточено в пяти странах: ЮАР –

45,8%, Казахстане – 18%, Индии – 14,3%, Турции – 6,9% и Зимбабве – 4,4% [3].

В мировом рынке хрома Казахстан представлен крупнейшим предприятием – АО «ТНК «Казхром», который занимает третье место по производству хромистых ферросплавов. В номенклатуру выпускаемых сплавов, помимо феррохрома всех марок, включая металлический хром, входят: высококремнистый ферросилиций, ферросиликохром, низкофосфористый силикомарганец. Ферросплавы, выпускаемые на АО «ТНК «Казхром», продаются на всех основных мировых рынках –



в США, Европе, Китае, Японии, Южной Корее и Тайване.

Основным поставщиком сырья для АО «ТНК «Казхром»» является старейший в республике Донской горно-обогатительный комбинат (Донской ГОК), запущенный в производство в 1938 г. на базе Южно-Кемпирсайских месторождений хромитовых руд. По подтвержденным запасам эти месторождения занимают второе место в мире, а по высокому качеству сырья не имеют аналогов в мире. Часть руды импортируют страны дальнего зарубежья, главным потребителем из которых является Китай. Свыше 70% товарной руды Донской ГОК поставляет на ферросплавные заводы республики, с которыми комбинат находится в единой технологической цепи в составе АО «ТНК «Казхром»».

Донской ГОК является самым крупным в мире по добыче и переработке хромового сырья. Годовой выпуск хромовой руды составляет ~20% от общего мирового уровня производства.

Наблюдаемый общий тренд интенсивного развития хромового производства испытывает острую потребность в новых видах сырья, представляющих определенный интерес для выпуска базовой конечной продукции, увеличения производственных мощностей и комплексного извлечения сопутствующих ценных металлов. В этой связи актуальным представляется вовлечение на переработку накопленных на комбинате с начала 1970-х гг. больших объемов шламовых хвостов обогащения (~15 млн тонн). Использование данного материала в качестве дополнительного источника сырья для извлечения ценных металлов требует изыскания инновационных технологий, соответствующих современным требованиям – экологической безопасности, комплексности использования сырья и ее безотходности. Важность утилизации данного материала имеет принципиальное значение и является критической проблемой из-за негативного воздействия хрома на водную флору и окружающую среду [4–6].

В научной литературе известно незначительное количество работ, посвященных решению данной проблемы [7–10]. Принципиальное решение задачи в разработанных технологиях сводилось в основном к получению исключительно одного товарного продукта – хромитового концентрата. Несмотря на высокую эффективность для известных технологий можно выделить ряд общих характерных недостатков: невысокая степень извлечения хрома, практически не рассматриваются вопросы извлечения ценных компонентов и магния, извлечение ко-

торого в магнийсодержащие товарные продукты методами обогащения затруднено. Указанные недостатки позволяют сделать вывод о том, что существующие технологии не могут рассматриваться как перспектива для переработки хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОК, ввиду высоких содержаний в них магния, цветных и редкоземельных металлов.

В настоящей работе представлены результаты исследований вещественного и рационального состава хромитсодержащих шламов, которые были приняты за основу при разработке комплексной рациональной технологии их переработки с целью извлечения всех ценных элементов в товарные продукты.

#### Материалы и методы исследования

При проведении исследования вещественного состава исходного сырья использованы методы химического, рентгенофазового и кристаллооптического анализов. В качестве объекта исследования использованы пробы хромитсодержащих шламов Донского ГОК. При проведении комплексных исследований по изучению вещественного состава были использованы современные методы анализа с применением приборов нового поколения. В частности, для определения элементного состава проб использованы атомно-абсорбционный (спектрофотометр «Hitachi»), метод оптической эмиссионной спектрометрии (Optima 2000 DV с индукционно-связанной плазмой фирмы «Perkin Elmer SCIEX»), а также гравиметрический, пламенно-фотометрический, фотометрический и химический методы анализа.

Рентгенофазовый анализ проб проводили с использованием прибора D8 Advance (Bruker AXS GmbH),  $\alpha$ -Cu, напряжение на рентгеновской трубке 40/40. Обработка полученных данных дифрактограмм и расчет межплоскостных расстояний проводились с помощью программного обеспечения EVA. Расшифровка проб и поиск фаз осуществляли с помощью программы Search/match с использованием Базы данных карточек ASTM. Ошибка полуколичественного анализа составляла  $\pm 5\%$ .

Кристаллооптические анализы проб проводили с использованием растрового электронного микроскопа и микроскопов Olympus BX-51 и Leica DM2500.

Расчет рационального состава хромитсодержащих шламов обогащения проводился на основании результатов комплексных (минералогический, рентгенофазовый) методов исследований с использованием современных методов металлургических расчетов.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для исследования были отобраны пробы хромитсодержащих шламов обогащения, полученных в результате обогащения хромитсодержащих руд Донского ГОК.

Результаты химического анализа проб на содержание в них хрома, железа и тяжелых цветных металлов (Ni, Co, Zn) представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты химического анализа хромитсодержащих шламов обогащения

Элементы	Cr	Fe	Ni	Co	Zn	Si	Al	∑РЗМ
Содержание, %	18,5	6,879	0,271	0,014	0,014	11,197	1,393	0,025

Таблица 2  
Содержание РЗМ в хромитсодержащих шламах обогащения

Элемент	La	Lu	Nd	Yb	Ce	Tm	Dy	Gd	Sc	Tb	Y
Содержание, ppm	21	1,9	26	1,6	54	1,1	6,3	59	66	3,0	8,2

Таблица 3  
Фазовый состав хромитсодержащих шламов обогащения

Наименование	Формула	%
Хромит	$(\text{Fe}_{0,3031}\text{Mg}_{0,8996})(\text{Cr}_{0,656}\text{Al}_{0,28})_2\text{O}_4$	50,6
Клинохризолит	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	38,2
Лизардит – 1Т	$(\text{Mg},\text{Al})_3((\text{Si},\text{Fe})_2\text{O}_3)(\text{OH})_4$	8,6
Клинохлор	$\text{Mg}_{2,5}\text{Fe}_{1,65}\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{2,2}\text{Al}_{1,8}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2,6

Содержание редкоземельных металлов (РЗМ) в хромитсодержащих шламах обогащения определяли с помощью современного атомно-эмиссионного оптического спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 8300 DV. Результаты анализа на РЗМ приведены в табл. 2.

В результате рентгенофазового анализа проб на приборе D8 Advance установлен фазовый состав хромитсодержащих шламов обогащения, который представлен в табл. 3 и на рис. 1.

Минералогические исследования проб проводились под растровым микроскопом и под микроскопом OLYMPUS с различным увеличением. При увеличении 100x под микроскопом OLYMPUS были отсняты дополнительные фотоснимки пробы в проходящем свете в иммерсионной среде.

На рис. 2 приведен общий вид хромитсодержащих шламов обогащения в режиме СОМРО в иммерсионной среде.

Установлено, что в исследуемой пробе основным хромсодержащим минералом является хромпикотит (хромит), минерал группы хромшпинелидов. Минерал группы кубической и гексаоктаэдрической сингонии, цвет черный, в шлифе полупрозрачный, просвечивает густо-красным или коричнево-красным цветом. Установленный состав элементов в минерале варьирует в пределах (%): Cr – 38,37÷46,58; Fe – 10,2÷12,89; Mg – 6,17÷7,18; Al – 3,69÷4,64; O – 31,91÷39,6.

Из породообразующих минералов в пробе преобладают клинохризолит и лизардит (табл. 2). Минералы относятся к группе серпентина, сингония ромбическая и гексагональная. Цвет зеленый разной интенсивности. Показатели преломления непостоянные. В иммерсионном препарате минералы анизотропные. Элементный состав обнаруженных минералов в основном представлен следующими элементами, %:

Fe – 1,67÷8,63; Mg – 19,75÷27,72;

O – 46,37÷54,48; Si – 15,28÷19,14.

Полученные результаты минералогических исследований хорошо согласуются с данными рентгенофазового метода анализа. Наряду с установленными минералами в исследованных пробах шламов обнаружены ярко выраженные фазы металлического железа, которые нетрудно видеть на фотографии шлифов проб и на EDS-спектрах, представленных на рис. 3.

При увеличении 500x в исследованных пробах обнаружены металлические включения железа с хромом (феррохром) и кремнием (ферросилиций), а также оксид железа, которые показаны на рис. 4.

При увеличении 1000x в исследованных пробах в фазе хромпикотита обнаружены включения металлической меди (рис. 5).

Цветные металлы в пробах представлены в виде единичных зерен сплава свинца с цинком и медью.



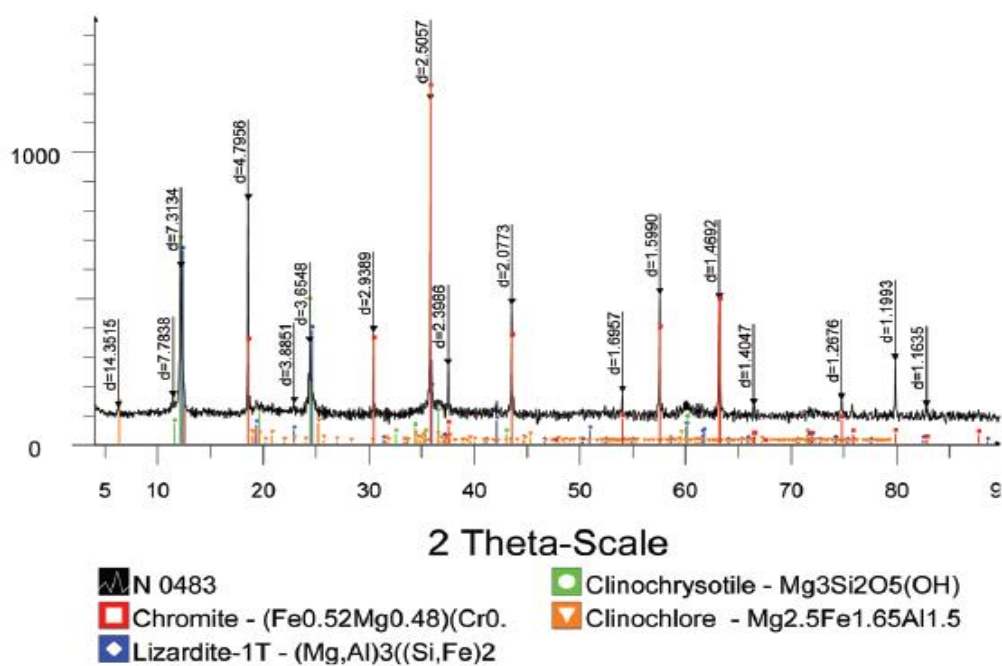


Рис. 1. Рентгенограмма хромитсодержащих шламов обогащения

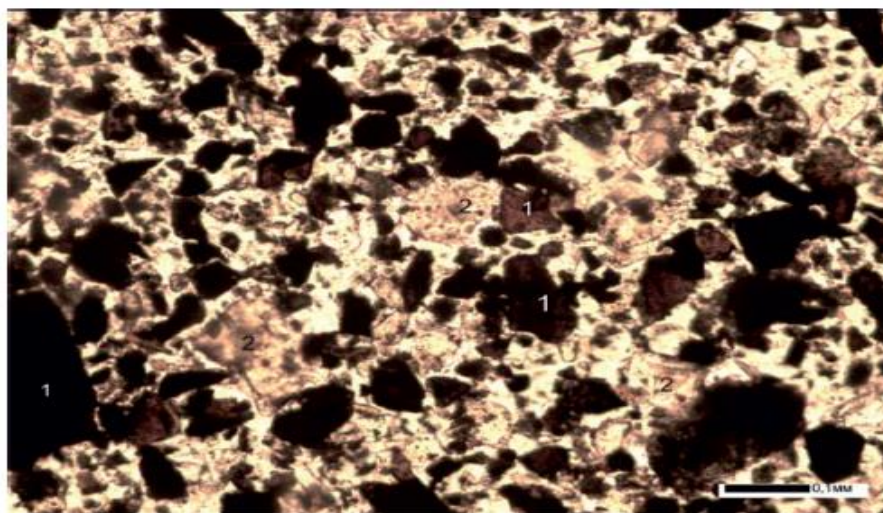
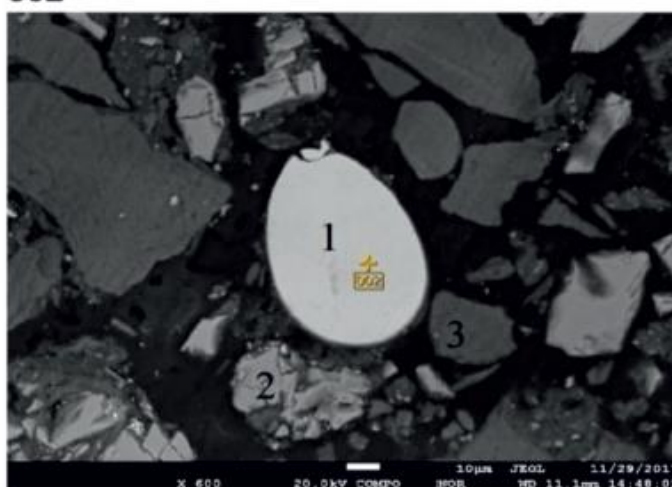
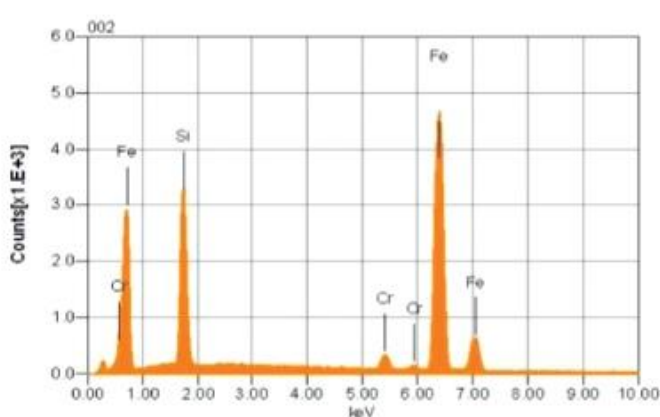


Рис. 2. Хромитсодержащий шлам обогащения 100х: 1 – породообразующие минералы; 2 – хромиткотит. Иммерсионная среда, без анализатора

002



А)



Elements	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
Si	12.36	21.86	0.22	777231	0.0599789	K
Cr	2.59	2.48	0.40	123043	0.0244326	K
Fe	85.05	75.67	0.60	2550455	0.6806480	K
Total	100.00	100.00				

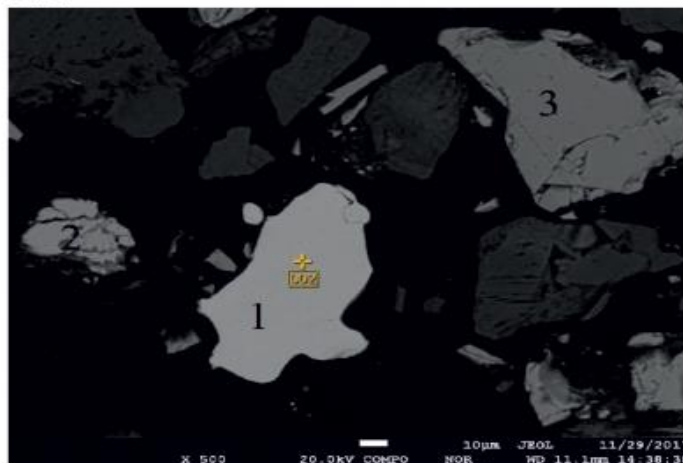
Б)

Рис. 3. (А) – Хромитсодержащий шлам обогащения, 600х: 1 – железо металлическое; 2 – хромиткотит; 3 – лизардит. Б) – EDS-спектры

Таким образом, полученные результаты минералогических исследований и рентгенофазового анализа показывают, что хром, железо, а также присутствующие в хромитсодержащих шламах обогащения цветные и редкоземельные

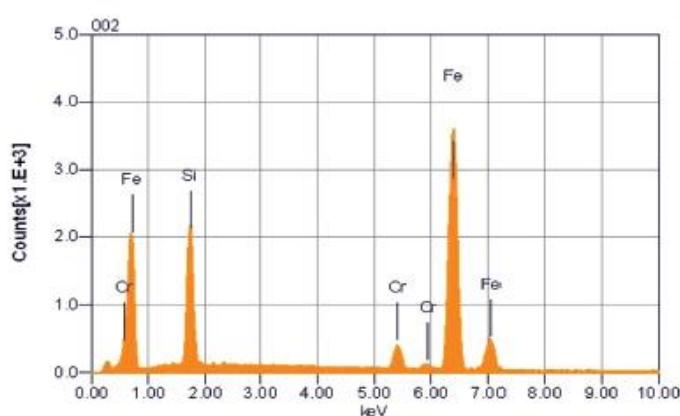
металлы в основном представлены в оксидной форме. На основании полученных результатов рассчитан рациональный состав хромитсодержащего шлама обогащения, результаты которого представлены в табл. 4.

002



Volt : 20.00 kV  
Mag. : x 500  
Date : 2017/11/29  
Pixel : 1280 x 960

А)



Acquisition Condition  
Instrument : 8230  
Volt : 20.00 kV  
Current : 5.00 nA  
Process Time : T1  
Live time : 20.00 sec.  
Real Time : 22.19 sec.  
DeadTime : 10.00 %  
Count Rate : 9528.00 CPS

Elements	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
Si	10.15	18.28	0.21	481772	0.0498370	K
Cr	4.71	4.58	0.39	169347	0.0450766	K
Fe	85.14	77.14	0.59	1937952	0.6932821	K
Total	100.00	100.00				

Б)

Рис. 4. (А) – Хромитсодержащий шлак обогащения, 500х: 1 – железо металлическое с примесью Cr и Si; 2 – оксид железа (гематит); 3 – хромитокотит. Б) – EDS-спектры

### Выводы

1. На основании комплексных физико-химических исследований, включающих минералогические исследования и рент-

генофазовый метод анализа, изучен вещественный состав хромитсодержащих шламов, полученных в результате обогащения хромовой руды Донского ГОК. Установлено, что основным хромсодержащим мине-

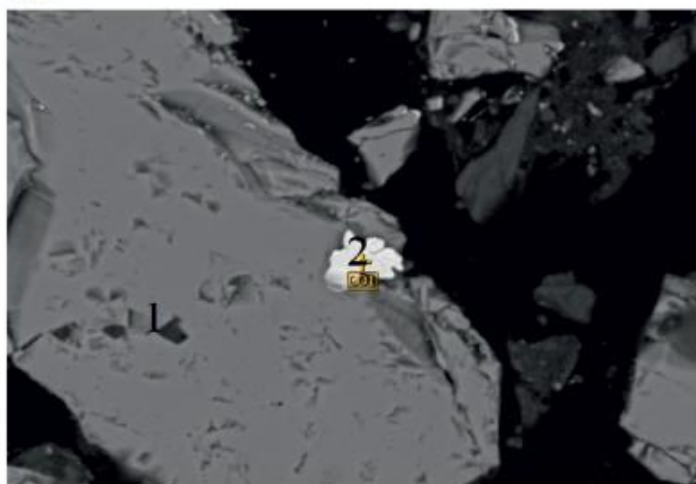


ралом в составе шлама является хромпикотит с содержанием 27%  $Cr_2O_3$ . Основные породообразующие минералы в шлаках представлены в виде минералов клинохризолита, лизардита и клинохлора с содержанием 29,3%  $MgO$ .

2. Установлены формы нахождения хрома, железа, цветных и редкоземельных ме-

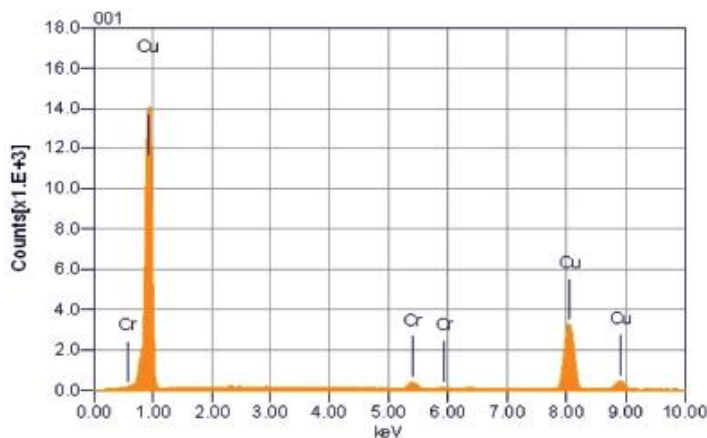
таллов в хромитсодержащих шлаках обогащения. Показано, что хром в основном представлен в форме хромпикотита (хромита). Высокое содержание хрома (18,5%) в шлаках обогащения позволяет считать, что данный продукт может служить дополнительным источником сырья для его извлечения.

001



Volt : 20.00 kV  
Mag : x 1,000  
Date : 2017/11/29  
Pixel : 1280 x 960

А)



Acquisition Condition  
Instrument : 8230  
Volt : 20.00 kV  
Current : 6.00 nA  
Process Time : T1  
Live time : 20.00 sec.  
Real Time : 23.05 sec.  
DeadTime : 13.00 %  
Count Rate : 16655.00 CPS

Elements	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
Cr	3.37	4.09	1.06	162581	0.0320656	K
Cu	96.63	95.91	2.86	2000005	0.8655437	K
Total	100.00	100.00				

Б)

Рис. 5. (А) – Хромитсодержащий шлак обогащения, 1000х: 1 – хромпикотит; 2 – включение металлической меди. Б) – EDS-спектры

Таблица 4

## Рациональный состав хромитсодержащего шлама обогащения

Соединения	Элементы, %											
	Cr	Fe	Mg	Si	Al	Ni	Co	Zn	ΣPЗЭ	O <sub>2</sub>	Проч.	Итого:
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,5									8,54		27,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5,64								2,42		8,06
FeO		1,24								0,35		1,59
MgO			17,6							11,73		29,33
SiO <sub>2</sub>				11,2						12,80		24,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					1,39					1,24		2,63
NiO						0,27				0,07		0,34
CoO							0,01			0,004		0,014
ZnO								0,01		0,003		0,013
ΣPЗЭ									0,025			0,025
Проч.											6,95	6,95
Всего:	18,5	6,88	17,6	11,2	1,39	0,27	0,01	0,01	0,025	37,157	6,95	100

3. На основании полученных результатов по изучению вещественного состава рассчитан рациональный состав хромитсодержащего шлама. Установленные высокие содержания магния, цветных металлов и РЗМ в шламах указывают на принципиальную возможность и целесообразность их попутного извлечения в целевой продукт.

## Список литературы

1. Колесова О.В., Островский С.В., Басов В.Н. Поисковые исследования по извлечению соединений хрома из шламов хроматного производства // Вестник ПНИПУ. – 2014. – № 4. – С. 76–90.
2. Алексеев Ю. Природное сырье – перспективы добычи // Мысль. – 2003. – № 10. – С. 43–45.
3. Каренов Р.С. Проблемы становления рынка черных металлов в Казахстане // Вестник КарГУ. Сер. Экономика. – 2007. – № 4 (48). – С. 9–25.
4. Haruna A., Uzairu A. Harrison GFS (2011) Chemical fractionation of trace metals in sewage water-irrigated soils // International Journal of Environmental Research 5: 733–744.
5. Serbaji M.M., Azri C., Medhioub K. Anthropogenic Contributions to Heavy Metal Distributions in the Surface and Sub-surface Sediments of the Northern Coast of Sfax, Tunisia // Int. J. Environ Res 6. – 2012. – P. 613–626.
6. Manfe M.M., Attar S.J., Parande M., Topare N.S. Treatment Of Cr (Vi) Contaminated waste water Using Biosorbent Prunus Amygdalus (Almond) Nut Shell Carbon // Int. J. of Chemical Sciences 10. – 2012. – P. 609–618.
7. Akar Sen G. Application of full factorial experimental design and response surface methodology for chromite beneficiation by Knelson concentrator // Minerals. – 2016. – Vol. 6, Iss. 1. – P. 5.
8. Kumar C.R., Tripathy S.K., Rao D.S. Characterisation and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density separator // J. Miner. Mater. Charact. Eng. – 2009. – Vol. 8, Iss. 5. – P. 367–378.
9. Tripathy S.K., Ramamurthy Y., Singh V. Recovery of chromite values from plant tailings by gravity concentration // J. Miner. Mater. Charact. Eng. – 2011. – Vol. 10, Iss. 1. – P. 13–25.
10. Tripathy S.K., Banerjee P.K., Suresh N. Magnetic separation studies on ferruginous chromite fine to enhance Cr: Fe ratio // Int. J. Miner. Metall. Mater. – 2015. – Vol. 22, Iss. 3. – P. 217–224.

## Продолжение приложения А

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ К. И. САТПАЕВА»  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
г. Алматы, ул. Сатпаева 22, тел: 292-63-46

### Справка

Дана Н.К.Досмухамедову, Е.Е.Жолдасбай, С.А.Омаровой  
(Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева), Казахстан Алматы), в том, что их статья: «ТЕРМОДИНАМИКА СУЛЬФАТИЗИРУЮЩЕГО ОБЖИГА ХРОМИТСОДЕРЖАЩЕГО ШЛАМА В ПРИСУТСТВИИ ВОССТАНОВИТЕЛЯ» будет опубликована в научном журнале «Вестник КазНУТУ», №4, 2019 г.

Ответственный секретарь  
\_15\_05\_



*Handwritten signature of N. Fedosenko*

Н. Федосенко

Справка дана для предъявления по месту требования



Продолжение приложения А



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ  
PATENT

№ 33465

ӨНЕРТАБЫСҚА / НА ИЗОБРЕТЕНИЕ / FOR INVENTION



(21) 2017/1140.1

(22) 06.12.2017

Қазақстан Республикасы өнертабыстары мемлекеттік тізілімінде тіркеу күні / Дата регистрации в Государственном реестре изобретений Республики Казахстан / Date of the registration in the State Register of Inventions of the Republic of Kazakhstan: 15.02.2019

(54) Кедей хромитті кендерді кешенді өңдеу тәсілі  
Способ комплексной переработки бедных хромитсодержащих руд  
Method of complex processing of poor chromite-containing ores

(73) "Институт металлургии и обогащения" акционерлік қоғамы (KZ)  
Акционерное общество "Институт металлургии и обогащения" (KZ)  
"Институт металлургии и обогащения" Joint-Stock Company (KZ)

(72) Гладышев Сергей Владиленович (KZ)  
Омарова Салтанат Абуталиповна (KZ)  
Кенжалиев Багдаулет Кенжалиевич (KZ)  
Абдувалиев Ринат Анварбекович (KZ)  
Дюсенова Сымбат Бериккалиқызы (KZ)  
Манарова Альфиям Ильяевна (KZ)  
Имангалиева Лейла Манарбековна (KZ)  
Ахмәдиева Назым Канатовна (KZ)

Gladyshev Sergey Vladilenovich (KZ)  
Omarova Saltanat Abutalipovna (KZ)  
Kenzhaliyev Bagdaulet Kenzhaliyevich (KZ)  
Abdulvaliyev Rinat Anvarbekovich (KZ)  
Dyussenova Symbat Berikkalikyzy (KZ)  
Manarova Alfiyam Ilyayevna (KZ)  
Imangaliyeva Leila Manarbekovna (KZ)  
Akhmadiyeva Nazym Kanatovna (KZ)



«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры  
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
Director of RSE «National institute of intellectual property»

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Требования к химическому составу хромовых концентратов для ферросплавов


#### СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

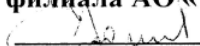
Донской горно-обогатительный комбинат-филиал АО «ТНК «Казхром»


УДК 622.346.1  
КПВЭД 08.99.29

МКС 73.060.30  
Группа А31

Согласовано  
Председатель Комитета  
государственного санитарного  
эпидемиологического надзора -  
Главный государственный  
санитарный врач  
Республики Казахстан

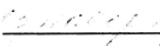
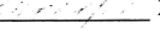
 К.С.Оспанов  
«12» 10 2010 г.

Утверждаю  
Директор Донского ГОКа -  
филиала АО «ТНК «Казхром»  
 Н.М.Логинов  
«12» 10 2010 г.

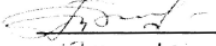
Вице-президент по техническим  
вопросам АО «ТНК «Казхром»  
 О.Е.Привалов  
«13» 10 2010 г.

**РУДА ХРОМОВАЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСПЛАВОВ**  
Донского горно-обогатительного комбината -  
филиала АО «ТНК «Казхром»

Стандарт организации  
СТ АО 306792590061-08-2010  
Вводится впервые

Срок действия с  2010 г.  
до  2011 г.

Держатель подлинника  
Донской ГОК -  
филиал АО «ТНК «Казхром»  
031100 г. Хромтау  
пл. Мира, 25  
тел. (713 36) 21 372

Разработан  
Технический директор  
Донского ГОКа - филиала  
АО «ТНК «Казхром»  
 М.М.Бекеев  
«12» 10 2010 г.

г.Хромтау, 2010 г.

## Продолжение приложения Б

### 30 Характеристика продукции

#### 1. Сведения о назначении продукции

Предназначена для производства ферросплавов, огнеупоров и хромовых соединений

#### 2. Основные характеристики продукции

Наименование показателей	Нормы для марок руд						
	ДХ-1-1	ДХ-1-2	ДХ-1-3	ДХ-1-4	ДХ-1-5	ДХ-1-6	ДХ-1-7
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Массовая доля оксида хрома, % не менее	50,5	50,0	49,0	47,0	46,0	45,0	42,0
2. Массовая доля диоксида кремния, % не более	6,8	7,8	8,0	9,7	9,5	10,5	12,5
3. Массовая доля фосфора, % не более	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006
4. Массовая доля серы, % не более	0,08	0,08	0,08	0,07	0,05	0,07	0,08
5. Крупность, мм	-	-	-	-	-	0-10	-
	-	-	-	-	-	5-10	-
	0-3	0-10	3-10	0-10	10-160	10-160	0-10
	-	-	-	10-160	-	0-300	100-300

#### 3. Другие сведения

Предприятие сертифицировано фирмой «Тюфт Серт» на соответствие нормам международных стандартов ИСО 9001-2000, ИСО 14001-2005 и OHSAS 18001-2007 с получением сертификата.

Сведения о сертификации		31	Продукция не подлежит обязательной сертификации		
		Наименование органа	Фамилия/подпись	дата	телефон
04	представил	Донской ГОК – филиал АО «ТНК «Казхром»	Аймбетов М.М. <i>Аймбетов</i>	26.10.10	713-36 (49-82)
05	зарегистрировал	Департамент Комитета технического регулирования и метрологии по Актыбинск. обл.	<i>ДТ</i>	05.11.10	55-05-36
06	ввел в каталог				
10					

Продолжение приложения Б

СТ АО 306792590061-08-2010

Таблица 1 – Показатели качества руды хромовой

Наименование показателей	Норма для марок руд							Метод испытаний
	ДХ-1-1	ДХ-1-2	ДХ-1-3	ДХ-1-4	ДХ-1-5	ДХ-1-6	ДХ-1-7	
Массовая доля оксида хрома, % не менее	50,5	50,0	49,0	47,0	46,0	45,0	42,0	ГОСТ 15848.1
Массовая доля диоксида кремния, % не более	6,8	7,8	8,0	9,7	9,5	10,5	12,5	ГОСТ 15848.12
Отношение массовой доли оксида хрома к оксиду железа, % не менее	3,9	3,9	3,9	3,4	3,3	3,2	3,0	ГОСТ 15848.2
Массовая доля фосфора, % не более	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	ГОСТ 15848.14
Массовая доля серы, % не более	0,08	0,08	0,08	0,07	0,05	0,07	0,08	ГОСТ 15848.6
Массовая доля влаги, % не более								СТ СЭВ 4523
в летний период	5,0	4,0	5,0	4,0	4,0	4,0	4,0	
в зимний период	2,0	4,0	2,0	4,0	4,0	4,0	4,0	
Крупность, мм	-	-	-	-	-	0-10	-	ГОСТ 17495
	-	-	-	-	-	5-10	-	
	0-3	0-10	3-10	0-10	10-160	10-160	0-10	
	-	-	-	10-160	-	0-300	100-300	

ПРИМЕЧАНИЕ Допускается отклонение по массовой доле оксида хрома в руде хромовой марок ДХ-1-1, ДХ-1-2, ДХ-1-3, ДХ-1-4, ДХ-1-5, ДХ-1-6, ДХ-1-7 в меньшую сторону, но не более 2% в отдельных партиях одной поставки, при этом допускается увеличение содержания диоксида кремния до 1,5%.

Таблица 2 – Гранулометрический состав руды хромовой

Класс крупности	Размер куска, мм	Массовая доля класса 0-10 мм, % не более	Массовая доля класса 0-1 мм, % не более	Массовая доля класса 0-0,5 мм, % не более
1	0-3, 0-5	-	-	70
2	0-10	-	-	-
3	3-10	-	20	-
4	5-10	-	20	-
5	10-160(45%, 47%)	30	-	-
6	10-160(46%)	15	-	-
7	0-300	50	-	-
8	100-300	-	-	-



**ОТЗЫВ**  
**научного руководителя на диссертационную работу магистранта**  
**группы 6М070900-Металлургия Омаровой С.А.**  
**на тему: «Разработка комплексной технологии переработки**  
**хромитсодержащих шламов обогащения»**

Диссертационная работа магистранта Омаровой С.А. посвящена переработке хромитсодержащих шламов обогащения с получением хромитового концентрата, концентратов цветных металлов, аморфного кремнезема и магнийсодержащего продукта.

На основании комплексных физико-химических исследований, включающих минералогические исследования и рентгенофазовый метод анализа изучен вещественный состав хромитсодержащих шламов, полученных в результате обогащения хромовой руды Донского ГОК.

Проведенные термодинамические расчеты реакций взаимодействия компонентов хрома, железа, магния, цветных и редкоземельных металлов с серной кислотой при сульфатизирующем обжиге показывают принципиальную возможность разделения хрома от других металлов в присутствии восстановителя (угля) с переводом хрома в осадок в виде нерастворимого кека и концентрированием магния, цветных металлов и РЗМ в растворе. Полученные результаты показывают принципиальную возможность разделения хрома от других металлов в виде нерастворимого кека при низких температурных интервалах обжига – 723 – 873 К в условиях восстановительно-сульфидирующего обжига.

Экспериментально отработаны и выявлены оптимальные параметры каждой операции, составляющей основу селективного извлечения ценных элементов в товарные продукты.

Омарова С. А. проявила себя достаточно грамотным, вполне сформировавшимся исследователем, способным творчески подходить к решению поставленных научных задач. Ею правильно и полно проведен анализ литературных данных по способам переработки хромсодержащего сырья, отработаны и установлены оптимальные параметры каждой операции разработанной технологической схемы. Результаты исследований отработаны и представлены в виде таблиц и иллюстрации.

Диссертационная работа магистранта заслуживает оценки **отлично** (98%), а **Омарова Салтанат Абуталиповна** присвоения степени **«Магистр»** по направлению подготовки **«Металлургия»**.

**Научный руководитель**  
**ассистент-профессор, к.т.н.**  
**(с функциями старшего научного сотрудника)**

Государственный университет  
имени С.А. Байконурова

**Досмухамедов Н.К.**

2019 г.



**РЕЦЕНЗИЯ**

на магистерскую диссертацию  
(наименование вида работы)

Омаровой Салтанат Абуталиповны  
(Ф.И.О. обучающегося)

6M070900 – «Металлургия»  
(шифр и наименование специальности)

На тему: «Разработка комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения»

Выполнено:

- а) графическая часть на \_\_\_\_\_ листах  
б) пояснительная записка на 95 страницах

**ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ**

Диссертационная работа **Омаровой С.А.** посвящена актуальной теме, которая направлена на разработку технологии переработки шламов Донского ГОК. На основании анализа литературных данных диссертантом обосновано научное направление исследований и показано, что наиболее перспективным способом переработки хромитсодержащих шламов обогащения является сульфатизирующий способ обогащения хромитсодержащих шламов в присутствии восстановителя.

В работе разработана технология комплексной переработки хромитсодержащего шлама обогащения Донского ГОК, содержащего хром, магний, цветные металлы и другие полезные компоненты способом сульфатизирующего обжига совместно с восстановителем (углем). При этом решение основной задачи операции обжига сводилась к переводу в водорастворимые соединения магния, цветных и редкоземельных металлов с отделением хрома и его соединений в нерастворимый остаток - кек.

Полученные в работе результаты по изучению форм нахождения основных элементов и их соединений в хромитсодержащих шламах обогащения показали, что в них указанные металлы, в основном, находятся в виде своих оксидов. Установлены оптимальные параметры каждого из узлов (основных операций) комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения. Показана принципиальная возможность их переработки с селективным извлечением ценных металлов в товарные продукты.

По работе имеется вопрос: В каком из конечных продуктов концентрируются редкоземельные элементы?

**Оценка работы**

Выпускная магистерская работа заслуживает оценку **отлично (98%)**, а **Омарова Салтанат Абуталиповна** присвоения степени «**Магистр**» по специальности 6M070900 – «Металлургия».

**Рецензент**

Технический директор «Arna Solution», к.т.н.  
(должность, уч. степень, звание)

Рахитбаев Б.С.  
(подпись)

«16» мая 2019г.

## Отчет подобия



Университет:	Satbayev University
Название:	Разработка комплексной технологии переработки хромитсодержащих шламов обогащения
Автор:	Омаровой Салтанат Абуталиповны
Координатор:	Нурлан Досмухамедов
Дата отчета:	2019-05-14 11:40:06
Коэффициент подобия № 1: ?	<b>1,2%</b>
Коэффициент подобия № 2: ?	<b>0,0%</b>
Длина фразы для коэффициента подобия № 2: ?	<b>25</b>
Количество слов:	2 420
Число знаков:	18 715
Адреса пропущенные при проверке:	
Количество завершенных проверок: ?	35



К вашему сведению, некоторые слова в этом документе содержат буквы из других алфавитов. Возможно - это попытка скрыть позаимствованный текст. Документ был проверен путем замещения этих букв латинским эквивалентом. Пожалуйста, уделите особое внимание этим частям отчета. Они выделены соответственно.

**Количество выделенных слов 43**

>>

Самые длинные фрагменты, определенные, как подобные

>>

Документы, в которых найдено подобные фрагменты: из RefBooks |

>>

Документы, содержащие подобные фрагменты: Из домашней базы данных

>>

Документы, содержащие подобные фрагменты: Из внешних баз данных

>>

Документы, содержащие подобные фрагменты: Из интернета