

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Забайкальский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ЗабГУ»)

На правах рукописи



Патеюк Сергей Андреевич

**Научное обоснование применения флотационного реагента-собирателя –
олеилсаркозината натрия для повышения технологических показателей
переработки отходов производства борной кислоты**

Специальность 25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чита – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Забайкальский государственный университет» (ФГБОУ ВО "ЗабГУ")

**Научный
руководитель:**

Хатькова Алиса Николаевна,
доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» (ФГБОУ ВО "ЗабГУ"), г. Чита

**Официальные
оппоненты:**

Ожогина Елена Германовна,
доктор геолого-минералогических наук, действительный член РАЕН, заведующий минералогическим отделом федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»), г. Москва

Саломатова Светлана Ивановна,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», лаборатория обогащения полезных ископаемых, г. Якутск

**Ведущая
организация:**


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», (ФГБОУ ВО «УГГУ»), г. Екатеринбург

Защита состоится «12» мая 2022 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.299.08 при ФГБОУ ВО «ЗабГУ» по адресу: 672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» по адресу: 672007, г. Чита, ул. Бабушкина, 129 и на сайте ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» по электронному адресу:
http://zabgu.ru/files/html_document/pdf_files/fixed/Pateyuk/Dissertaciya_Pateyuk_S.A..pdf

Автореферат разослан « 14 » _____ марта _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д-р. техн. наук, доцент

 Г.П. Сидорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из перспективных видов комплексного сырья являются борные руды. Большая часть промышленных запасов борных руд находится в семи странах мира (Россия, США, Аргентина, Турция, Перу, Чили, Италия), что объясняет как дефицит, так и высокую стоимость борной продукции.

В отвалах горноперерабатывающих предприятий России накоплено более 100 млн т отходов в виде борогипса, фосфогипса, фторгипса (в среднем до 15 млн т в год), что влечёт за собой отчуждение значительных площадей земельных угодий. Транспортирование, устройство и хранение отходов обуславливают огромные затраты (более 30 %) капитальных вложений на основное производство и его эксплуатацию. Отходы содержат вредные примеси от 1,0 до 2,5 % (серная, фосфорная, борная кислоты и их соединения) и наносят вред окружающей среде.

Снизить себестоимость готовой борсодержащей продукции можно за счёт полного извлечения сопутствующих компонентов, получения и реализации дополнительных продуктов обогащения.

Проблемой комплексного и рационального использования отходов производства борной кислоты с получением различных продуктов занимались в Институте химии ДВО РАН (П. С. Гордиенко, Г. Ф. Крысенко, С. Б. Ярусова), ФГАОУ ВО ДВФУ (В. С. Семлев, Н. Б. Кондриков, В. А. Реутов), ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (М. А. Афанасьева, Ф. Л. Капустин, Н. А. Митюшов).

Единственным источником борного сырья в России являются датолитовые руды Дальнегорского месторождения (Приморской край), являющиеся сырьевой базой ООО «Горно-химическая компания «БОР»» («ГХК «БОР»»). В Дальнегорском регионе сконцентрировано более 5 млрд т отходов. Обогащительная фабрика (ООО «Дальнегорский ГОК») входит в состав «ГХК «БОР»» и выпускает датолитовый концентрат с содержанием 18,5 % V_2O_5 . После выщелачивания концентрата получается борная кислота и до 350 тыс. т/год отходов – борогипс.

Промышленные запасы Дальнегорского месторождения составляют 160 млн т руды, общий объем неиспользуемого минерального ресурса – борогипса составляет более 25 млн т.

Таким образом, разработка технологии переработки отходов производства борной кислоты (борогипса) с целью комплексного использования минерального сырья **является актуальной научной задачей.**

Цель работы – научное обоснование применения флотационного реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия для повышения технологических показателей переработки отходов производства борной кислоты и комплексности использования минерального сырья.

Задачи исследований:

1. Изучение минерального, химического, гранулометрического состава отходов производства борной кислоты.
2. Выбор метода флотации (прямая, обратная), реагентного режима для получения кремниевого концентрата из отходов производства борной кислоты.
3. Подбор рациональных режимных параметров флотационного разделения минералов борогипса методом многофакторного планирования технологических экспериментов.

4. Выявление экспериментальным путем закономерностей влияния отдельных технологических факторов флотационного обогащения на показатели извлечения и содержания диоксида кремния в концентрате.

5. Разработка эмпирических уравнений множественной регрессии показателей извлечения и содержания диоксида кремния в концентрате при обогащении борогипса.

6. Эколого-экономическое обоснование нового технологического решения.

Объект исследования – отходы производства борной кислоты (борогипс), получаемые при переработке датолитовых руд Дальнегорского месторождения.

Предмет исследования – режимные параметры процесса флотации отходов производства борной кислоты (борогипса).

Идея работы. Эффективное разделение минералов диоксида кремния, гипса и ангидрита достигается применением реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия и нахождением рациональных режимных параметров обратной флотации борогипса, обеспечивающих повышение комплексности использования минерального сырья.

Методология и методы исследований – информационный анализ, патентный поиск; современные физико-химические методы анализа: ИК-спектроскопия, фотометрия, гравиметрия, атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой, рентгенографический количественный фазовый анализ, растровая электронная микроскопия, седиментационный анализ; метод планирования эксперимента; флотационные исследования на лабораторной установке, полупромышленные испытания; методы математической статистики; эколого-экономический анализ.

Научная новизна работы:

1. Впервые доказана эффективность использования олеилсаркозината натрия в качестве реагента-собирателя, обладающего смачивающими и пенообразующими свойствами в зависимости от особенностей минерального состава и структуры борогипса.

2. Выявлены основные факторы, влияющие на эффективность обогащения борогипса (температура пульпы, pH, расход реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия, время агитации и время флотации) и повышение комплексности использования минерального сырья.

3. Экспериментально получены уравнения множественной регрессии показателей извлечения и содержания диоксида кремния в концентрате при обратной флотации борогипса с реагентом-собирателем (олеилсаркозинатом натрия).

4. Предложена гипотеза механизма взаимодействия молекул олеилсаркозината натрия, имеющих неподеленную электронную пару у атома азота и валентные электроны атома кислорода карбоксильной группы, с минералами борогипса, заключающегося в адсорбции реагента-собирателя на поверхности частиц гипса и ангидрита, содержащих положительно заряженные ионы кальция.

Научная новизна работы подтверждена патентом РФ № 2723787 «Способ переработки гипсосодержащих отходов производства борной кислоты».

Практическая значимость работы.

Установлена возможность применения олеилсаркозината натрия для повышения эффективности флотационного обогащения отходов производства борной кислоты, что позволяет увеличить извлечение диоксида кремния в концентрат, используемый для производства «белой сажи» широкого спектра применения, на 30,46 % (с 33,57 до 64,03 %) по сравнению с аналогом, предложенным действующим

предприятием ООО «Дальнегорский ГОК», и дополнительно извлечь в пенный продукт гипс, востребованный в различных областях промышленности.

Разработана технологическая схема переработки техногенных отходов производства борной кислоты – борогипса, позволяющая повысить комплексность использования минерального сырья.

Ожидаемый экономический эффект от реализации предложенного технологического решения переработки техногенных отходов производства борной кислоты составит 55,36 млн руб. в год. Сократятся затраты на размещение отходов производства на 1,77 млн руб. в год, уменьшатся площади нарушенных земель на 22 % (с 950 до 744 га), улучшится экологическая обстановка в регионе. Предотвращенный эколого-экономический эффект от сокращения площади нарушаемых земель составит 220,4 тыс. руб.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дополнительное получение кремниевого концентрата и гипсового продукта достигается применением реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия при флотации борогипса в патентно-защищенном режиме (агитация минералов с реагентом-собираателем – 3 мин, флотация – 8 мин, расход олеилсаркозината натрия – 1 кг/т борогипса, температура пульпы – 30 °С, pH – 7,5).

2. Предложены уравнения множественной регрессии зависимости извлечения и содержания диоксида кремния от технологических факторов флотационного обогащения (температуры пульпы, pH, расхода реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия, времени агитации, времени флотации), полученные экспериментальным путем в лабораторных условиях, корректность которых подтверждена результатами полупромышленных испытаний.

3. Методами аналитических исследований подтверждена правомерность выдвинутой гипотезы механизма взаимодействия молекул олеилсаркозината натрия, имеющих неподеленную электронную пару у атома азота и валентные электроны атома кислорода карбоксильной группы, с минералами борогипса, заключающегося в адсорбции реагента-собираателя на поверхности частиц гипса и ангидрита, содержащих положительно заряженные ионы кальция.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, представленных в работе, подтверждается использованием современных физико-химических методов исследований по аттестованным методикам в аккредитованных лабораториях (ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского», г. Москва), представительностью проб массой 1,6 т, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, применением методов математической статистики для обработки данных при доверительной надежности не менее 95 %.

Реализация результатов работы. Реагент-собираатель – олеилсаркозинат натрия рекомендован к опытно-промышленным испытаниям на обогатительной фабрике ООО «Дальнегорский ГОК» при технологическом переделе борогипса.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Обогащение полезных ископаемых и вторичного сырья» при проведении лабораторных занятий по курсу учебной дисциплины «Флотационные методы обогащения» специальности 21.05.04 «Горное дело» (специализация «Обогащение полезных ископаемых»).

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на региональных, всероссийских и международных научно-практических

и научно-технических конференциях: «XLIII научно-практическая конференция молодых исследователей ЗабГУ» (г. Чита, 2016); Международное совещание «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья» (Плаксинские чтения – 2017) (г. Красноярск); XVII Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов» (г. Чита, 2017); I Всероссийская научная конференция «Наука в России: перспективные исследования и разработки» (г. Новосибирск, 2018); XLV Научно-практическая конференция молодых исследователей ЗабГУ (г. Чита, 2018); Международный симпозиум «Новые классы флотационных реагентов и современные методы оценки их адсорбции на микро- и наночастицах минералов» («Плаксинские чтения – 2018») в рамках XXIX Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых (г. Москва, 2018); XVIII Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов» (г. Чита, 2018); Международное совещание «Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке» (Плаксинские чтения – 2019) (г. Иркутск, 2019); 14-й Международный конгресс по прикладной минералогии (ICAM 2019) (г. Белгород, 2019); Международное совещание «Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2021) (г. Владикавказ, 2021).

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 3 статьи в научных журналах из списка ВАК РФ и 1 статья, входящая в международную библиографическую базу данных Scopus, получен 1 патент РФ.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; проведении аналитического обзора научно-технической литературы о борных рудах, отходах производства борной кислоты и методах их переработки; выполнении исследований вещественного состава борогипса и продуктов обогащения; проведении флотационных исследований отходов производства борной кислоты; анализе и обобщении полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений. Содержит 147 страниц машинного текста, включающего 29 рисунков, 44 таблицы, библиографический список из 147 наименований.

Благодарности. Автор выражает признательность и глубокую благодарность научному руководителю д-ру техн. наук, профессору А. Н. Хатьковой; д-ру техн. наук, профессору Л. В. Шумиловой, д-ру техн. наук, профессору В. П. Мязину, кафедре «Обогащение полезных ископаемых и вторичного сырья» за консультации и экспертизу диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены проблемы и актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, основные защищаемые положения, научная и практическая значимость полученных результатов исследований.

В первой главе дан обзор современного состояния практики обогащения борсодержащих руд и их отходов. Рассмотрены экологические и экономические аспекты ресурсопользования и современные способы технологий переработки бор- и кремнийсодержащего сырья.

Во второй главе изучен гранулометрический, химический и минеральный составы борогипса различными физико-химическими методами. Проведены флотационные исследования с различными флотационными реагентами, дано обоснование выбора флотационного реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия для выделения из борогипса кремниевого концентрата и гипсового продукта.

В третьей главе приведены результаты исследований трёх альтернативных вариантов схем флотации борогипса. Определены рациональные режимные параметры обратной флотации борогипса с применением олеилсаркозината натрия. Получены два готовых продукта – кремниевый и гипсовый. Экспериментально получены уравнения множественной регрессии для определения оптимальных условий обратной флотации борогипса.

В четвертой главе дано эколого-экономическое обоснование эффективности нового технологического решения. Сделан расчет коэффициента комплексности использования датолитовых руд по трем вариантам.

В заключении приведены обобщённые выводы по результатам исследований.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Дополнительное получение кремниевого концентрата и гипсового продукта достигается применением реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия при флотации борогипса в патентно-защищенном режиме (агитация минералов с реагентом-собирателем – 3 мин, флотация – 8 мин, расход олеилсаркозината натрия – 1 кг/т борогипса, температура пульпы – 30 °С, pH – 7,5).

Объект исследования – представительная проба борогипса, отобранная с хвостохранилища обогатительной фабрики ООО «Дальнегорский ГОК», массой 1,6 тонны. Результаты изучения гранулометрического состава исходного материала представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав борогипса

Класс крупности частиц, мм	Выход, %	Содержание SiO ₂ , %	Извлечение SiO ₂ , %
+0,071	54,93	25,64	43,15
+0,064-0,071	3,54	25,82	3,76
+0,032-0,064	8,59	25,63	8,86
+0,016-0,032	17,51	27,13	20,45
+0,008-0,016	12,62	32,13	19,84
-0,008+0,00	2,81	42,3	3,94
Исходный	100	27,19	100

В ходе экспериментальных исследований установлено, что борогипс, полученный после выщелачивания датолитового концентрата, на 95 % представлен классом минус 0,071 мм. Однако при длительном хранении в хвостохранилище мелкие частицы борогипса слипаются, образуя более крупные агрегаты, которые в свою очередь, обладают худшей флотируемостью. При хранении в течение нескольких лет техногенных отходов возникнет необходимость последующего измельчения борогипса до оптимального содержания (95 % класс минус 0,071 мм), поэтому осуществлять переработку борогипса технологически и экономически целесообразнее сразу после сернокислотного выщелачивания.

Комплексом современных физико-химических методов исследования (ИК-спектроскопия, растровая электронная микроскопия (РЭМ), рентгенофазовый анализ (РФА)) изучен химический, элементный, минеральный составы борогипса.

На ИК-спектре борогипса (рисунок 1) выявлены валентные колебания Si-O-Si групп в области 1139, 671, 601 см^{-1} , относящиеся к наличию диоксида кремния, а также колебания SO_4^{2-} групп в области 461 см^{-1} , связанные с присутствием гипса и ангидрита в исследуемом объекте.

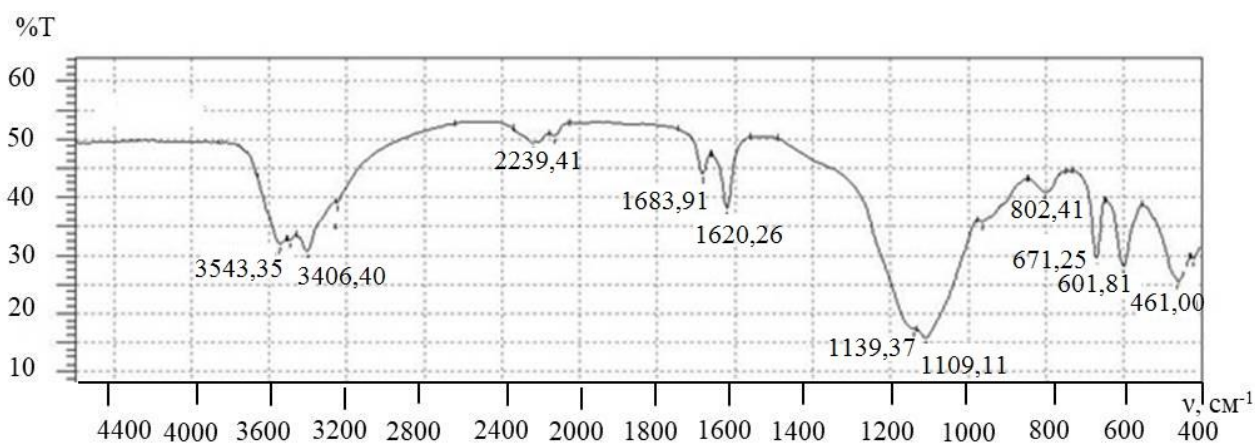


Рисунок 1 – ИК-спектр борогипса

Растровой электронной микроскопией (рисунок 2) установлено, что борогипс имеет сложный рельеф микроповерхности, образованный кристаллами и агрегатами, в большинстве случаев представленными тонкими классами, о чем свидетельствует диапазон значений диаметра Ферета ($d_{\text{Fmin}} = 12,108 \text{ мкм}$, $d_{\text{Fmax}} = 19,437 \text{ мкм}$), позволяющий также отнести исследуемую пробу борогипса, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14688-1-2017 «Геотехнические исследования и испытания. Идентификация и классификация грунтов. Идентификация и описание», к среднепылеватому грунту.

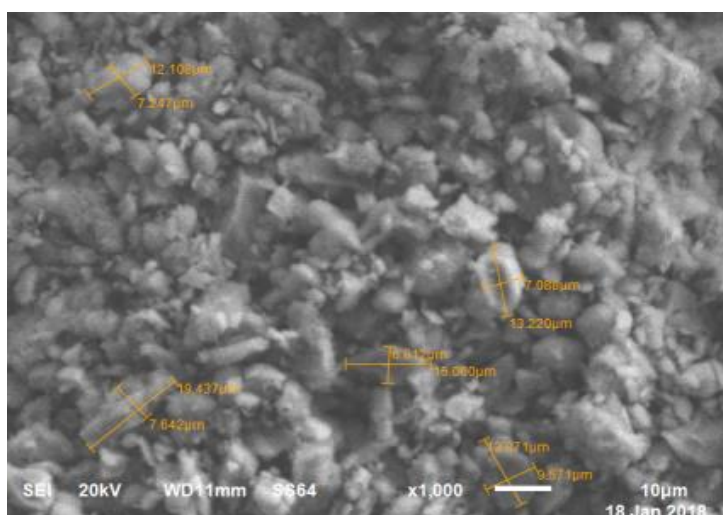


Рисунок 2 – Микрофотография РЭМ борогипса

Элементный состав исходной пробы борогипса по данным РЭМ приведен в таблице 2. Выявлено повышенное содержание кислорода, кальция, кремния, серы и водорода. На примесные элементы приходится не более 3 %, которые представлены

бором (0,42 %), железом (1,23 %), алюминием (0,26 %), магнием (0,14 %), марганцем (0,12 %), натрием (0,15 %), калием (0,06 %), титаном (0,01 %).

Таблица 2 – Элементный состав исходной пробы борогипса по результатам РЭМ

Элементный состав, %												
Si	S	Ca	O	B	Fe	Al	Mg	Mn	Na	K	Ti	H
9,06	7,88	12,60	61,14	0,42	1,23	0,26	0,14	0,12	0,15	0,06	0,01	6,93

Анализируя результаты ИК-спектроскопии (рисунок 1) и учитывая содержание основных элементов в анализируемой пробе, а именно кальция (12,60 %), кремния (9,06 %), кислорода (61,14 %), серы (7,88 %) и водорода (6,93 %), можно сделать вывод о предпочтительных формах их связывания и нахождения в борогипсе. Для кальция это сульфатная форма (CaSO_4), кремний же находится в борогипсе в виде оксида (SiO_2), наличие водорода свидетельствует о присутствии в анализируемой пробе гигроскопической воды.

Результаты изучения химического состава фотометрическим, гравиметрическим, атомно-эмиссионным методами представлены в таблице 3, которые подтвердили данные РЭМ.

Таблица 3 – Химический состав борогипса

Химический состав, %												
SiO_2	CaO	SO_3	B_2O_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	MnO	Na_2O	K_2O	TiO_2	H_2O	
27,19	25,0	31,53	1,06	3,08	0,65	0,28	0,25	0,23	0,090	0,040	10,40	

Минеральный состав борогипса, установленный по результатам РФА, представлен на рисунке 3 и в таблице 4. На спектрах рентгеновских лучей исходного образца борогипса (рисунок 3) обнаружены дифракционные отражения, присущие гипсу (наиболее интенсивные рефлексы 12, 21, 23 2θ), ангидриту (26, 32, 39,40 2θ) и кремнезему (27 2θ).

Таблица 4 – Минеральный состав борогипса

Минерал	Теоретическая формула	Массовая доля, %
Гипс	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	47
Ангидрит	CaSO_4	14
Геденбергит	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$	1
Волластонит	CaSiO_3	4
Гранат	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{O})_4$	3
Сумма кристаллических фаз		69
Аморфный диоксид кремния		27,19
Неразложившиеся минералы		3,81

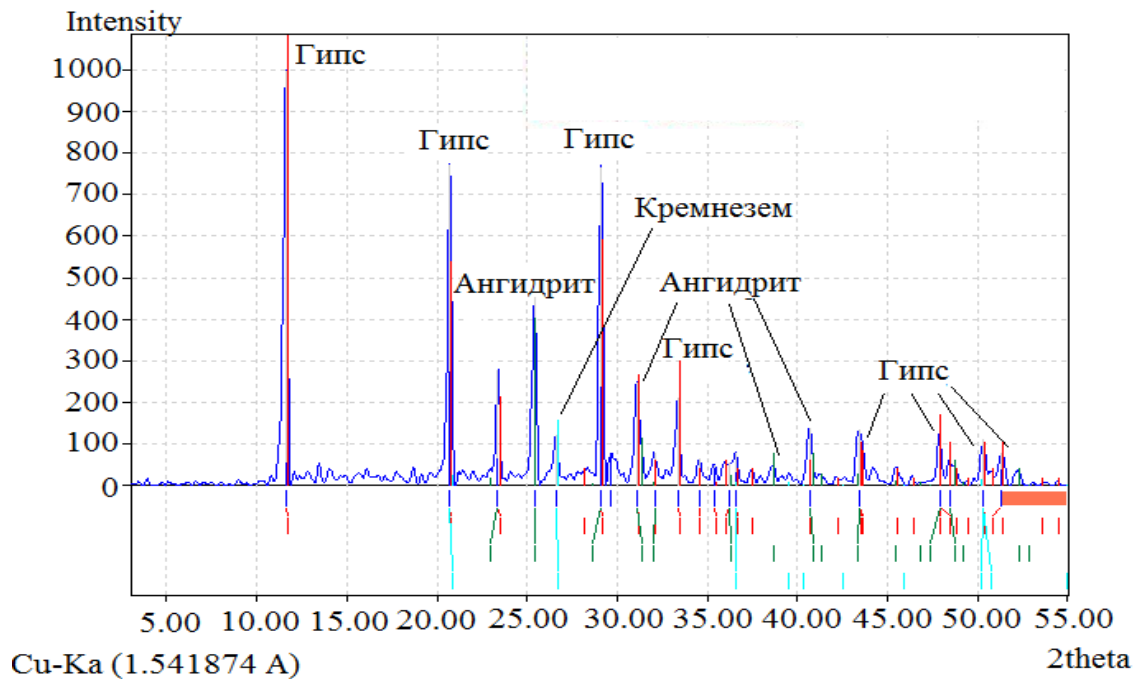


Рисунок 3 – Минеральный состав борогипса по результатам РФА

Результаты флотации борогипса с реагентами-собирателями, выбранными с учетом практики работы обогатительных фабрик, перерабатывающих неметаллические руды, представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Оценка эффективности флотации борогипса с использованием различных реагентов-собирателей

Флотореагент	Содержание SiO ₂ , %	Извлечение SiO ₂ , %
Олеилсаркозинат натрия	46,27	64,88
Олеилсаркозин	45,98	45,86
ФЛОН-1 (катионное ПАВ – ацетат первичных аминов кокосовой фракции в изопропиловом спирте)	39,24	62,98
Жидкое мыло	37,30	65,60
Техническая нафтеновая кислота	35,39	55,30
Олеиновая кислота	37,33	50,36
Растительное кислое масло	38,09	45,95
Олеин	39,04	45,09
Линолевая кислота	43,38	51,57

Экспериментально показано, что из всех возможных к применению для флотации борогипса реагентов-собирателей олеилсаркозинат натрия наиболее эффективен. С его использованием достигнуты максимальные значения технологических показателей: содержание диоксида кремния в концентрате составило 46,27 %, при извлечении 64,88 % соответственно.

Олеилсаркозинат натрия (химическая формула – $C_{17}H_{33}CON(CH_3)CH_2COONa$, торговое название – перластан ON-60) – анионоактивное поверхностное вещество N-ацил-саркозинового ряда, которое по химическим свойствам и реакционной способности схоже с жирнокислотными флотационными реагентами.

Олеилсаркозинат натрия растворяется в воде, не чувствителен к жесткой воде, обладает хорошими пенообразующими и смачивающими свойствами, что является его конкурентным преимуществом, открывающим возможность получения ценных товарных продуктов: кремниевого концентрата – для производства «белой сажи» и гипсового продукта с широким спектром практического применения.

Все дальнейшие исследования проводили с олеилсаркозинатом натрия, который впервые применен для флотации борогипса. Рациональные режимные параметры и условия проведения флотации установлены с использованием методики рационального планирования многофакторного эксперимента.

Альтернативные схемы флотации борогипса: базовая, разработанная ООО «Дальнегорский ГОК», и предложенная автором (с применением реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия) представлены на рисунках 4, 5, 6.

Внедрение базовой схемы (рисунок 4) переработки борогипса с использованием в качестве реагента-собирателя жидкого мыла отложено ввиду низкого извлечения диоксида кремния в кремниевый концентрат ($\epsilon_{\text{SiO}_2} = 33,57\%$).

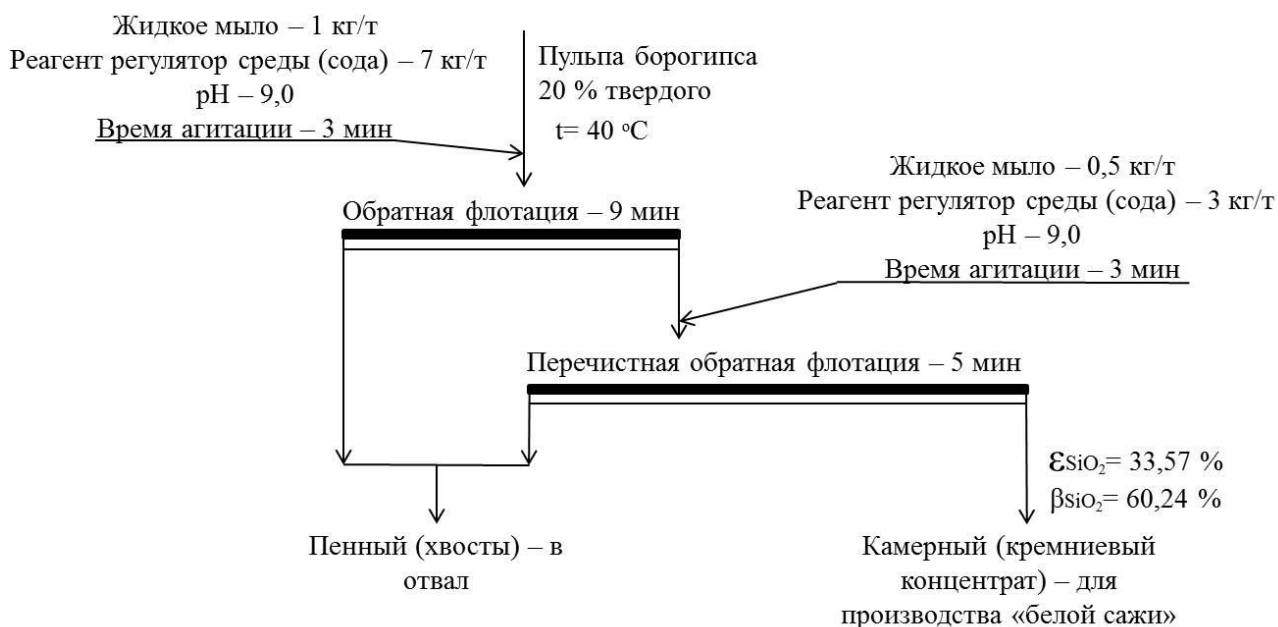


Рисунок 4 – Базовая схема флотации борогипса, предложенная ООО «Дальнегорский ГОК»

Применение олеилсаркозината натрия, подаваемого в основную и перечистную флотации по схеме, представленной на рисунке 5, позволило увеличить извлечение диоксида кремния с 33,57 до 65,15 %. Однако по содержанию диоксида кремния концентрат не соответствует требованиям (содержание диоксида кремния не менее 50 %), предъявляемым к сырью для получения «белой сажи» по ГОСТу 18307-78 «Сажа белая. Технические условия».

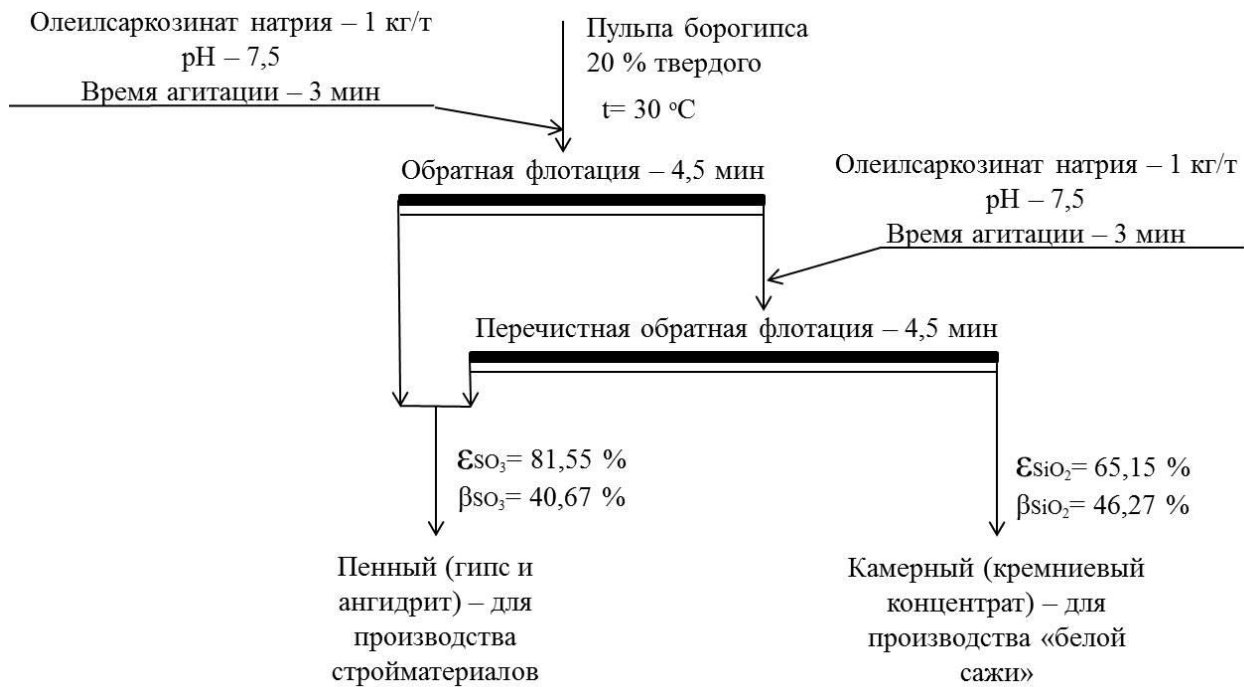


Рисунок 5 – Схема флотации борогипса с реагентом-собирателем – олеилсаркозинатом натрия с двумя операциями флотации

Оптимальной из трех предложенных схем переработки исследуемого сырья является одностадийная технологическая схема флотации борогипса, представленная на рисунке 6, предусматривающая применение олеилсаркозината натрия в качестве реагента-собирателя с расходом 1000 г/т, установленным экспериментальным путем (рисунок 7), и временем флотации – 8 минут. Обогащение по данной схеме позволяет повысить извлечение диоксида кремния в концентрат на 30,46 % (с 33,57 % – по базовой схеме до 64,03 % – по предложенной автором схеме) и одновременно обеспечить выполнение требования по содержанию диоксида кремния, предъявляемого к концентрату, необходимые для переработки его в «белую сажу» (ГОСТ 18307-78).

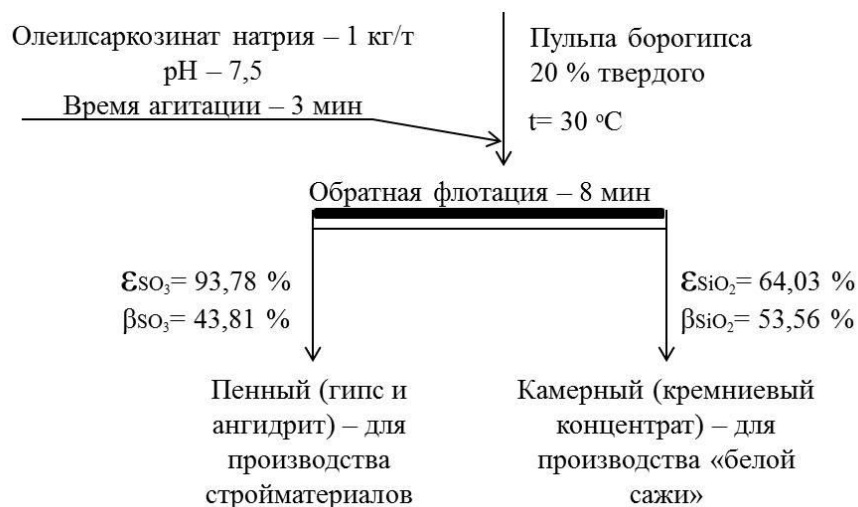


Рисунок 6 – Рекомендуемая схема флотации борогипса с применением реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия с одной стадией флотации

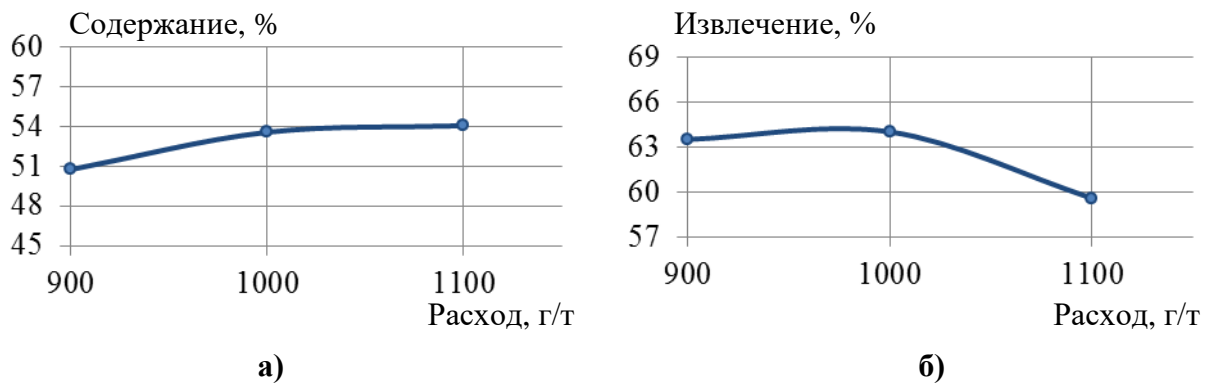


Рисунок 7 – Зависимость технологических показателей обогащения борогипса от расхода олеилсаркозината натрия: а) извлечение диоксида кремния в концентрат; б) содержание диоксида кремния в концентрате

Сравнительная оценка технологических показателей базовой схемы флотации борогипса, предложенной ООО «Дальнегорский ГОК» и разработанной автором, представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнительная оценка технологических показателей флотации борогипса

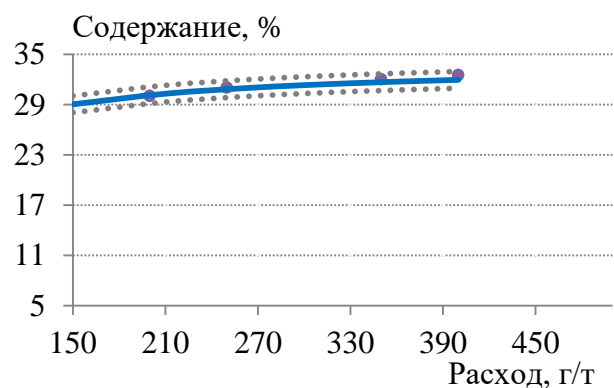
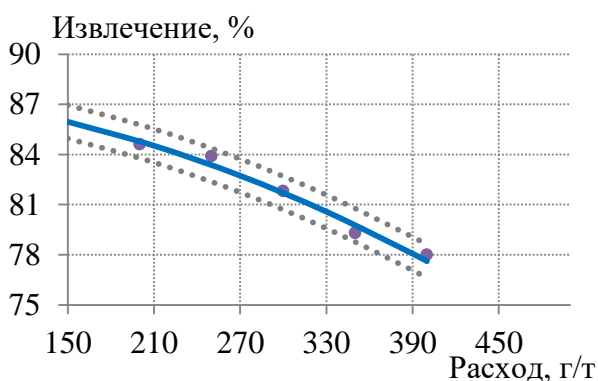
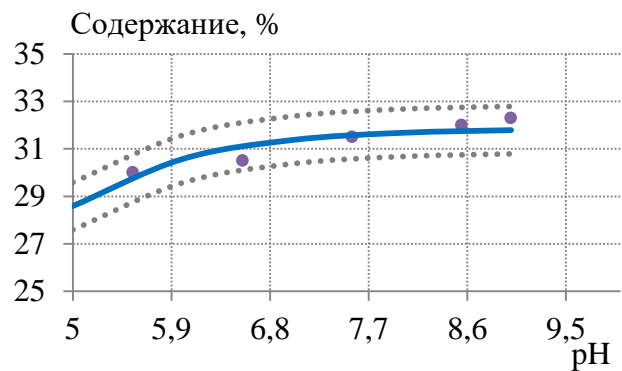
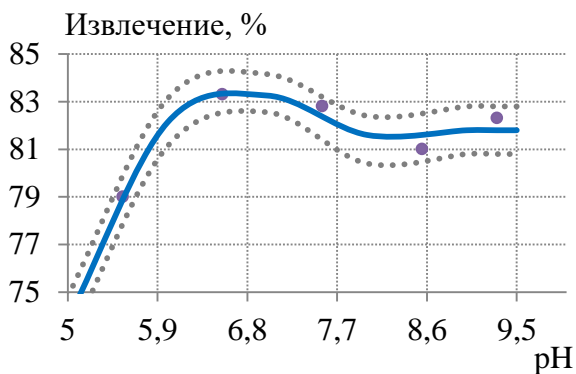
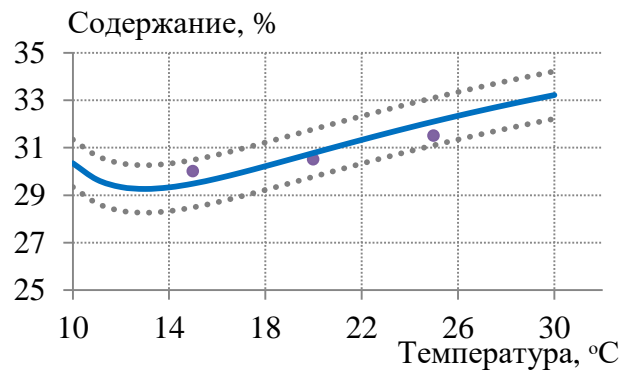
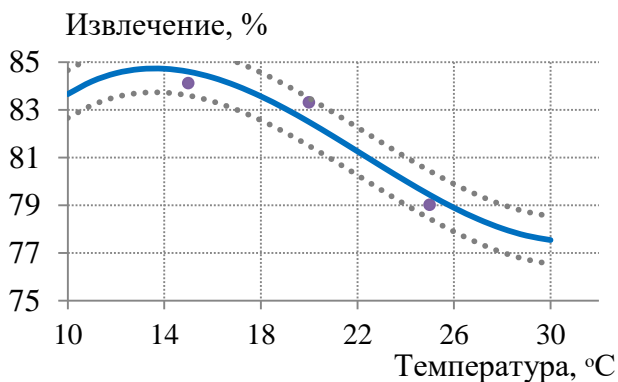
Показатель	Технологическая схема, предложенная ООО «Дальнегорский ГОК»	Технологическая схема, разработанная автором
Флотационный реагент	Жидкое мыло	Олеилсаркозинат натрия
Расход реагента, кг/т шламов борогипса	1,5	1
Регулятор среды	Сода	–
Расход регулятора среды, кг/т шламов борогипса	10	–
Температура пульпы, °С	40	30
рН	9,0	7,5
Время агитации, мин	3	3
Время основной флотации, мин	9	8
Время перечистой флотации, мин	5	нет
Выход кремниевого концентрата, %	15,11	32,50
Извлечение SiO ₂ в кремниевый концентрат, %	33,57	64,03
Содержание SiO ₂ в кремниевом концентрате, % (ГОСТ 18307-78)	60,24	53,56
Выход гипсового продукта, %	–	67,50
Извлечение SO ₃ в гипсовый продукт, %	–	93,78
Содержание SO ₃ в гипсовом продукте, % (ГОСТ 4013-82)	–	43,81

Разработанное патентно-защищенное (Патент РФ № 2723787) технологическое и аппаратурно-техническое решение по переработке борогипса рекомендовано к опытно-промышленным испытаниям на обогатительной фабрике ООО

«Дальнегорский ГОК», что позволит повысить технологичность процесса, уменьшить количество флотационных машин и реагентных питателей, снизить затраты на электроэнергию, обслуживание и ремонт оборудования, уменьшить площадь производственного цеха, получить товарные продукты (кремниевый концентрат и гипсовый продукт) широкого спектра применения, повысить коэффициент комплексности минерального сырья в 2,08 раза (с 33,75 до 70,36 %), получить чистую прибыль на предприятии в размере 55,36 млн руб. с учетом производственной мощности по сырью 388729,44 т/год.

2. Предложены уравнения множественной регрессии зависимости извлечения и содержания диоксида кремния от технологических факторов флотационного обогащения (температуры пульпы, pH, расхода реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия, времени агитации, времени флотации), полученные экспериментальным путем в лабораторных условиях, корректность которых подтверждена результатами полупромышленных испытаний.

Для предварительного определения влияния технологических факторов на показатели обогащения (содержание и извлечение диоксида кремния в концентрат) (рисунок 8) использована методика рационального планирования многофакторного эксперимента.



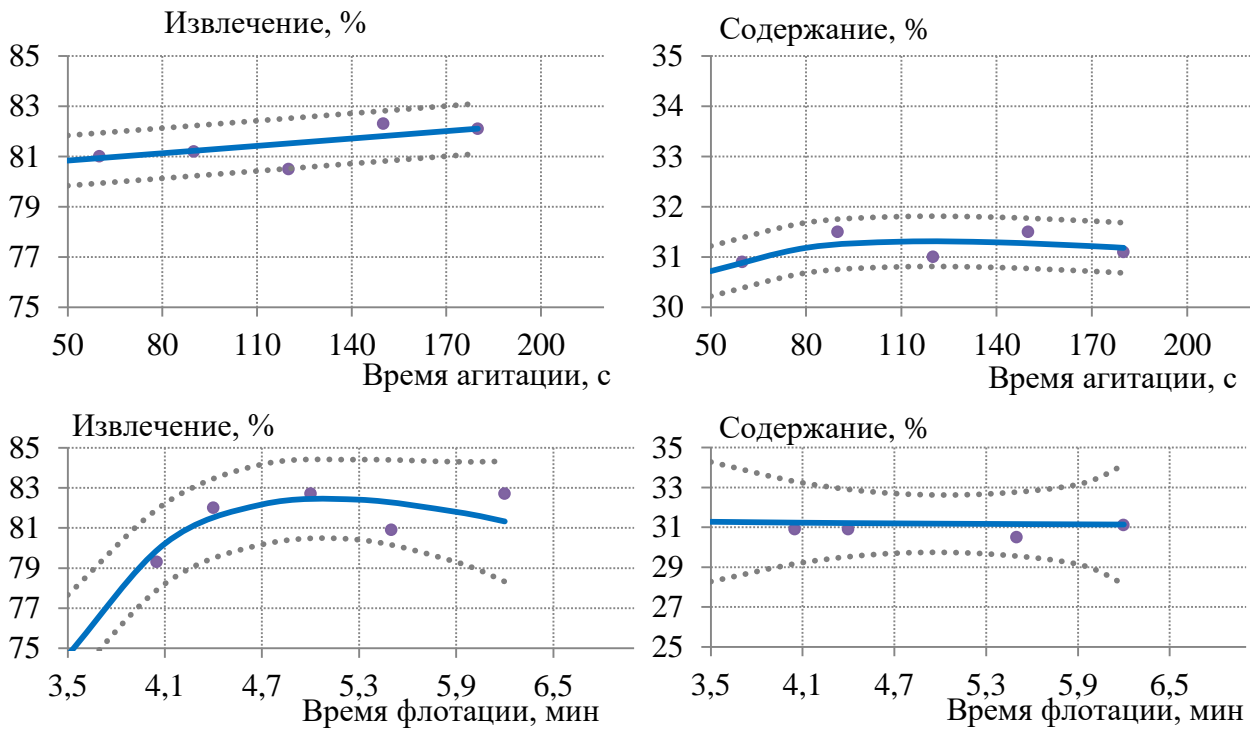


Рисунок 8 – Влияние технологических факторов флотационного обогащения на показатели извлечения и содержания диоксида кремния

Применительно к предложенной автором технологической схеме переработки борогипса данная методика позволила выявить ряд закономерностей:

1. Повышение температуры пульпы с 15 до 30 °С приводит к уменьшению извлечения диоксида кремния (с 83,66 до 77,54 %) и увеличению его содержания в кремниевом концентрате (с 30,35 до 33,22 %). Выявлено, что изменение температуры пульпы оказывает существенное влияние на флотируемость сульфатов кальция и практически не влияет на флотируемость диоксида кремния. Следовательно, изменением температуры можно регулировать процесс в зависимости от поставленной задачи. Влияние температуры пульпы на показатели обогащения объясняется природой реагента-собирателя, который подобен жирнокислотным реагентам, а также явлением мицеллообразования, происходящим в диапазоне температур от 10 до 20 °С. Закрепляясь на минеральной поверхности, мицеллы препятствуют адсорбции реагента-собирателя, оказывая отрицательное влияние на процесс флотации.

2. В отношении диапазона рН среды установлено, что оптимальные технологические показатели флотации борогипса достигнуты при рН = 7,5. Именно в нейтральной и слабощелочной средах (рН = 7,0–8,0) создаются благоприятные условия для закрепления реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия на поверхности минеральных частиц гипса и ангидрита. Установлено, что именно в слабокислой среде (рН = 5,0–6,5), вследствие изменения гидратированности частиц, возможно поверхностное вытеснение реагента-собирателя, что технологически недопустимо. Следовательно, изменение рН системы не эффективно, что является преимуществом данной технологической схемы с точки зрения отсутствия необходимости использования дополнительного реагента-регулятора среды.

3. Увеличение расхода олеилсаркозината натрия в предварительных исследованиях с 200 до 400 г/т повышает содержание диоксида кремния в камерном продукте (с 29,98 до 32,17 %), при этом значительно падает его извлечение в

концентрат (с 84,65 до 77,95 %). Это объясняется тем, что при недостаточном расходе олеилсаркозината натрия затруднен процесс пенообразования и минерализации воздушных пузырьков частицами гипса и ангидрита. При избытке олеилсаркозината натрия, наоборот, происходит бурное пенообразование и возникают механические потери диоксида кремния.

4. Время агитации линейно влияет на извлечение диоксида кремния в концентрат. Экономически нецелесообразно увеличивать время агитации олеилсаркозината натрия с минералами борогипса более 180 с (3 мин). Экспериментально установлено, что в течение 180 с (3 мин) достигается максимальное закрепление реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия на поверхности минералов борогипса.

5. Зависимости извлечения и содержания диоксида кремния от времени флотации не значимы.

По полученным данным многофакторного эксперимента сделана выборка на частные графики и математически описана каждая частная функция. В таблице 7 сводим эмпирические формулы, подобранные для описания точечных данных, и значения частных функций, рассчитанные по ним.

Таблица 7 – Частные функции по извлечению и содержанию диоксида кремния

По извлечению	По содержанию
Функция	Функция
$Y_1 = 64,188 + 3,54079X_1 - 0,18749X_1^2 + 0,00281X_1^3$	$Y_1 = 41,53732 - 318,34247/X_1 + 2064,38961/X_1^2$
$Y_2 = -246,72033 + 134,62415X_2 - 18,10733X_2^2 + 0,80078X_2^3$	$Y_2 = 1/(0,03139 + 0,53230 \exp(-X_2))$
$Y_3 = 87,96543 - 0,00588X_3 - 0,0005X_3^2$	$Y_3 = X_3 / (0,75456 + 0,02941X_3)$
$Y_4 = 80,35274 \exp(0,00012X_4)$	$Y_4 = 10^{(1,24740 + 0,23886 \lg(X_4) - 0,05745 \lg(X_4)^2)}$
$Y_5 = 45,70704 + 375,75232/X_5 - 960,51065/(X_5^2)$	$Y_5 = X_5 / (-0,00114 + 0,0323X_5)$

На основании проведенных расчетов, с учетом исключения незначимых функций (программа «Нелинейный метод наименьших квадратов (OBREXP)») подобраны компактные эмпирические функции повышенной точности извлечения (1) и содержания (2) диоксида кремния в концентрате:

$$\varepsilon = \frac{(64,2 + 3,5X_1 - 0,19X_1^2 + 0,003X_1^3)(-246,7 + 134,6X_2 - 18,1X_2^2 + 0,8X_2^3)}{(88 - 0,006X_3 - 0,0005X_3^2)(80,4 \exp(0,00012X_4))}; \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\left(41,5 - \frac{318,3}{X_1} + \frac{2064,4}{X_1^2}\right)X_3(10^{1,25 + 0,24 \log(x_4) - 0,06 \log(x_4)^2})}{31,19^3(0,03 + 0,53 \exp(-X_2))(0,75 + 0,03X_3)}, \quad (2)$$

где ε – извлечение диоксида кремния, %; β – содержание диоксида кремния, %; X_1 – температура пульпы, °С; X_2 – рН; X_3 – расход реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия, г/т; X_4 – время агитации реагента-собираателя с минералами, с.

Рассчитываем коэффициент корреляции эксперимента по извлечению. $R_{\text{общ.}} = 0,46$. Значимость $t_R = 2,64 > 2$. Функция значимая. Рассчитываем коэффициент корреляции эксперимента по содержанию. $R_{\text{общ.}} = 0,51$. Значимость $t_R = 3,04 > 2$.

Функция значимая. Значимость обобщенных функций указывает на адекватность приведенных уравнений.

Регрессивная модель квазиьютоновского метода нелинейного программирования проходила проверку по нескольким вариантам (статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии, общего качества уравнения регрессии, предпосылок для множественной регрессии).

Таким образом, выявлены основные факторы, влияющие на эффективность обогащения борогипса (температура пульпы, рН, расход реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия, время агитации и время флотации) и повышение комплексности использования минерального сырья. Экспериментально получены уравнения множественной регрессии показателей извлечения и содержания диоксида кремния в концентрате при обратной флотации борогипса с реагентом-собираателем (олеилсаркозинатом натрия), позволяющие определить рациональные режимные параметры флотации борогипса, управлять процессом и прогнозировать качество кремниевого концентрата.

3. Методами аналитических исследований подтверждена правомерность выдвинутой гипотезы механизма взаимодействия молекул олеилсаркозината натрия, имеющих неподеленную электронную пару у атома азота и валентные электроны атома кислорода карбоксильной группы, с минералами борогипса, заключающегося в адсорбции реагента-собираателя на поверхности частиц гипса и ангидрита, содержащих положительно заряженные ионы кальция.

Для исследования состава и свойств борогипса, химической адсорбции олеилсаркозината натрия на поверхности минералов продуктов флотационного обогащения, а также изучения механизма взаимодействия реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия с минералами (гипс, ангидрит, диоксид кремния) применяли ИК-спектроскопию.

На рисунке 9 представлены ИК-спектры борогипса и продуктов его переработки. На ИК-спектрах валентные колебания Si-O-Si групп в области $1093, 466 \text{ см}^{-1}$ относятся к содержанию диоксида кремния, а колебания SO_4^{2-} групп в области $1155, 665, 600 \text{ см}^{-1}$ – к содержанию гипса и ангидрита в пробах. Изменение относительной интенсивности полос поглощения, принадлежащих валентным колебаниям диоксида кремния и гипса, измеряли по отношению к интенсивности полос поглощения, принадлежащих валентным колебаниям Si-O-Si групп в области 1093 см^{-1} .

Относительная интенсивность полос поглощения (таблица 8) в областях $599\text{--}602 \text{ см}^{-1}$ и $665\text{--}671 \text{ см}^{-1}$ увеличивается в пенном продукте на 20-30 %, а в камерном уменьшается на 30–35 %. Это свидетельствуют о том, что реагент-собираатель – олеилсаркозинат натрия преимущественно адсорбируется на поверхности минералов гипса и ангидрита. В свою очередь, возрастание относительной интенсивности полос поглощения Si-O-Si групп в области $461\text{--}467 \text{ см}^{-1}$ в камерном продукте на 20 % указывает на повышение концентрации диоксида кремния в нем. А в пенном продукте в этой области относительная интенсивность полос поглощения уменьшается на 30 %. что означает реагент-собираатель – олеилсаркозинат натрия практически не адсорбируется на поверхности диоксида кремния.

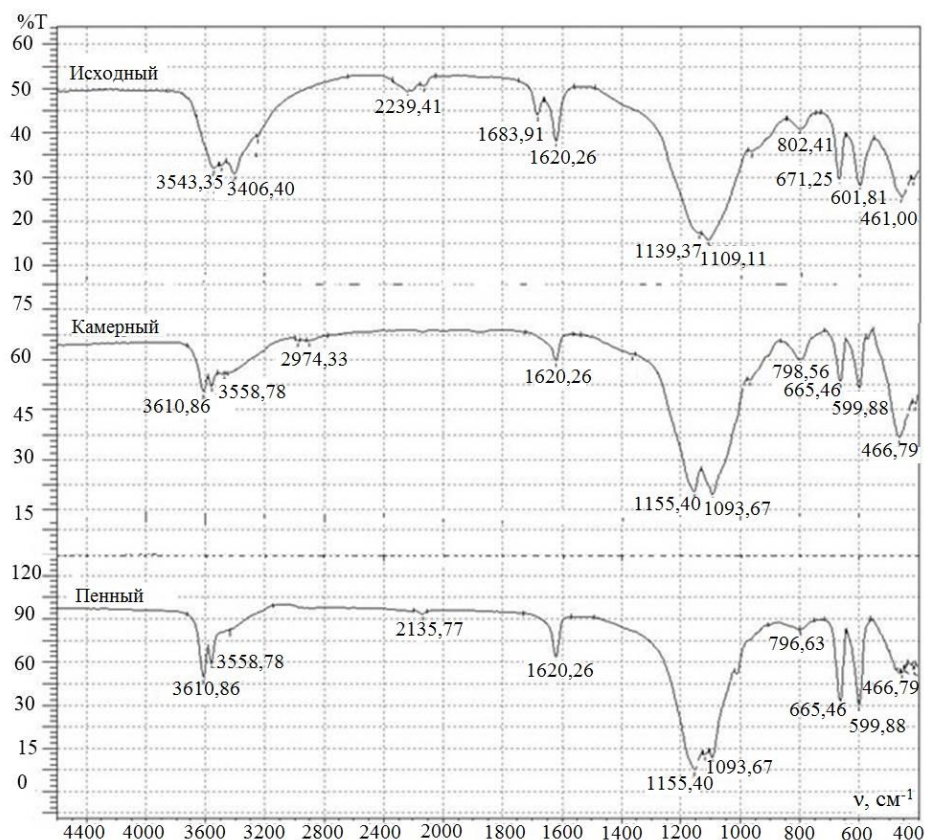


Рисунок 9 – ИК-спектры борогипса и продуктов его переработки

Таблица 8 – Результаты ИК-спектроскопии борогипса и продуктов его переработки

Продукт	Частота колебаний (ν), см^{-1}	Относительная интенсивность п.п. (I/I_0)	Изменение относительной интенсивности п.п. относительно исходного продукта, %
Исходный продукт	1139,97	0,97	—
	1109,11	1,00	—
	671,25	0,46	—
	601,81	0,49	—
	461,00	0,54	—
Камерный продукт	1155,40	0,97	—
	1093,67	1,00	—
	665,46	0,30	-34,8
	599,88	0,34	-30,6
	466,79	0,65	+20,4
Пенный продукт	1153,47	1,08	+11,3
	1093,67	1,00	—
	665,46	0,58	+26,1
	601,81	0,60	+22,4
	466,79	0,38	-29,6

За счет нахождения на поверхности борогипса положительно заряженных ионов Ca^{2+} происходит их взаимодействие с молекулами олеилсаркозината натрия, имеющими неподеленную электронную пару у атома азота и валентные электроны атома кислорода карбоксильной группы. Вследствие чего образуется соединение

частиц борогипса, богатых кальцием, с пузырьками пены и их переход в пенный продукт. Большая карбоксилатная часть молекулы ориентирована практически перпендикулярно поверхности минерала и действует как гидрофобный защитный экран.

Предполагаемое взаимодействие олеилсаркозината натрия с поверхностью минералов гипса и ангидрита представлено на рисунке 10 (а). Связь Si-O-Si малополярна, вследствие чего на поверхности частиц борогипса, богатых кремнием, не возникает взаимодействия с молекулами олеилсаркозината натрия (рисунок 10 (б)). Поэтому можно говорить о селективном взаимодействии олеилсаркозината натрия с минералами борогипса, что позволяет эффективно их разделять.

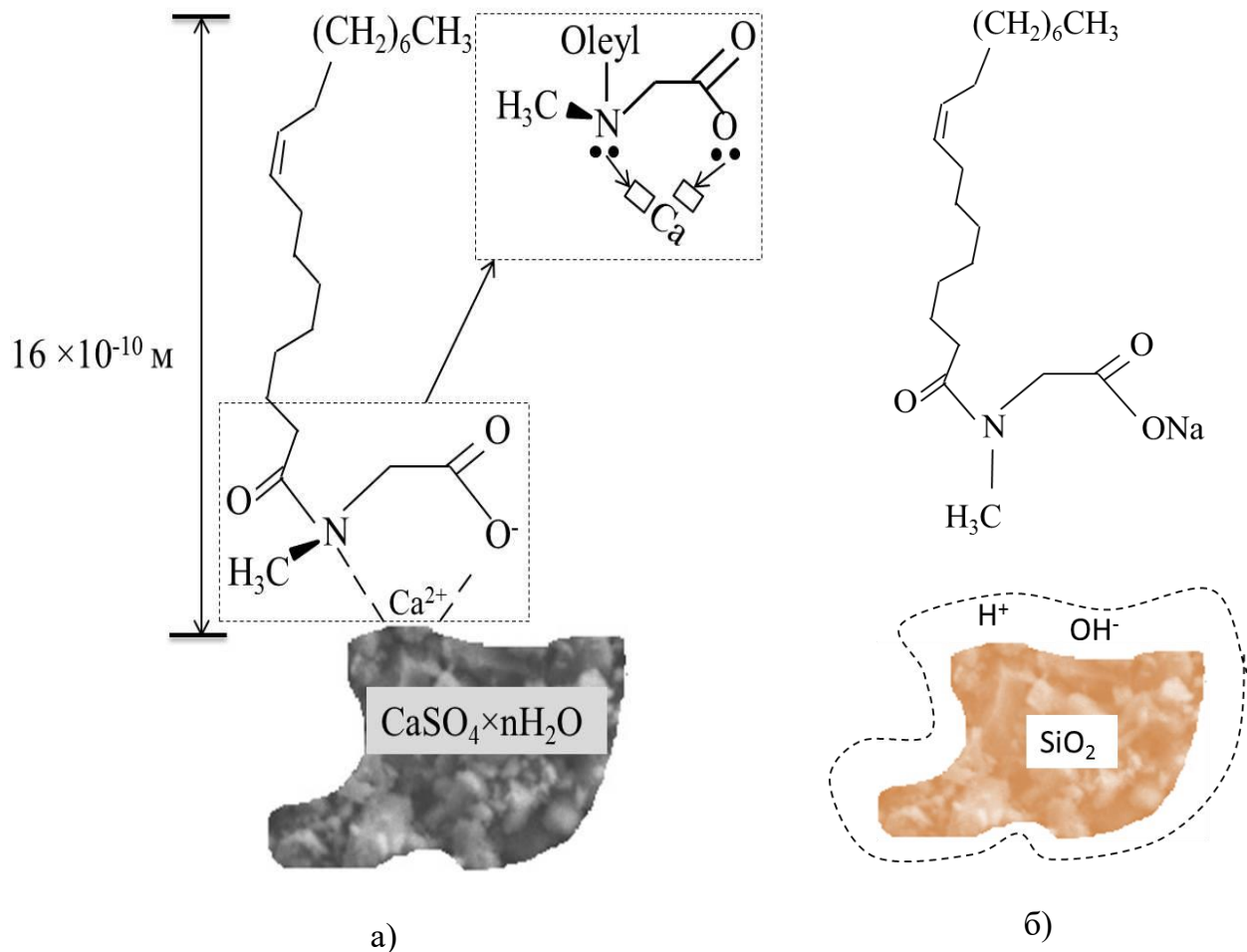
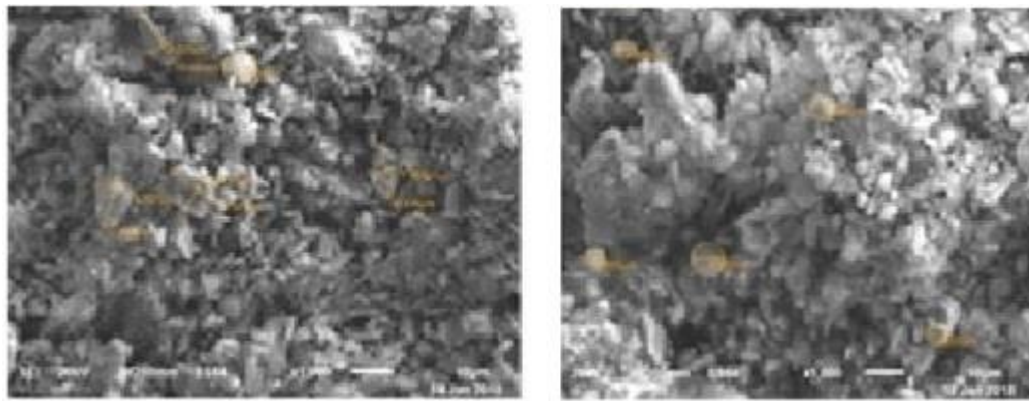


Рисунок 10 – Схема взаимодействия олеилсаркозината натрия с минералами борогипса: а) гипс, $n = 2$; ангидрит, $n = 0$; б) аморфный кремнезем

Сложный рельеф микроповерхности, образованный кристаллами и агрегатами в виде тонкодисперсной массы, характерен как для исходного продукта (рисунок 2), так и для продуктов его переработки (рисунок 11).



а)

б)

Рисунок 11 – Микрофотографии РЭМ продуктов переработки борогипса: а) пенный продукт; б) камерный продукт

Минимальный и максимальный диаметры Ферета агрегатов (контуры частиц) представлены на рисунке 12.

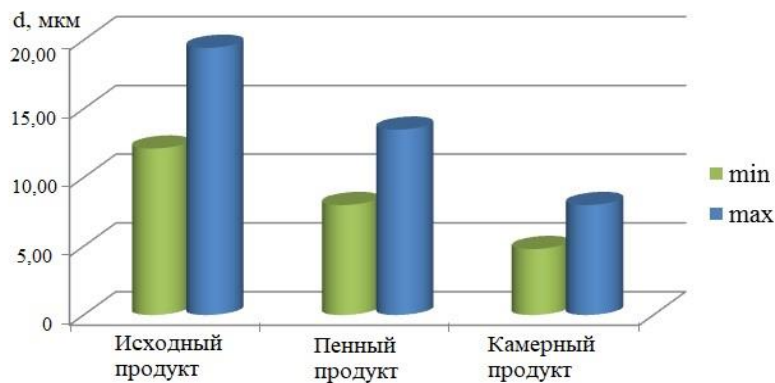


Рисунок 12 – Значения минимального и максимального диаметров Ферета агрегатов частиц борогипса и продуктов его обогащения по результатам РЭМ

Растровой электронной микроскопией продуктов обогащения борогипса выявлено:

1) в пенном продукте минимальный диаметр Ферета уменьшается в 1,54 раза (с $d_{Fmin} = 12,108$ мкм до $d_{Fmin} = 7,864$ мкм), а максимальный – в 1,44 раза (с $d_{Fmax} = 19,437$ мкм до $d_{Fmax} = 13,485$ мкм);

2) в камерном продукте минимальный диаметр Ферета уменьшается в 2,52 раза (с $d_{Fmin} = 12,108$ мкм до $d_{Fmin} = 4,800$ мкм), а максимальный – в 2,86 раза (с $d_{Fmax} = 19,437$ мкм до $d_{Fmax} = 6,800$ мкм).

Приведенные значения диаметров Ферета позволяют отнести пенный продукт, как и исходный, к среднепылеватому, а камерный – к мелкопылеватому грунту по ГОСТ Р ИСО 14688-1-2017.

Элементный состав борогипса и продуктов его переработки по результатам растровой электронной микроскопии приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Элементный состав борогипса и продуктов его переработки по результатам РЭМ

Образец	Элементный состав, %												
	Si	S	Ca	O	B	Fe	Al	Mg	Mn	Na	K	Ti	H
Исходный продукт	9,06	7,88	12,60	61,14	0,42	1,23	0,26	0,14	0,12	0,15	0,06	0,01	6,93
Пенный продукт	4,83	10,95	15,88	62,51	0,27	0,73	0,12	0,07	0,06	0,13	0,03	0,01	4,41
Камерный продукт	17,85	3,75	7,94	62,36	0,58	2,08	0,43	0,30	0,25	0,22	0,10	0,03	4,11

Анализ результатов исследований показал, что большая часть кальция и серы при флотации перешли в пенный продукт с незначительным количеством кремния. Полученные данные согласуются с результатами ИК-спектроскопии.

На рисунке 13 представлены спектры рентгеновских лучей борогипса и продуктов его переработки, по которым определён минеральный состав исследуемых образцов.

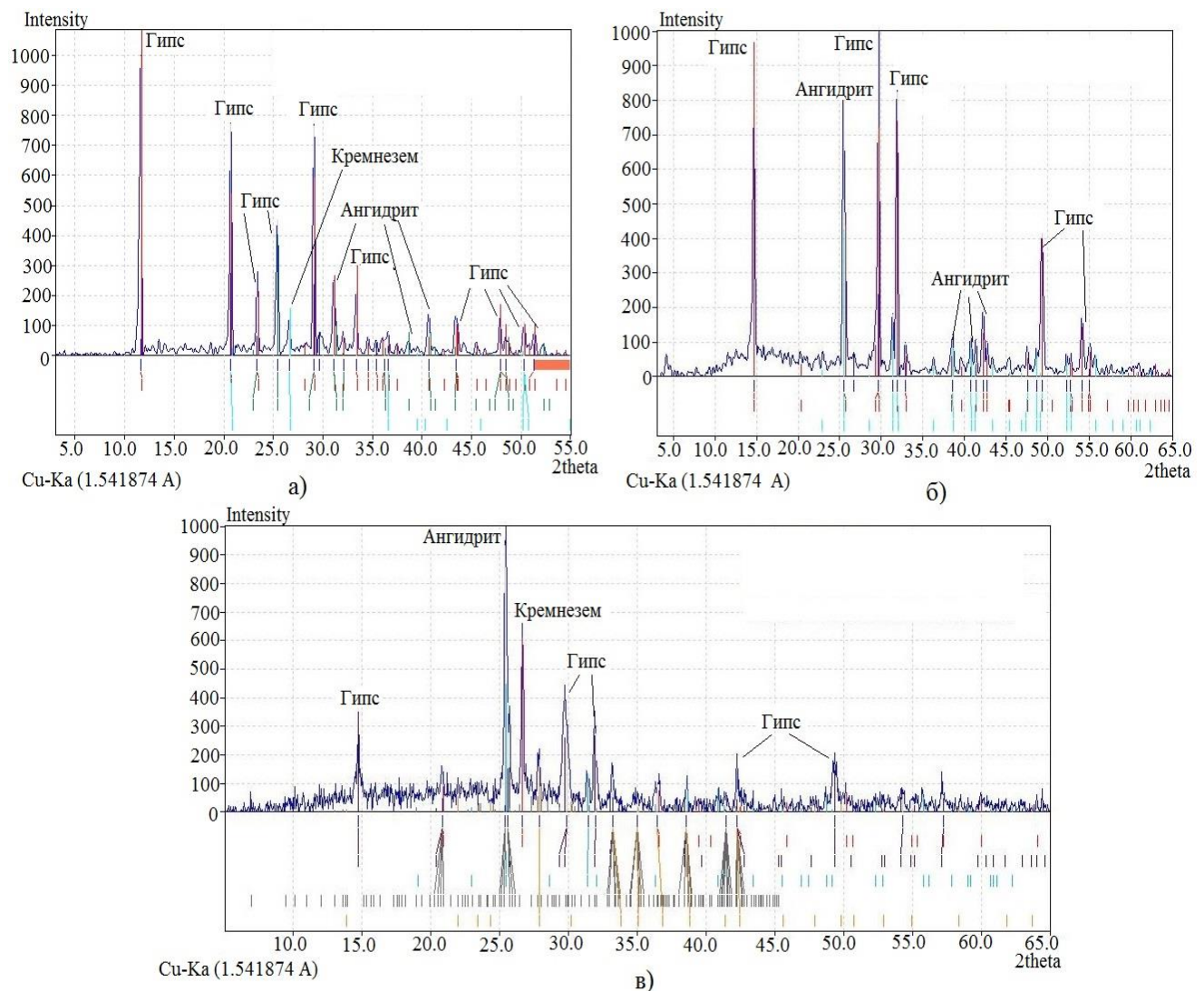


Рисунок 13 – Минеральный состав борогипса и продуктов его переработки по результатам РФА: а) исходный продукт; б) пенный продукт; в) камерный продукт

В пенном продукте дифракционные отражения, присущие гипсу (15, 30, 33 2 Θ) и ангидриту (26, 39, 40, 42 2 Θ), более интенсивны, чем в борогипсе. На спектре камерного продукта видно, что дифракционные отражения, присущие гипсу (15, 30 2 Θ) и ангидриту (26 2 Θ), менее интенсивны, чем на спектре борогипса, а дифракционные отражения, присущие кремнезему (27 2 Θ), более интенсивны. Данные РФА согласуются с данными ИК-спектроскопии и подтверждают вывод о селективном взаимодействии олеилсаркозината натрия с минералами борогипса.

Таким образом, комплексом современных физико-химических методов исследования подтверждена правомерность выдвинутой гипотезы механизма взаимодействия молекул олеилсаркозината натрия, имеющих неподеленную электронную пару у атома азота и валентные электроны атома кислорода карбоксильной группы, с минералами борогипса, заключающегося в адсорбции реагента-собираателя на поверхности частиц гипса и ангидрита, содержащих положительно заряженные ионы кальция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложено новое научно обоснованное решение актуальной научной задачи для повышения технологических показателей обогащения отходов производства борной кислоты с целью комплексного использования борных руд, имеющей существенное значение для развития горноперерабатывающей отрасли страны.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований сделаны следующие основные выводы:

1. Экспериментально изучено влияние девяти альтернативных реагентов-собираателей (олеилсаркозинат натрия, олеилсаркозин, ФЛОН-1 (катионное ПАВ – ацетат первичных аминов кокосовой фракции в изопропиловом спирте), жидкое мыло, техническая нафтеновая кислота, олеиновая кислота, растительное кислое масло, олеин, линолевая кислота) на технологические показатели процесса флотации борогипса (отходов производства борной кислоты). Осуществлён выбор эффективного реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия, обладающего пенообразующими и смачивающими свойствами, открывающего возможность получения двух товарных продуктов: гипсового с широким спектром практического применения и кремниевого – для производства «белой сажи».

2. Обоснован выбор метода извлечения (обратная флотация) минералов диоксида кремния из отходов производства борной кислоты. Выявлены закономерности влияния реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия на показатели обогащения борогипса.

3. Установлены закономерности взаимосвязи извлечения и содержания диоксида кремния при флотации борогипса с использованием реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия от технологических факторов: температура пульпы, рН, расход реагента-собираателя, время агитации, время обратной флотации.

4. Экспериментально доказано, что применение реагента-собираателя – олеилсаркозината натрия при обратной флотации борогипса позволило эффективно разделить минералы диоксида кремния, гипса и ангидрита, отказаться от применения реагента регулятора среды, уменьшить температуру пульпы в 1,33 раза (с 40 до 30 °С), сократить время флотации в 1,75 раза (с 14 до 8 мин), снизить расход реагента-собираателя в 1,5 раза (с 1,5 до 1 кг/т), увеличить извлечение диоксида кремния в

концентрат на 30,46% (с 33,57 по 64,03 %) по сравнению с базовой технологией, предлагаемой ООО «Дальнегорский ГОК».

5. Установлены рациональные режимные параметры флотационного обогащения отходов производства борной кислоты – борогипса: расход реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия – 1 кг/т, температура пульпы – 30 °С, рН – 7.5, время агитации – 3 мин, время основной флотации – 8 мин, что позволило в 2,15 раза увеличить выход кремниевого концентрата (с 15,11 до 32,50 %), дополнительно извлечь в пенный продукт гипс и ангидрит (широкого спектра применения).

6. Экспериментально получены уравнения множественной регрессии показателей извлечения и содержания диоксида кремния в концентрате при обратной флотации борогипса с реагентом-собирателем (олеилсаркозинатом натрия), позволяющие определить рациональные режимные параметры флотации борогипса, управлять процессом и прогнозировать качество кремниевого концентрата.

7. Подтверждена правомерность гипотезы механизма взаимодействия молекул олеилсаркозината натрия, имеющих неподеленную электронную пару у атома азота и валентные электроны атома кислорода карбоксильной группы, с минералами борогипса, заключающегося в адсорбции реагента-собирателя на поверхности частиц гипса и ангидрита, содержащих положительно заряженные ионы кальция.

8. Разработанное новое технологическое решение переработки борогипса, с применением реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия, позволит снизить затраты по размещению отходов производства на 1,77 млн руб./год, уменьшить площади нарушенных земель в 1,3 раза (с 950 до 744 га), повысить коэффициент комплексности использования минерального сырья в 2,08 раза (с 33,75 до 70,36 %) и улучшить экологическую обстановку в регионе.

9. Технологическое решение, разработанное автором, защищено патентом РФ 2723787 «Способ переработки гипсосодержащих отходов производства борной кислоты».

10. Реагент-собиратель – олеилсаркозинат натрия рекомендован к опытно-промышленным испытаниям на обогатительной фабрике ООО «Дальнегорский ГОК» при технологическом переделе борогипса. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Обогащение полезных ископаемых и вторичного сырья» при проведении лабораторных занятий по курсу учебной дисциплины «Флотационные методы обогащения» специальности 21.05.04 «Горное дело» (специализация «Обогащение полезных ископаемых»).

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Патеюк, С. А.** Перспективы Забайкальских недр на борное сырье / С. А. Патеюк, А. Н. Хатькова, Н. Н. Бурнашова // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2016. – № 4. – С. 22–28.

2. Хатькова, А. Н. Исследование флотиремости борогипса перластаном / А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина, **С. А. Патеюк** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11. – С. 160–171.

3. Хатькова, А. Н. Борогипс: минеральный состав, технологии переработки / А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина, **С. А. Патеюк**, В. Г. Черкасов // Вестник геонаук. – 2020. – № 3. – С. 22–27.

Статьи, опубликованные в научных изданиях, цитируемых в Scopus:

4. Khatkova, A. L. Use of borogypsum as secondary raw / A. Khatkova, L. Nikitina, **S. Pateyuk** // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (23–27 September 2019). – Belgorod, 2019. – P. 90–93.

Публикации в материалах научных конференций и совещаний:

5. **Патеюк, С. А.** Выделение кремниевого концентрата из отходов производства борной кислоты / С. А. Патеюк, А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина. – Текст: непосредственный // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XVII Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.: в 3 ч. – Чита: ЗабГУ, 2017. – Ч. 1. – С. 165–169.

6. **Патеюк, С. А.** Разработка технологии флотационного выделения кремниевого концентрата из отходов производства борной кислоты / С. А. Патеюк, А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина. – Текст: непосредственный // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Междунар. науч. конф. (Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 408–411.

7. **Патеюк, С. А.** Способ переработки отходов производства борной кислоты для выделения кремниевого концентрата / С. А. Патеюк, А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина. – Текст: непосредственный // Наука в России: перспективные исследования и разработки: сборник материалов I Всерос. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2017 – С. 342–345.

8. **Патеюк, С. А.** Переработка отходов производства борной кислоты / С. А. Патеюк. – Текст: непосредственный // Молодежная научная весна: материалы XLV науч.-практ. конф. молодых исследователей ЗабГУ: в 4 ч. – Чита: ЗабГУ, 2018. – С. 181–184.

9. **Патеюк С. А.** Изучение процесса флотации борогипса / С. А. Патеюк, А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина. – Текст: непосредственный // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XVIII Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.: в 3 ч. – Чита: ЗабГУ, 2018. – Ч. 2. – С. 136–139.

10. **Патеюк, С. А.** Исследование флотуемости борогипса перластаном / С. А. Патеюк, А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина. – Текст: непосредственный // Новые классы флотационных реагентов и современные методы оценки их адсорбции на микро- и наночастицах минералов (Плаксинские чтения – 2018): материалы международ. симпозиума в рамках в рамках XXIX Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых (Москва, 15–21 сентября 2018 г.). – Москва, 2018. – С. 54–57.

11. **Патеюк, С. А.** Технология переработки отходов производства борной кислоты / С. А. Патеюк, А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина. – Текст: непосредственный // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): материалы международного совещания (Иркутск, 9–14 сентября 2019 г.). – Иркутск: Изд-во ООО «Репроцентр А1», 2019. – С. 221–224.

12. Хатькова, А. Н. Экспериментальное определение оптимальных технологических параметров флотационного обогащения отходов выщелачивания датолитовых концентратов / А. Н. Хатькова, Л. В. Шумилова, **С. А. Патеюк**. – Текст: непосредственный // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2021):

материалы международной конференции (Владикавказ, 4–8 октября 2021 г.). – Владикавказ: Изд-во СКГМИ (ГТУ), 2021. – С. 502–504.

Патент

13. Пат. 2723787 Российская Федерация, МПК В03D 1/02, В03В 9/06. Способ переработки гипсосодержащих отходов производства борной кислоты: – № 2019139135: заявл. 29.11.2019; опубл. 17.06.2020, Бюл. № 17 / **Патеюк С. А.**, Хатькова А. Н., Никитина Л. Г.; патентообладатель Забайкальский государственный университет (ФГБОУ ВО «ЗабГУ»). – 10 с. – Текст: непосредственный.

Подписано в печать 10.03.2022.
Форм. бум. 60*90/16. Бумага ксерографическая.
Способ печати оперативный. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 3,0. Уч.-изд.л.2,6.
Заказ № __. Тираж 80 экз.

ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
672039, г. Чита. ул. Александрo-Заводская, 30