

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной
безопасности

УДК 661.17 (575.3)

ББК 24.12 (2 точик)

Б.24

На правах рукописи



БАРОТОВ БАХТИЁР БУРХОНОВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРЕРАБОТКИ
УРАНСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МЕСТНЫХ СЫРЬЕВЫХ
МАТЕРИАЛОВ ТАДЖИКИСТАНА**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

доктора технических наук по специальности

05.17.00 – Химическая технология

(05.17.01 – Технология неорганических веществ)

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор
Мирсаидзода Илхом

Душанбе – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Перечень сокращений и (или) условных обозначений.....	7
ВВЕДЕНИЕ	8
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	13
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ УРАНА ИЗ РУД И ДРУГИХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ (краткий литературный обзор).....	21
1.1. Переработка урансодержащих материалов	21
1.1.1. Урановые минералы	21
1.1.2. Переработка урановых руд.....	25
1.1.3. Способы переработки урановых руд.....	32
1.2. Сырьевая база урана в Центральной Азии	43
1.3. Состояние мировой ядерной энергетики.....	47
1.4. Радиоактивные отходы Таджикистана: проблемы и решения.....	50
1.4.1. Радиоактивные хвостохранилища Таджикистана.....	50
1.4.2. Радиоактивные почвы Таджикистана	55
1.4.3. Радиоактивные урансодержащие воды Таджикистана	57
1.4.4. Очистка урансодержащих вод Таджикистана	60
1.5. Переработка урановых руд на примере месторождений Таджики- стана.....	64
1.6. Некоторые технологические аспекты переработки урановых руд...	72
1.7. Заключение по литературному обзору и задачи настоящей ра- боты.....	76
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УРАНОВЫХ РУД ТАДЖИКИСТАНА.....	78
2.1. Методика экспериментов, техника работы с радиоактивными ве- ществами	78
2.2. Химический и минералогический состав урановых руд.....	80

2.2.1. Химический и минералогический состав урановых руд месторождения "Танзим"	80
2.2.2. Минералогический анализ проб месторождения "Центральный Таджикистан"	86
2.2.3. Месторождение «Западный Таджикистан»	101
2.2.4. Месторождение "Восточный Памир"	103
2.3. Дифференциальный термический анализ руд	105
2.4. Рентгенофазовый анализ руд	111
2.4.1. Месторождение "Танзим"	111
2.4.2. Месторождение "Центральный Таджикистан"	112
2.4.3. Месторождение "Западный Таджикистан"	115
2.4.4. Месторождение "Восточный Памир"	116
2.4.5. Рентгенофазовый анализ ураносодержащей руды месторождения "Северный Таджикистан - 2"	117
2.5. Термодинамическая оценка протекания реакций минералов руд...	119
2.5.1. Термодинамический анализ протекающих процессов при сернокислотном выщелачивании руд месторождений "Западный Таджикистан" и "Центральный Таджикистан"	119
2.5.2. Термодинамический анализ протекающих процессов при разложении ураносодержащих руд серной кислотой	124
2.5.3. Термодинамический анализ процессов при сернокислотном выщелачивании руд месторождения "Танзим"	128
2.5.4. Термодинамический анализ химических процессов при кислот- ном разложении урансодержащей руды месторождения "Восточный Памир"	132
2.6. Материальный баланс переработки руд	136
2.6.1. Расчёт материального баланса сернокислотного разложения руды месторождения "Северный Таджикистан - 2"	136
2.6.2. Расчёт материального баланса сернокислотного разложения руды месторождения "Танзим"	138

2.7. Химический и минералогический состав радиоактивных отходов Таджикистана.....	139
2.7.1. Хвостохранилище «Карты 1-9»	139
2.7.2. Хвостохранилище Гафуров.....	142
2.7.3. Хвостохранилище Истиклол (Табошар).....	145
2.8. Термодинамическая оценка радиоактивных отходов	150
2.8.1. Термодинамическая оценка сернокислотного выщелачивания отходов хвостохранилища "Карты 1-9"	150
2.9. Материальный баланс переработки ураносодержащих отходов....	153
2.9.1. Расчёт материального баланса разложения отходов хвостохранилища "Карты 1-9" сернокислотным методом.....	153
2.9.2. Экономический расчёт переработки отвалов урановой промышленности.....	156
2.10. Заключение по главе 2.....	160
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНОВЫХ РУД И УРАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ТАДЖИКИСТАНА...	162
3.1. Особенности выщелачивания урановых руд месторождения «Танзим».....	162
3.1.1. Сернокислотное выщелачивание урановой руды месторождения «Танзим».....	162
3.1.2. Карбонатное выщелачивание урановых руд месторождения «Танзим»	181
3.2. Извлечение урана из руд месторождения "Центральный Таджикистан" методом выщелачивания серной кислотой.....	187
3.2.1. Кинетика процесса выщелачивания ураносодержащих руд месторождения "Центральный Таджикистан".....	194
3.3. Физико-химические основы переработки ураносодержащих руд месторождения «Западный Таджикистан».....	204
3.4. Физико-химические основы сернокислотного разложения ураносодержащей руды месторождения «Северный Таджикистан - 2».....	212

3.4.1. Кинетика сернокислотного разложения ураносодержащей руды месторождения «Северный Таджикистан - 2».....	218
3.5. Технология переработки ураносодержащих руд месторождения “Восточный Памир”.....	225
3.6. Сернокислотное выщелачивание хвостов из техногенного хвостохранилища «Карты 1-9».....	230
3.7. Получение уранового концентрата из отходов урановых хвостохранилищ города Истиклол.....	236
3.8. Заключение по главе 3.....	241
ГЛАВА 4. СОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ УРАНА ИЗ РАСТВОРОВ И УРАНСОДЕРЖАЩИХ ВОД ТАДЖИКИСТАНА.....	245
4.1. Сорбция урана из раствора выщелачивания руды с использованием сорбента типа АМ(п).....	245
4.2. Сорбция урана из растворов термически обработанным углем	248
4.3. Сорбция урана из растворов при помощи микрогеля.....	257
4.4. Некоторые методы извлечения урана из природных ураносодержащих вод сложного солевого состава.....	260
4.4.1. Технология извлечения урана из рассола с высоким содержанием ионов хлора.....	263
4.5. Закономерности сорбции урана из шахтных и дренажных вод.....	268
4.6. Исследование сорбционных характеристик скорлупы косточек абрикоса.....	274
4.7. Заключение по главе 4.....	288
ГЛАВА 5. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРОИЗВОДСТВ УРАНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ИЗ РУД.....	291
5.1. Исследование радиологической ситуации уранового хвостохранилища Дегмай Республики Таджикистан.....	291

5.2. Радиологической мониторинг хвостохранилища Дегмай Республики Таджикистан с определением мощности амбиентного эквивалента дозы и тяжёлых металлов в почве и воде.....	298
5.3. Исследование радиологической ситуации урановых отходов г. Истиклол Республики Таджикистан.....	306
5.4. Заключение по главе 5.....	315
ГЛАВА 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	317
6.1. Обсуждение перспективы переработки новых урансодержащих руд Таджикистана	317
6.2. Возможности вторичной переработки урансодержащих отходов	323
6.3. Экологические аспекты производства урановых концентратов	330
ВЫВОДЫ	334
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ.	
ЛИТЕРАТУРА	338
Список научных публикаций соискателя ученой степени по теме диссертации.....	371
ПРИЛОЖЕНИЕ	382

Перечень сокращений и (или) условных обозначений

МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
АХБРЯБ НАНТ	Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана
РФП	Радиационный фон помещения
ИИ	Ионизирующее излучение
ИИИ	Источники ионизирующего излучения
НРБ	Нормы радиационной безопасности
РРА	Радиометр радона
МАЭД	Мощность амбиента эквивалента дозы
ОА радона	Объемная активность радона
ЭРОА радона	Эквивалентная равновесная объемная активность радона
ППР	Плотность потока радона
МКРЗ	Международная комиссия по радиационной защите
ДПР	Дочерние продукты распада
РОФ	Радиометрическая обогатительная фабрика
РКС	Рудосортировочная контрольная станция
ФБР	Фабрика бедных руд
ГУП	Государственное унитарное предприятие
КНТ	Колонна напорного типа
АМп	Сорбент анионит пористый
ДВО РАН	Дальневосточное отделение Российской академии наук
РФА	Рентгенофазовый анализ
ДТА	Дифференциальный термический анализ
ГМЗ	Гидрометаллургический завод
Т	Температура

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие уранодобывающей промышленности в Таджикистане имеет свою уникальную историю. В советский период переработка урановых руд в Таджикистане была одной из ведущих отраслей. С 1945 года урановая промышленность развивалась стремительными темпами, и машиностроение сыграло ключевую роль в обеспечении атомной энергетики концентратами в форме желтого кека.

Как известно, процесс добычи и переработки урановых руд играет важнейшую роль в обеспечении стабильной работы ядерной энергетики.

В Таджикистане деятельность, связанная с добычей урана, представлена гидрометаллургическим заводом (ГМЗ), функционирующим в рамках государственного унитарного предприятия «Таджикские редкоземельные металлы». Активное развитие атомной энергетики создает необходимость регулярного поиска новых месторождений урановых руд, а также совершенствования технологий их переработки и внедрения передовых методов обогащения, включая обработку малосодержательных руд и отходов урановой индустрии. Существенным компонентом данных технологических процессов является подбор высокоэффективных сорбентов для урана, а также вторичная переработка урановых отходов. Кроме того, значительный интерес представляет очистка урансодержащих вод с использованием различных местных сорбентов.

Урановая промышленность также требует одновременного решения радиэкологических задач.

Гидрометаллургический завод на данный момент приостановил свою деятельность из-за отсутствия перспективных месторождений урана. Однако восстановление работы ГУП «Гаджредмет» могло бы стать значимым фактором для экономического развития страны, обеспечивая весомый вклад в государственную экономику.

В этом контексте особую важность приобретает внедрение современных методов переработки урановых руд и отходов после деятельности урановых

производств, извлечение урана из технологических вод, а также комплексное решение радиоэкологических проблем остаются актуальными задачами. Для их реализации необходимо проведение масштабных научно-исследовательских проектов, направленных на совершенствование технологий в данной области.

В период работы комбината №6, ныне известного как ГУП «Таджредмет», на территории Таджикской ССР сформировались значительные накопления радиоактивных отходов, включая отвалы и хвостохранилища. Их негативное влияние на окружающую среду требует оперативных и комплексных решений в области обращения с промышленными отходами. Во многих случаях эти объекты расположены в непосредственной близости к жилым зонам и важным водным ресурсам.

Отсутствие эффективных защитных барьеров на большинстве хвостохранилищ способствует загрязнению почвы, водоемов и воздуха, создавая экологические риски и угрозы для здоровья населения. Для минимизации этого вредного воздействия необходимо разрабатывать и внедрять инновационные методы вторичной переработки отходов, возникших в процессе добычи и переработки урана.

Использование современных технологий обработки позволит значительно снизить экологическую нагрузку, повысить уровень безопасности окружающей среды и обеспечить рациональное управление радиоактивными материалами, сохраняя природный баланс региона.

Научно-аналитические исследования, выполняемые Агентством по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, направлены на разработку результативных методик извлечения уранового концентрата из сырьевых материалов, содержащих этот элемент. Значимой частью исследования остаётся комплексный анализ целесообразности переработки устаревших отвалов, поскольку данный процесс охватывает не только выделение полезных компонентов, но и обеспе-

чение безопасного извлечения урана из накопленных отходов хвостохранилищ.

Особую значимость представляет исследование и извлечение урановых концентратов из отходов хвостохранилищ Таджикистана. При внедрении передовых технологий и использовании методов сорбции возможно получение уранового концентрата в виде его оксида (U_3O_8). Соответственно, на территории страны накопился значительный объём уранового наследия, оставшегося со времен СССР, что открывает широкие перспективы для проведения научных исследований.

Урановое наследие, оставшееся после советской деятельности, является очень разнообразным и значительным, представляет собой сложный и обширный массив, включающий забалансовые руды, отвалы урановых производств, а также шахтные и дренажные воды. Их присутствие требует незамедлительных мер по снижению экологических рисков и предотвращению негативного влияния на окружающую среду. Кроме того, наличие определённых запасов урановых руд на территории Таджикистана делает особенно актуальным поиск эффективных технологических решений для их переработки.

Проблема хвостохранилищ остаётся недостаточно изученной. Поэтому важное значение имеет научная разработка методов их исследования, а также перспективной задачей является переработка урансодержащих руд месторождений Северного, Центрального, Западного Таджикистана и Северного Таджикистана, которые до настоящего времени практически не изучены.

Анализ экономической эффективности и возможности переработки урансодержащих руд из новых залежей требует глубокой проработки. Эффективная добыча урана должна сочетаться с созданием надёжных и безопасных условий освоения месторождений, что особенно важно для снижения возможного воздействия на окружающую среду и предотвращения технических осложнений.

Важной областью научных изысканий выступает внедрение разнообраз-

ных технологий извлечения урана как из минерального сырья, так и из техногенных отходов, в том числе с использованием местных сорбентов, обладающих высокой селективностью. Эти технологии позволяют повысить эффективность переработки сырья и снизить негативное влияние на окружающую среду.

Данное диссертационное исследование посвящено обобщению и анализу результатов комплексных исследований, ориентированных на усовершенствование технологий переработки ураносодержащих материалов. В числе приоритетных направлений:

- детальное изучение химсостава и минералогических особенностей урановых материалов и отходов, образованных после переработки этих материалов;

- исследование физико-химических свойств руд ураносодержащих месторождений, как: "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан - 2" и "Восточный Памир". Использование для этих целей РФА и ДТА методы;

- термодинамическое моделирование процессов разрушения урановых руд с целью оптимизации их переработки и извлечения полезных компонентов;

- разработка инновационных подходов к утилизации отходов уранодобывающей промышленности, включая хвостохранилища, расположенные на территории Таджикистана;

- комплексное изучение физических и химических свойств руд, добываемых на месторождениях "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан - 2" и "Восточный Памир" с созданием усовершенствованных технологических процессов извлечения из них урана в виде концентрата;

- анализ кинетических характеристик разложения урановых руд указанных месторождений;

- разработка высокоэффективных процессов к извлечению урановых соединений из солевых озёрных растворов, производственных жидкостей и дренажных стоков, формирующихся в зонах хранения хвостов.

Степень научной разработанности изучаемой определяется масштабом исследований, проводимых Агентством по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана. В центре внимания - изучение физических и химических принципов переработки урановых руд, добываемых на местных месторождениях, кроме того, особое внимание уделяется разработке действенных стратегий по переработке и утилизации отходов, образующихся в уранодобывающей промышленности, включая супесчаные отложения, а также производственные жидкости (шахтные стоки) и дренажные стоки. К числу приоритетных задач относится извлечение концентрата триоксида урана (U_3O_8), обладающего высокой коммерческой значимостью.

В настоящее время ведутся активные работы по созданию и совершенствованию технологий уранодобычи, среди которых наибольший потенциал демонстрируют методы, основанные на использовании серной кислоты и щелочных реагентов. Сернокислотный способ демонстрирует высокую эффективность при обработке урановых залежей месторождений "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан - 2" и "Восточный Памир", а также позволяет изучать механизмы кислотного разложения пород.

Сырьевые ресурсы для уранодобывающей и ураноперерабатывающей отрасли Таджикистана отличаются значительным потенциалом. Однако, учитывая сложные условия горного рельефа, применение методов подземного и кучного выщелачивания представляет определённые трудности. В качестве альтернативного решения рассматривается использование гидрометаллургических технологий переработки урановых руд.

Урановые руды, которые добываются в республике, имеют высокий потенциал для получения урановых концентратов. Для их обработки разработаны оптимизированные технологические схемы, учитывающие специфику местных сырьевых ресурсов.

Связь исследования с программами (проектами), научной тематикой. Данное диссертационное исследование выполнено в рамках научных программ Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной Академии наук Таджикистана на тему: "Физико-химические основы выделения урановых концентратов из руд и отходов" (2020-2024 гг. ГР №0120 TJ01030), "Физико-химические основы извлечения урана из руд и урансодержащих шахтных и технических вод" (2015-2019 гг. ГР №0115 TJ 00470) и "Изыскание технологических основ переработки урансодержащих руд и отходов урановой промышленности" (2010-2014 гг. ГР №102ТД843). Кроме того, данное исследование охватывает "Стратегию Республики Таджикистан в сферах науки, технологий и инноваций на период до 2030 года" по приоритетным направлениям научных и научно-технических исследований, т.е. разведка и рациональное использование природных ресурсов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью данного исследования является разработка физико-химических основ переработки урансодержащих руд, характерных для месторождений "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан – 2", "Восточный Памир", а также отходов, накопленных в хвостохранилищах Адрасман и города Бустон.

Основные задачи исследования включают:

- изучение механизмов разложения урансодержащего сырья с применением кислотных и щелочных агентов, направленных на эффективное извлечение полезных компонентов;

- выявление и количественная оценка основных энергетических и кинетических параметров, определяющих скорость и степень завершённости химических процессов при переработке урансодержащего сырья;

- разработка и технологическая оптимизация схем переработки, адаптированных к геолого-минералогическим особенностям урановых месторождений Таджикистана и обеспечивающих экологически безопасную утилизацию производственных отходов;

- исследование процессов извлечения урановых концентратов из разнообразных водных сред, включая стоки дренажей, технологических растворов и производственных жидкостей с содержанием урана.

Объектом исследования выступают урановые руды, извлекаемые из вышеуказанных месторождений, а также техногенные отходы, накапливаемые в хвостохранилищах Адрасман и Бустон. Эти объекты требуют глубокого анализа их химико-минералогического состава, а также детального изучения первичных компонентов, промежуточных стадий переработки и финального продукта — концентрата триоксида урана (U_3O_8).

Предмет исследования научной работы включает рассмотрение физико-химические закономерностей и технологических аспектов извлечения уранового концентрата из различного рода источников — природных руд, производственных остатков, технологических растворов, а также минерального рассола озера Сасык-Куль.

Научная новизна проведённого исследования заключается в:

- экспериментальном обосновании возможности извлечения урана из урансодержащих руд месторождений "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан – 2", "Восточный Памир";

- экспериментальном обосновании возможности извлечения урана из отходов хвостохранилищ Адрасман и города Бустон с применением сернокислотного и щелочного методов разложения;

- раскрытии механизма кислотного разложения урановых руд, характерных для региона, и установления ключевых значений окислительных агентов в процессе выщелачивания.

Теоретическая и научно-практическая значимость исследования заключается в оптимизации параметров разложения урановых руд и отходов, находящихся в хвостохранилищах, что способствует повышению эффективности их переработки. Проведена термодинамическая оценка сернокислотного разложения уранового сырья, а также изучены механизмы выделения из технических, шахтных и дренажных вод урана в виде U_3O_8 . В рамках работы разработаны методологические подходы к решению радиоэкологических проблем, связанных с уранодобывающей и перерабатывающей промышленностью.

Практическая ценность данного исследования заключается в разработке ключевых оптимизированных схематических технологий, направленных на получение урановых концентратов, которые могут быть внедрены на гидрометаллургических предприятиях с целью эффективного извлечения урана из различных материалов, содержащих этот элемент.

Положения, выносимые на защиту:

- данные минералогического и химического анализа урановых залежей месторождений "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан – 2" и "Восточный Памир", а также их физико-химические свойства, определённые с применением рентгенофазового анализа, дифференциального термического анализа, альфа- и гамма-спектрометрии.;

- установленные химико-минералогические характеристики урансодержащих отходов, накопленных в хвостохранилищах Таджикистана;

- результаты исследования процессов разложения руд урановых месторождений "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный

Таджикистан", "Северный Таджикистан - 2" и "Восточный Памир", а также отходов хвостохранилища Адрасман и хвостохранилища города Бустон, с установлением оптимальных параметров проведения данных процессов.

- данные по изучению процессов выщелачивания урановых руд с введением в процесс окислителей, а также анализ зависимости эффективности извлечения урана от уровня рН раствора в присутствии окислительных агентов;

- энергетические и кинетические параметры разложения ураносодержащих руд и отходов в условиях сернокислотного воздействия;

- разработанные оптимизированные схематические технологии переработки уранового сырья, добываемого на месторождениях "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан - 2" и "Восточный Памир", а также отходов хвостохранилища Адрасман и хвостохранилища города Бустон;

- предложенные эффективные методы извлечения урана из технических и шахтных вод, наряду с разработкой решений для устранения экологических проблем, связанных с уранодобывающей промышленностью.

Степень достоверности результатов опирается на результаты, полученные с применением сертифицированного и аккредитованного аналитического оборудования, соответствующего современным требованиям лабораторной практики. Комплексное применение современных физико-химических методов анализа, таких как спектральный анализ, альфа- и гамма-спектрометрия, дифференциальный термический анализ (ДТА) и рентгенофазовый анализ (РФА), обеспечило высокую точность, надёжность и воспроизводимость полученных экспериментальных данных. Теоретическая база исследования опирается на фундаментальные принципы физической химии и технологию переработки неорганического сырья, что обеспечивает научную обоснованность, логическую согласованность и целостность проведённой работы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности:

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.17.00 – Химическая технология (05.17.01 – Технология неорганических веществ) по следующим пунктам:

п.1. Производственные процессы получения неорганических продуктов: соли, кислоты и щелочи, минеральные удобрения, изотопы и высокочистые неорганические продукты, катализаторы, сорбенты, неорганические препараты. (Исследованы сорбционные методы извлечения урана. Рассмотрены методы сорбции на ионообменных смолах, углях и природных сорбентах. Исследована эффективность термообработанных углей месторождения Фан-Ягноб и микрогелей на основе пектиновых полисахаридов)

п.2. Технологические процессы (химические, физические и механические) изменения состава, состояния, свойств, формы сырья, материала в производстве неорганических продуктов. (Разработаны технологические схемы переработки урановых руд, добываемых из месторождений "Танзим", "Восточный Памир", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан" и "Северный Таджикистан - 2".)

п.4. Способы и средства разработки, технологических расчетов, проектирования, управления технологическими процессами и качеством продукции применительно к производственным процессам получения неорганических продуктов. (Определена кинетика выщелачивания урана при различных температурных условиях (293, 313, 333 K) и временных интервалах (1–10 часов). Рассчитаны значения энергии активации процессов, позволяющие установить механизмы реакции и определить наиболее рациональные технологические параметры для максимального извлечения урана)

Личный вклад соискателя учёной степени выражается в активном участии на всех этапах выполнения научной работы. Соискателем были разработаны и реализованы методологические подходы, направленные на достижение целей и решение поставленных исследовательских задач. Автор лично провёл комплекс экспериментальных исследований, применяя современные аналитические и численные методы для получения достоверных результатов.

Были осуществлены сбор, систематизация, обработка и всесторонняя интерпретация экспериментальных и расчетных данных, а также выполнен их сравнительный анализ и обобщение. Полученные научные результаты нашли отражение в рецензируемых научных изданиях, а основные положения и выводы диссертации сформулированы на основе собственных исследовательских наработок и экспериментальных данных.

Апробация и реализация результатов диссертации.

Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены в рамках ряда научных мероприятий различного уровня, что способствовало их апробации и получению экспертной оценки научным сообществом, что обеспечило их апробацию в профессиональном сообществе: VI Нумановских чтениях (Душанбе, 2009); VII Международ. конфер. «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, Казахстан, 2009); Семинарах «2011 год – Международный год химии» и «Радиационная безопасность Таджикистана» (Душанбе, 2011); Международ. семинаре «Урановое наследие Советского Союза в Центральной Азии: проблемы и решения» (Душанбе, 2012); Республик. конфер. по ядерно-физическим методам анализа состава биологических, гео-логических, химических и медицинских объектов (Душанбе, 2014); Международ. научн.-практич. конфер., посвящённой 1150-летию учёного-энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра Мухаммада ибн За-кария Рази (Душанбе, 2015); Международ. науч. конфер. «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий», посвящённой 25-летию государственной независимости Республики Таджикистан (Душанбе, 2016); XV Нумановских чтениях «Современное состояние химической науки и использование её достижений в народном хозяйстве Республики Таджикистан» (Душанбе, 2019); Республ. науч.-теоретич. конфер. «Основы развития и перспективы химической науки в Республики Таджикистан», посвящённой 60-летию химического факультета и памяти д.х.н., профессора, академика АН РТ И. У. Нуманова (Душанбе, 2020); Республ. науч.-практич. конфер. «Инновационное развитие науки» с участием междунар. организаций (Душанбе, 2020);

XXI Междунар. науч. конфер. «Сахаровские чтения 2021 года: Экологические проблемы XXI века» (Минск, Беларусь, 2021); Междунар. науч.-практич. конфер. «Химическая, биологическая, радиационная и ядерная безопасность: достижения, проблемы и будущие перспективы» (Душанбе, 2023); XXIII Междунар. конфер. «Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI века» (Минск, 2023); Международная научно-практическая конференция на тему «Роль химии и химической промышленности в ускоренной индустриализации страны», посвященная провозглашению четвертой национальной цели – ускоренной индустриализации страны и двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (Душанбе, 2024); Международная научно-практическая конференция на тему «Цифровая индустриализация и развитие энергетики глазами ученых и исследователей» (Бохтар, 2024); X Международной конференции «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века» (Минск, Республика Беларусь, 2024); Междунар. науч.-практич. конфер. «Цифровая индустрия и энергетическое развитие глазами учёных и исследователей» (Бохтар, ГОУ Институт энергетики Таджикистана, 2024); Междунар. науч.-практич. конфер. «Современное состояние обеспечения качества и экологической безопасности продовольственных продуктов в Центральной Азии» (Худжанд, 2024); Междунар. науч.-практич. конфер. «Перспективы использования ядерной технологии и проблемы радиационной безопасности в государствах Центральной Азии (Душанбе, 2025).

Публикации по теме диссертации. По результатам проведённого исследования опубликовано 63 научных труда, включая 2 монографии, 30 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК при Президенте Республики Таджикистан, 25 публикаций в материалах республиканских и международных научных конференций, а также получено 8 малых патентов Республики Таджикистан на изобретения.

Структура диссертации и объем. Диссертационная работа изложена на 395 страницах, включает 91 таблицу и 129 иллюстраций. Структура исследования охватывает введение, шесть основных глав, заключительные выводы и перечень использованных источников, включающий 301 наименование.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ УРАНА ИЗ РУД И ДРУГИХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ (краткий литературный обзор)

1.1. Переработка урансодержащих материалов

1.1.1. Урановые минералы

Среди множества известных урановых минералов лишь небольшая часть обладает промышленной ценностью.

Классификация урановых руд осуществляется согласно содержанию сопутствующих элементов, включая собственно урановые, а также руды, обогащенные молибденом – уран-молибденовые, ванадием – уран-ванадиевые, никелем – уран-никелевые, уран-кобальтовые, уран-висмутовые, уран-серебряные и содержащие другие элементы.

Также используется классификация руд согласно их химического состава: силикатный тип характеризуется преобладанием силикатных минералов; сульфидные руды содержат более 8–10% соединений сернистых металлов; карбонатные образования отличаются высоким содержанием углекислых солей (свыше 10–15%); окисленно-железистые породы включают значительное количество соединений железа; каустобиолитовые породы формируются на основе органического вещества.

Комплексный анализ химического состава урановых руд представляет собой один из ключевых этапов в выборе подходящих методов переработки. Так, на ураносодержащие породы силикатного типа наиболее эффективно воздействуют кислотные технологии выщелачивания, благодаря их способности разрушать кремнекислотную матрицу руды, обеспечивая эффективное растворение нужных соединений. Для обработки карбонатных руд используются содовые растворы, которые способствуют выделению урана из минералов с высоким содержанием карбонатов. Железо-окисные руды подвергаются домен-

ному плавлению, в ходе которого уран концентрируется в шлаках, а каолинитовые руды перерабатываются путём сжигания для получения урановых соединений.

Классификация руд по концентрации урана выглядит следующим образом: бедные руды (с содержанием урана не превышающим 0,1%); рядовые (содержание урана в пределах 0,25-0,1%); средние (с содержанием урана 0,25-0,5%); богатые (0,5-1,0%); очень богатые – в них содержится более 1,0% урана.

Уран также может добываться как побочный продукт из руд с крайне низким содержанием (0,0015-0,01%). В качестве примера можно назвать золотосодержащие конгломераты месторождения Witwatersrand (ЮАР), в которых содержание урана находится в пределах 0,015-0,01%, или фосфоритовые урановые руды Флориды (США), с содержанием 0,006–0,008% урана [1,2].

Монографии и учебные пособия [3–6] подробно рассматривают технологические процессы извлечения урана различными методами, включая геохимические характеристики урана и мировое производство.

В исследованиях [7–9] представлен обзор советских исследователей, посвящённых изучению урановых минералов, их кристаллохимическим особенностям и формам нахождения урана в различных геологических структурах.

Исследования [10–14] охватывают вопросы геолого-промышленной классификации урановых месторождений изучены в [10–14], где также рассматривается их типизация по генетическим признакам, особенности их морфологии, состава и технологической значимости. В них приведены методические рекомендации по пересмотру классификации запасов урановых месторождений, а также перечислены основные урановые месторождения Таджикистана (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Основные промышленные типы ураносодержащих месторождений и основные составляющие их рудных тел (согласно данным, приведённым в [10-14])

Промышленный тип месторождения	Природный тип руд (минерализация)	Морфологический тип с комплексом вмещающих пород	Содержание U в рудах (среднее, в %)	Промышленный тип руд (технологический)	Попутные соединения
Эндогенный тип (зоны структурно-стратиграфических несогласий)	Урановый, ураново-никелевый. Коффинит-сульфидно-настураново-арсенидный	Жилы и линейные залежи в песчаниках осадочных пород, гнейсах фундамента и кристаллических сланцах	0,3– 12	Гидрометаллургический (энергетический ураново-никель-золотосодержащий)	<i>Ag, Cu, Ni, Au</i>
Эндогенный в составе докембрийских щитов, в областях магматической и тектонической активизации	Урановый, уран-ториевый. Уранинит-браннеритовый, браннерит-настурановый, браннерит-коффинитовый	Линзы и штокверки в пегматитах, мигматитах и гранитоидах	0,04– 0,07	Пиро-гидро-флотационный сортировочный металлургический (энергетический ураново-золото-серебросодержащий)	<i>Mo, Ag, Au</i>
	Урановый. Браннерит-уранинитовый, браннерит-настуран-коффинитовый	Залежи в гнейсах (линзо-, столбовые и плитообразные), в гранитах и мигматитах	0,1	Гидрометаллургический, сортировочный (энергетический ураносодержащий)	–
	Урановый. Уранинит-настуран-магнетит-гематитовый	Залежи (линзо- и пластообразные) в железистых кварцитах, магнезиально-железистых сланцах	0,2	Пиро-, гидрометаллургический, сортировочный (энергетический ураново-железосодержащий)	<i>Fe</i> до 50%
	Золото-урановый. Браннеритовый	Залежи (линзо-, жило- и плитообразные) в гранитах, мигматитах и кристаллических сланцах	0,15	Гидрометаллургический, сортировочный (энергетический ураново-золотосодержащий)	<i>Au</i>
Эндогенный в складчатых областях, структурных тектонических активизациях	Урановый, ураново-фосфатный, ураново-молибденовый. Настуран-браннерит-молибденит-аршиновитовый	Залежи (жило-, линзо- и столбовые) в известняках, гранитах, диабазе, углеродистых сланцах, песчаниках	0,08– 0,1	Гидрометаллургический, сортировочный (энергетический урановый)	<i>Zr, Au, Mo,</i> <i>P₂O₅</i> (25 – 30%)
	Урановый. Настуран-браннерит-фторопати-коффинитовый		0,12	Гравитационно-гидрометаллургический, сортировочный (энергетический урановый)	<i>Ti</i>

Продолжение таблицы 1.1

Эндогенный в складчатых областях, структурных тектонических активизациях	Урановый. Настуран-ураново-черниевый, коффинит-настурановый	Залежи (линзо- и пластообразные) в кремниево-углистых сланцах	0,05	Гидрометаллургический, сортировочный (энергетический урановый)	<i>V</i>
	Урановый. Настуран-арсенид-сульфидный, с самородным серебром, настуран-коффинит-карбонатный	Залежи (линзообразные и жильные) в кремнисто-углеродистых сланцах и амфиболитах	0,4	Гидрометаллургический, сортировочный (энергетический ураново-серебряный)	<i>Ag</i> (до 200 г/т), <i>Bi, Ni, Co,</i> <i>Sn, Zn, Pb,</i>
Экзогенный в платформенных чехлах, структуре морских глин	Ураново-редкометалльный. Ураново-редкометалльный костный фосфат	Серые и чёрные глины (линзо- и пластообразные) с костным детритом	0,05	Гидрометаллургический гравитационный, сортировочный (энергетический урановый)	<i>Re, Ti,</i> <i>Y, Sc</i>
Эндогенный в складчатых областях, вулканических и тектонических структурах	Ураново-молибденовый. Настурановый, настураново-сульфидный, настураново-иордизитовый, коффинит-настурановый	Залежи (пласто-, жильно- и линзообразные), штокверки, в мраморах, туфопесчаниках, гранитодах, вулканитах	0,12– 0,5	Гидрометаллургический, сортировочный (энергетический, металлургический ураново-молибденовый)	<i>Zn, Bi,</i> <i>Pb, Mo</i>
Экзогенный в платформенных чехлах водопроницаемых толщ	Урановый. Настуран-ураново-черниевый-коффинит-молибденитовый	Залежи (лентообразные) в углистых сланцах, песчаниках, бурых углях	0,03– 0,1	Гидро- и пирометаллургический, сортировочный (энергетический урановый)	-
	Урановый. Настуран-коффинит-ураново-черниевый	Залежи (линзо- и лентообразные) в гравелитах, песках, сероцветных глинисто-углистых песчаниках	0,02– 0,1	-«-	-
	Урановый. Настуран-коффинит-ураново-черниевый	Залежи (линзо- и лентообразные), роллы в гравелитах и сероцветных песчаниках	0,1– 0,2	Гидрометаллургический, подземное выщелачивание из скважин (энергетический урановый)	<i>Re, Mo, Se, V</i>
	Ураново-ванадиевый и ураново-битумный. Настуран-коффинит-ураново-черниевый	Залежи (ленто-, пласто- и линзообразные) и роллы в глинистых сланцах, пёстро- и красноцветных песчаниках	0, <i>n</i>	Гидрометаллургический, сортировочный (энергетический урановый)	-

1.1.2. Переработка урановой руды

Урановые руды обладают низкими концентрациями урановых минералов, поэтому перед основным процессом переработки проводится из предварительное обогащение [15–17].

Методы переработки указанного сырья разнообразны и включают: щелочные, кислотные, микробиологические методы, метод прямого фторирования.

Кислотное выщелачивание

В традиционной технологии кислотного выщелачивания урана используется предварительно подготовленное минеральное сырьё, прошедшее процессы механического дробления и сушки. Обработка осуществляется с применением серной, азотной или их комбинированной кислотной среды, способствующей переходу урана в растворимую фазу. В ситуациях, когда уран в исходном сырье представлен в малорастворимой тетравалентной форме (U^{4+}), для повышения эффективности выщелачивания применяются окислительные агенты. В их числе - азотная кислота, трёхвалентные соединения железа (Fe^{3+}), ионы ванадия (VO_2^+), гипохлорит натрия, оксид марганца (IV) - пиролюзит, а также другие сильные окислители.

Для повышения эффективности процесса применяется метод насыщения кислородом: сульфидосодержащий материал подвергается термическому воздействию при температуре около $150^{\circ}C$ и обрабатывается потоком кислорода. В ходе реакции сернистые соединения преобразуются в серную кислоту, которая, в свою очередь, способствует более интенсивному вымыванию урана из материала.

В процессе выщелачивания урана происходит его переход в раствор в форме уранилсульфата, в то время как сопутствующие элементы, такие как радий и другие металлосодержащие примеси, осаждаются преимущественно в виде нерастворимых сульфатных соединений. На последующей стадии, при введении раствора гидроксида натрия, уран селективно выделяется из рас-

твора, образуя осадок в виде диураната натрия ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Однако в зависимости от используемых условий процесса возможна также коагуляция урана в форме диураната аммония или уранилгидроксида.

В промышленной практике серная кислота считается наиболее эффективным и доступным реагентом для извлечения урана из руд. Её химическое взаимодействие с оксидом урана проходит по определённым реакционным схемам, обеспечивающим максимальное выделение целевого элемента:



После извлечения урана из раствора твёрдые остатки проходят процесс очистки. Далее полученные твёрдые фракции направляются на долговременное изолированное хранение в специально проектируемые герметичные хранилища, исключаящие контакт с окружающей средой и обеспечивающие радиационную безопасность. Указанные остатки содержат основную долю радионуклидов, ранее присутствовавших в исходном сырье, включая изотопы радия и других долгоживущих элементов.

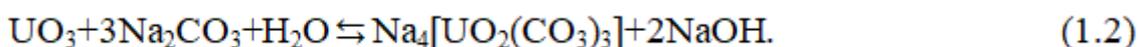
На финальной стадии переработки осуществляется избирательное извлечение урана из раствора с использованием селективных методов. Для этого используются методы экстракции и ионнообменного разделения, позволяющие эффективно отделить уран от остальных растворённых компонентов. Некоторые из этих элементов обладают схожими химическими свойствами и при определённых условиях могут быть извлечены, используя аналогичные органические растворители.

Кислотный подход к обработке активно применяется для расщепления руд, содержащих соединения таких элементов, как торий, титан, тантал, ниобий, РЗМ.

В случае руд, содержащих вторичные урановые минералы, используется метод выщелачивания содовыми растворами.

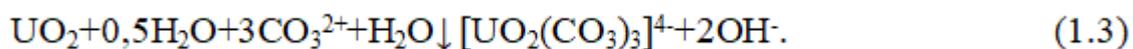
Щелочное выщелачивание

Выщелачивание содовыми растворами уранового сырья основывается на формировании растворимых комплексов U(IV) и карбонат-анионов [3, 4, 17], основу данного процесса составляет химреакция:



Для предотвращения образования нерастворимого диураната натрия в процессе выщелачивания применяется комбинация карбоната натрия и гидрокарбоната натрия. Однако метод карбонатного выщелачивания оказывается малопродуктивным при обработке труднорастворимых руд, содержащих тугоплавкие оксидные соединения редкоземельных элементов, а также тория, титана, ниобия и тантала.

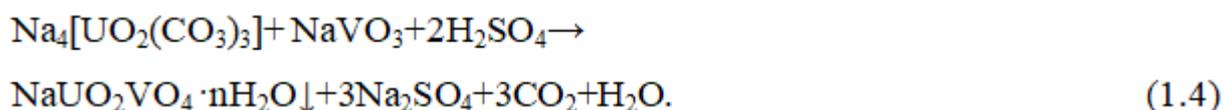
С целью повышения эффективности извлечения урана из таких минеральных комплексов широко используются окислительные агенты. Среди них наиболее действенными являются перманганат калия, молекулярный кислород, а также ряд других активных соединений, которые способствуют эффективному извлечению урана:



Для перевода ванадия в растворимую форму уран-ванадиевые руды подвергают предварительному термическому обжигу с добавлением поваренной соли, что на первой стадии процесса позволяет эффективно отделить уран от ряда сопутствующих компонентов.

При использовании метода карбонатного выщелачивания уранового сырья образуются содовые ураносодержащие растворы, из которых уран извлекается двумя основными способами: путём щелочного осаждения с применением гидроксида натрия, что приводит к образованию диураната натрия, либо с использованием хроматографической сорбции на анионообменных смолах.

В случае переработки уран-ванадиевых руд, характеризующихся повышенным содержанием ванадия, процесс осаждения реализуется посредством ступенчатой нейтрализации сернокислого раствора до значения pH около 6, инициируя соответствующие химические преобразования, способствующие выделению урана:



Хроматографический метод

Для извлечения из бедных руд урана используется метод хроматографической сорбции, основанный на селективной фиксации уранового карбонатного комплекса на анионообменной смоле. После насыщения сорбента целевыми компонентами осуществляется этап десорбции (элюирования) с использованием 1М раствора нитрата натрия, обогащённого карбонатом натрия.

Метод прямого фторирования

В случае руд с высоким содержанием урана применяется процесс прямого фторирования. Сначала материал подвергается воздействию фтористого водорода при температуре порядка 600°C, а затем проходит обработку трехфтористым бромом.

В результате этих реакций образуется тетрафторид урана, который впоследствии превращается в летучее соединение - гексафторид урана. При этом происходит фторирование диоксида кремния и других примесных элементов, что ведёт к увеличению затрат на использование фторирующих реагентов [18, 19].

Микробиологический метод

Одним из перспективных подходов к переработке бедных урановых руд является микробиологический метод извлечения. Этот способ позволяет существенно сократить затраты благодаря использованию микроорганизмов, которые самостоятельно производят необходимые реагенты. Это делает освоение даже малобогатых месторождений экономически выгодным.

Этот метод предполагает укладку урановых руд на герметичное основание и их обработку раствором железного сульфида, содержащим бактерии *Thiobacillus ferrooxidans* - микроорганизмы, обладающие способностью к восстановлению сульфидных соединений. В процессе их жизнедеятельности происходит образование сульфатов железа, которые способствует окислению урана из четырёхвалентного состояния (+4) в более растворимую форму с

окислительным уровнем (+5), что позволяет урану перейти в раствор в кислой среде. После этого извлечение урана осуществляется методами концентрирования и очистки, включая осаждение и ионнообменное разделение, обеспечивающими эффективное выделение целевого элемента.

Использование биотехнологических процессов даёт значительные преимущества, включая снижение производственных расходов почти в сто раз и минимизацию экологического воздействия в ходе получения «жёлтого кека» [17, 18].

Переработка урансодержащих отходов и избирательное извлечение урана

Для повышения экономической целесообразности и минимизации вредного влияния на окружающую среду осуществляется переработка материалов с ураном, включая промышленные остатки, скрапы и некондиционные продукты. В процессе сорбции на ионообменных смолах и осаждения многие сопутствующие элементы выпадают в осадок, что требует применения различных окислительно-восстановительных реакций для удаления нежелательных примесей.

Современные ионообменные смолы позволяют селективно извлекать уран. Из растворов, насыщенных примесями, такими как Fe, Ni, Cu, Mn и другие металлы, уран выделяется с применением методов экстракции, осаждения или хроматографическим методом разделения.

В кислых средах уран способен переходить в осадок в виде гидроксидов при введении оснований, таких как гидроксид натрия, аммиак, а также водорастворимые соединения кальция или магния. Существует также альтернативный подход, заключающийся в осаждении урана в форме фосфатных соединений. Данный процесс предусматривает предварительное восстановление урана из шестивалентного состояния (U^{6+}) до тетравалентной формы (U^{4+}) при помощи восстановителей, таких как металлическое железо или алюминий.

Экстракция урана с получением урана высокой чистоты

При переработке низкосортных руд и концентратов его концентрация в растворах незначительная и составляет в основном от 0,5 до 2,0 г/л. Для извлечения урановых соединений применяются различные методы, в числе которых:

- сорбция с использованием современных ионообменных материалов, обладающих высокой селективностью к уранил-ионам;
- экстракция с применением органических растворителей, обеспечивающих эффективное разделение целевых компонентов;
- выпаривание, позволяющее концентрировать уран и сопутствующие элементы за счёт удаления растворителя.

Извлечение урана из растворов с высоким уровнем кислотности преимущественно осуществляется с применением специфичных экстрагентов, к которым относятся амины и алкилфосфорные кислоты. Так, в практике широко используется система на основе трибутилфосфата (ТБФ), растворённого в керосине, обладающая высокой избирательностью к уранилу. В современных производственных схемах также находят применение вторичные и третичные алкиламины, а также фосфорорганические кислоты, включая ди(2-этилгексил)фосфорную кислоту, обладающие высокой экстракционной способностью.

Как показывает практика, экстракционные методы превосходят по эффективности классические ионнообменные технологии, особенно при концентрации урана в растворе выше 1,0 г/л после кислотного выщелачивания. Однако данный способ не применяется для работы с карбонатными растворами.

Для достижения ураном высокой степени чистоты, вплоть до уровня оружейного, требуется проведение дополнительной этапной очистки. Финальный этап включает растворение гексагидрата диураната натрия в азотной кислоте, получая базовые продуктивные растворы, из которых уран извлекается селективной экстракцией. В данном процессе используется трибутилфосфат, который предварительно растворяется в керосине или смеси углеводородов.

После экстракции уран переводится из трибутилфосфата в водный раствор, который предварительно подкисляют, что приводит к образованию химически чистого уранилнитрата, формула которого – $UO_2(NO_3)_2$. Для дальнейшей очистки уранилнитрат подвергается кристаллизации или осаждается в виде пероксида $UO_4 \cdot 2H_2O$, после чего осторожно прокаливается.

В процессе термообработки урановые соединения претерпевают химические изменения, в результате которых образуется триоксид урана (UO_3). Далее это вещество вступает в реакцию с водородом, что приводит к его восстановлению до диоксида урана (UO_2), являющегося основным компонентом, используемым в атомной энергетике.

На заключительном этапе технологической обработки ураносодержащих растворов осуществляется перевод соединений урана в твёрдую фазу в виде оксидов или фторидных форм, включая тетрафторид урана (UF_4). Осадок, получаемый при осаждении урана, первоначально имеет насыщенную жёлтую окраску, характерную для промежуточных урановых соединений. В результате термического воздействия (прокаливания) он трансформируется в оксид триурана (U_3O_8), отличающийся характерным зелёным оттенком и обладающий высокой термической и химической стабильностью. Полученное твёрдое вещество фасуется в специальные герметичные ёмкости объёмом до 200 литров, предназначенные для безопасного хранения, транспортировки и дальнейшей переработки. Высушенные и прокалённые урановые продукты служат исходным материалом для получения высокочистых соединений урана — U_3O_8 , UO_2 , UF_4 , широко применяемых в ядерной энергетике, в том числе при производстве топлива для атомных реакторов [15, 17].

Для урана установлены жёсткие требования к чистоте, особенно по содержанию элементов с высоким нейтронным поглощением, таких как и редкоземельные металлы, бор, кадмий, литий. Допустимый уровень этих примесей в урановых соединениях не должен превышать значения в пять или даже шесть знаков после запятой. Процесс очистки начинается с растворения урана в азотной кислоте, с последующим применением экстракционных методов. Одним

из наиболее эффективных считается жидкостно-жидкостное разделение уранилнитрата с использованием органических растворителей – метилизобутилкетона или трибутилфосфата. Из полученных очищенных растворов, содержащих уранилнитрат, уран выделяют двумя основными способами: посредством кристаллизации или осаждением в форме пероксида урана ($UO_4 \cdot 2H_2O$), который затем прокаливается (кальцинируется) для получения UO_3 . Далее UO_3 восстанавливают водородом, превращая его в диоксид урана (UO_2). После этого соединение подвергается обработке сухим фтористым водородом (HF) при температуре 430–600°C, что приводит к получению тетрафторида урана (UF_4) - ключевого промежуточного соединения, служащего исходным веществом для последующего получения металлического урана методом восстановления [17, 18].

1.1.3. Способы переработки урановых руд

Существуют три основных промышленных метода переработки урановых руд, различающихся по технологическому подходу и применяемым условиям:

- кучное выщелачивание – наиболее широко применяемый метод, особенно для бедных урановых руд.
- гидрометаллургический;
- подземное выщелачивание.

Гидрометаллургическая переработка урановых руд включает несколько ключевых технологических этапов: вначале концентраты подготавливают к процессу выщелачивания, преобразуя уран в растворимое состояние различными методами, такими как термическая обработка, спекание или сплавление с реагентами. Затем происходит процесс выщелачивания, во время которого уран растворяется под воздействием химических соединений. После этого его извлекают из полученного раствора с помощью методов осаждения или сорбции, а затем проводят завершающую очистку [3, 4, 19].

Ключевые этапы уранового производства:

Обогащение руды. Обогащение урановой руды представляет собой начальный этап технологической цепочки получения урана. Этот процесс включает механическое измельчение руды до заданной фракции, после чего осуществляется гравитационное разделение на основе различий в плотности минералов. Суспензирование руды в водной среде позволяет отделить высокоплотные урановые минералы (например, уранит и смоляные урановые руды), которые оседают в первую очередь. Вторичные минералы, например карнотит и торбернит, имеют меньшую плотность и формируют устойчивые суспензии.

Обжиг руды. Руда подвергается процессу термического обжига, который выполняет несколько задач: удаляет органические соединения, избавляет материал от влаги, разрушает карбонаты, окисляет сульфидные соединения и устраняет нежелательные примеси, такие как сурьма и мышьяк.

В ходе этого этапа, особенно при присутствии солей, урановые оксиды преобразуются в уранаты, а углеродные соединения эффективно устраняются. Одновременно уран переводится в сульфатную форму, а потенциально мешающие выщелачиванию восстановители окисляются.

Выщелачивание концентратов и растворение урана. На стадии выщелачивания происходит непосредственное извлечение из руды урана. Самым экономичным считается метод кислотного выщелачивания с применением серной кислоты. Однако он оказывается неэффективным в следующих случаях. В частности, при наличии урана в четырёхвалентной форме - например, в урановой смолке, где уран представлен как U(IV) - его растворимость в серной кислоте крайне низка, что препятствует эффективному извлечению. Для преодоления данной проблемы применяются два подхода: щелочной способ выщелачивания, более эффективный при переработке руд, содержащих труднорастворимые соединения; предварительное окисление урана до шестивалентного состояния (U(VI)), обладающего высокой растворимостью в кислой среде. Кроме того, в случае присутствия в составе руд таких минералов, как доломит или магнезит, активно вступающих в реакцию с серной кислотой с

образованием избыточного количества углекислого газа и побочных продуктов, используется гидроксид натрия как альтернативный реагент, что снижает потери реагента и повышает селективность выщелачивания [4, 15, 17].

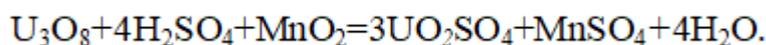
В рамках традиционной технологии кислотного выщелачивания измельчённую и высушенную урановую руду обрабатывают растворами серной, азотной кислоты или их смесью. Эффективность данного процесса зависит от степени окисления урана: при наличии четырёхвалентной формы (U^{4+}), характерной, например, для урановой смолки, необходим ввод окислителей. В качестве окислительных агентов применяют: азотную кислоту, диоксованадий (VO_2^+), соединения железа (III), пиролюзит, хлорноватокислый натрий и другие реагенты, способные перевести уран в шестивалентную, легкорастворимую форму (U^{6+}).

Дополнительное повышение извлечения достигается методом кислородной продувки, заключающимся в предварительном нагревании смеси уранового сырья и сульфидных минералов до температуры порядка $150^\circ C$, после чего воздействуют на нагретую смесь потоком кислорода. В результате химической реакции сернистые минералы преобразуются в серную кислоту, которая способствует растворению урана.

После выщелачивания уран переходит в раствор в форме уранилсульфата, а такие элементы, как радий и прочие металлы урановой смолки, осаждаются в виде сульфатов. Для выделения урана из растворов выщелачивания часто применяют добавление гидроксида натрия, в результате чего образуется осадок жёлтого цвета - диуранат натрия ($Na_2U_2O_7 \cdot 6H_2O$), известный как «жёлтый кек». Однако, в зависимости от конкретной технологической схемы, уран также может быть выделен в форме уранилгидроксида или диураната аммония, что определяется составом раствора, используемыми реагентами и целями дальнейшего производства.

В крупных промышленных масштабах основным реагентом для выщелачивания урана остаётся серная кислота, поскольку она является доступным

и экономически выгодным реагентом, и сущность технологии можно представить в виде химреакции:



Остатки, содержащие уран, после процесса переработки подвергаются удалению и долгосрочному хранению в специальных хранилищах, разработанных для безопасного содержания радиоактивных материалов. В состав этих отходов входят различные радиоактивные элементы, включая радий, который в руде присутствует изначально.

Следующим этапом переработки урана является его селективное извлечение из выщелоченного раствора с применением современных технологий, таких как ионнообменные процессы и жидкостно-жидкостная экстракция. Однако важной технологической задачей остаётся наличие в растворе сопутствующих ионов металлов, поведение которых при определённых условиях может быть сходным с ураном (например, ионы железа, ванадия, молибдена). Это усложняет селективность процесса извлечения. Для повышения степени очистки применяются стадийные химические реакции окисления и восстановления, позволяющие постепенно удалять ненужные компоненты. Благодаря современным ионообменным материалам удаётся добиться высокой степени точности и эффективности в процессе выделения урана [17-19].

Уран извлекают из раствора, содержащего примесные элементы, такие как железо, марганец, никель, медь и другие, с помощью методов экстракции, осаждения или хроматографического разделения. В кислой среде его осаждают в форме гидроксидов, используя реакции нейтрализации. Для этого в раствор, содержащий уранил-ионы, добавляют щелочные компоненты - оксид кальция (CaO), оксид магния (MgO), аммиачные растворы или гидроксиды щелочных металлов. В результате нейтрализации повышается pH среды, что приводит к выпадению осадка в виде уранилгидроксида. В альтернативных технологиях осаждение урана может осуществляться в виде уранатфосфатов. При этом предварительно проводят восстановление шестивалентного урана

до четырёхвалентной формы (U^{4+}) металлического железа или алюминия в качестве восстановителей [17–19].

На рисунке 1.1 представлена технологическая схема переработки урановых руд гидрометаллургическим способом.

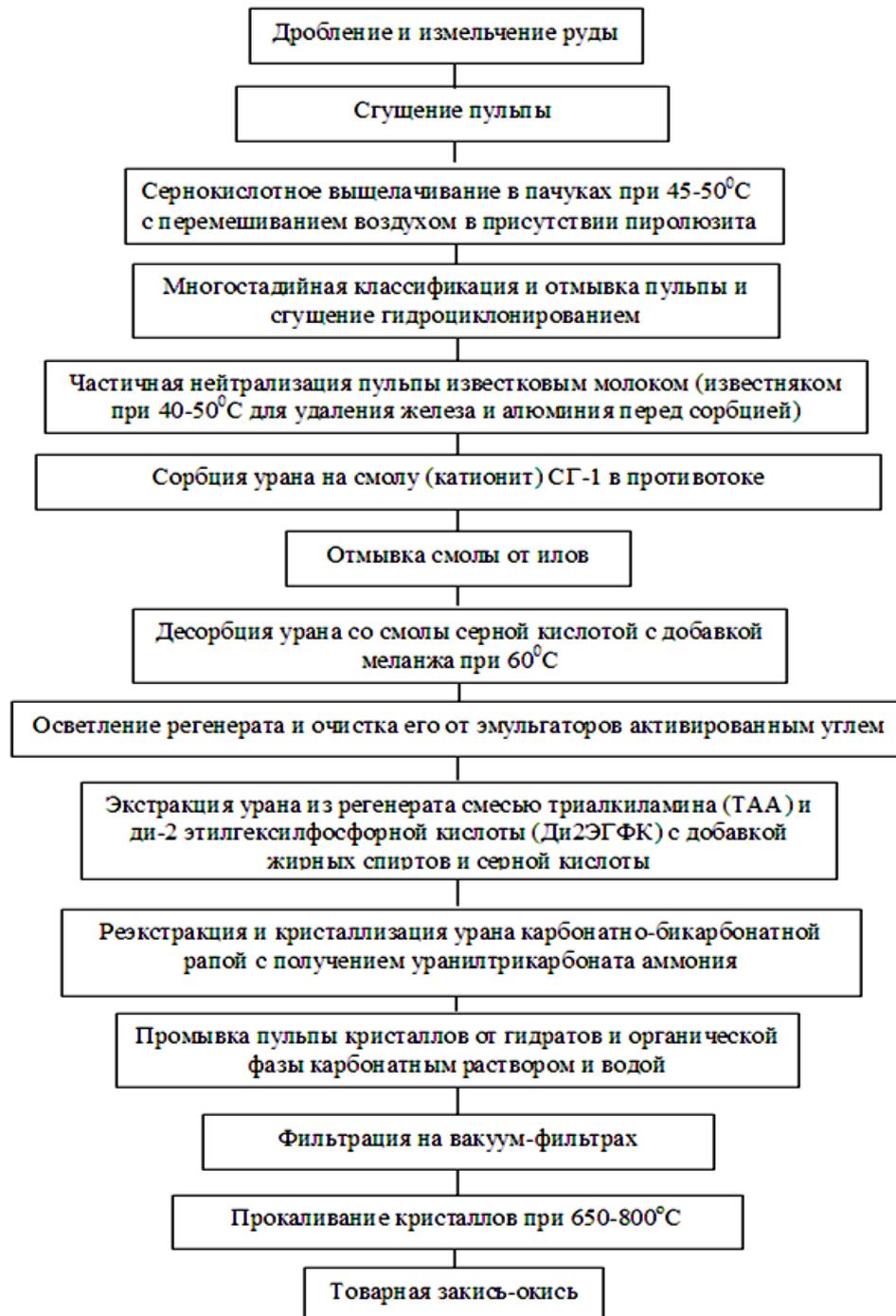


Рисунок 1.1 - Принципиальная схема сернокислотного извлечения, сорбционного концентрирования и экстракционной очистки урана

Кучное выщелачивание представляет собой метод извлечения урана и благородных металлов из рудных материалов. В этом процессе руду обрабатывают раствором, который вступает в реакцию с ураном или благородными металлами, образуя соединения. Затем полученный раствор собирается в специальные ёмкости, где происходит выделение полезных компонентов [20-26].

В исследовании [20] рассмотрены результаты щелочного выщелачивания золота и серебра. В работе описаны технологии кучного выщелачивания с использованием растворов цианида натрия, что позволяет получить сплав Доре. Альтернативные методы кучного выщелачивания благородных металлов с применением безцианидных растворителей представлены в исследованиях [21, 22]. В работах [23-26] изложен комплексный подход к кучному выщелачиванию, включая методологию и технику выполнения процесса для разложения соединений урана. В отличие от благородных металлов, кучное выщелачивание урана предполагает использование серной кислоты [24-26].

В Таджикистане впервые кучное выщелачивание применили в период 1951-1960 гг., что стало важным этапом развития урановой промышленности. Этот период характеризуется механизацией, автоматизацией и внедрением научно-технических достижений [27-31].

Разработаны технологии кучного и шахтного выщелачивания урана [32-37]. Исследования [32, 33] содержат данные о кучном выщелачивании в России и перспективах этого метода для различных урановых руд. В работе [34] изучены ключевые параметры процесса кучного выщелачивания.

В Таджикской ССР на Комбинате № 6 внедрялись различные технологии выщелачивания урана. В [27, 32] указывается, что в качестве площадок для реализации технологии кучного выщелачивания были выбраны месторождения Алатаньга и Чаркесар-II, в то время как участки Табошар, Чаркесар-I и Чаркесар-II использовались под шахтный способ переработки.

Начиная с 1976 года, на ряде месторождений была внедрена технология кучного выщелачивания для переработки отвальных пород, ранее задейство-

ванных в радиометрической обогатительной фабрике (РОФ) и на рудосортировочных контрольных станциях (РКС). В качестве сырьевой базы использовались низкосортные руды и хвостовые отвалы, которые размещались на специально подготовленных площадках, расположенных на крутых горных склонах на расстоянии 4–5 км от основной инфраструктуры рудников. Перемещение рудного сырья и формирование отвалов выполнялось с использованием автосамосвалов. Сам процесс выщелачивания носил сезонный характер и проводился исключительно в тёплое время года - с марта–апреля до ноября, когда климатические условия обеспечивали оптимальную эффективность реакций. Рабочие растворы подавались на орошаемые участки по системе магистральных трубопроводов, равномерно распределяясь по поверхности рудных куч [13].

В качестве выщелачивающего агента использовалась серная кислота, концентрация которой составляла 6–8 г/л, что позволяло растворять урансодержащие соединения в условиях проливной инфильтрации. Одновременно осуществлялось орошение участка размером 2000 квадратных метров (по квадратам, со сторонами 40×50 м) с интенсивностью подачи жидкости 75 л/ч·м². Длительность орошения - в течение от трёх до 3.5 месяца и осуществлялась металлическими форсунками, которые вращались непрерывно. Продуктивные растворы стекали самотёком по горным склонам и собирались в бетонных резервуарах ёмкостью 400 м³. Рядом с ними размещался аварийный резервуар вместимостью 250–300 м³. Затем перекачиванием растворы направлялись на технологическую установку, где они проходили обработку, насыщение серной кислотой, после чего растворы использовали ещё несколько раз, возвращая в процесс и повторно орошая ими рудные массы.

Переработка растворов осуществлялась на технологической установке и включала несколько ключевых этапов. В процессе задействовали сорбционную колонну, имеющую диаметр 2,5 м и высоту 6 м, с пропускной способностью от 150 до 200 кубометров в час. Помимо этого, использовались колонна

десорбции, резервуары для подготовки рабочих растворов и хранилище кислоты. После получения ураносодержащих растворов уран выделяли с помощью ионообменного сорбента АМ(п).

В результате проведённых экспериментов в 1975 году было обработано более 45 000 кубометров продуктивных ураносодержащих растворов, что позволило извлечь приблизительно 1,9 тонны урана. В период с 1976 по 1978 годы закислили около 5 млн. тонн горной массы с содержанием урана на уровне 0,01%, благодаря чему было извлечено примерно 19,2 тонн урана. На протяжении этих лет коэффициент извлечения урана из ураносодержащих руд варьировался следующим образом:

- 47,5% в 1976 году,
- 35% в 1977 году,
- 37,6% в 1978 году.

На стадии сорбции показатель достигал значений 86–87%. Для получения 1 кг урана расход серной кислоты составлял от 155 до 230 кг, а его себестоимость варьировалась в диапазоне 29–34 долларов США [13, 27, 33–35].

На месторождении Чаркесар-II, начиная с 1970 года, для извлечения урана была введена технология карбонатного кучного выщелачивания, используя старые хвосты радиометрической обогатительной фабрики и забалансовые руды. В качестве выщелачивающих реагентов использовали кислород воздуха, а также бикарбонаты магния и кальция, которые содержались в шахтных водах с уровнем рН 7.5–8 [14, 27].

Одновременно на территории площадью 4000 м² было сформировано хранилище, куда поступило около 205 тысяч тонн горной массы, включая 92,7 тысяч тонн отходов радиометрической обогатительной фабрики (РОФ). Концентрация урана в исходной массе достигала 0,018%, что позволило добыть 37,9 тонн урана [1, 8].

В следующие годы кучное выщелачивание осуществлялось с применением содовых растворов (2-17 г/л Na₂CO₃). Было показано, что в период 1975-

1978 годов в продуктивных растворах среднегодовое содержание урана было следующим:

- 1975 год – 16,4 мг/л,
- 1976 год – 10,6 мг/л,
- 1977 год – 10,6 мг/л,
- 1978 год – 4,7 мг/л,

то есть отмечалась с каждым годом его снижение.

Процесс десорбции урана выполнялся концентрированными карбонатными растворами, после десорбции уранилкарбонатный десорбат перерабатывался методом электродиализа [13, 27].

В период 1972-1978 гг. обработано 14,7 млн. м³ продуктивных растворов шахтного выщелачивания, что позволило получить более 112 т урана при себестоимости на 30-40% ниже, чем при переработке балансовых руд [34, 35].

Создание автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на предприятиях способствовало повышению качества сырья и снижению затрат. В 1961-1970 гг. в Таджикистане активно внедрялись новые технологии, а в 1971-1980 гг. происходила интенсификация процессов и автоматизация управления. Внедрялись системы АСУТП для горнодобывающих предприятий («Гранит», «Мираж», «Прометей», «Оазис») и комплексные отраслевые решения («Плутон-1») [36-39].

Кроме того, в отрасли реализованы передовые методы переработки урановых руд, включая радиометрическое обогащение и усовершенствованные процессы сорбции и десорбции урана. В результате удалось значительно повысить эффективность выщелачивания [13, 27].

Подземное выщелачивание представляет собой физико-химический процесс добычи полезных ископаемых (металлов и их соединений) путём вымывания их из породы с использованием специальных растворителей, которые закачиваются в залежь через скважины [32, 40-42].

Этот метод является альтернативой традиционным способам добычи, таким как открытая и подземная разработка. По сравнению с ними, подземное

выщелачивание не требует значительных объёмов горных работ и минимизирует контакт рабочих с горными породами. Этот способ особенно эффективен для бедных и глубоко залегающих руд.

Процесс начинается с бурения скважин. Для улучшения проникновения раствора в породу могут использоваться взрывчатые вещества или метод гидравлического разрыва пласта. Затем через систему закачных скважин в залежь подается растворитель (выщелачивающий агент), который вступает в реакцию с рудой. Полученный раствор, содержащий целевые компоненты, откачивается на поверхность через специальные скважины и направляется на последующую экстракцию [43-47].

Разработка технологии подземного выщелачивания началась в середине 1960-х годов независимо в Советском Союзе и США. Этот метод был разработан с целью извлечения урана из водонасыщенных и высокопроницаемых пород, где традиционные технологии оказались неэффективными. Несмотря на разные подходы, инженерные принципы подземного выщелачивания в обеих странах имели много общего.

При этом в СССР основной упор был сделан на использование кислотных растворов, тогда как в США предпочтение отдавалось щелочным системам, базирующимся на содовых растворах. Выбор технологии напрямую зависит от состава породы и гидрогеологических характеристик месторождений. Если в месторождении присутствует значительное количество карбонатов, чаще применяют щелочные содовые выщелачивающие растворы [33, 34, 44].

В России и Казахстане традиционно используются кислотные реагенты для подземного выщелачивания, тогда как в США предпочитают щелочные агенты, такие как сочетание бикарбоната натрия и углекислого газа. Скважинное подземное выщелачивание применяется в случаях, когда рудное тело полностью изолировано от водоносных горизонтов. Например, на Хиагдинском месторождении (Бурятия, Россия) рудное тело изолировано снизу и с боков скальными породами, а сверху - сотнями метров непроницаемой глины, что предотвращает выход продуктивного раствора за пределы горизонта [48].

Производственная площадка состоит из геотехнологических полигонов, которые размещают непосредственно над залежью. Геотехнологический полигон включает закачные скважины, через которые подаётся раствор с концентрацией серной кислоты 8-12 г/л для растворения урана, а также откачные скважины, через которые продуктивный раствор извлекается на поверхность.

С 1990-х годов подземное выщелачивание стало основным методом добычи урана, и в 2012 году на его долю приходилось 45% мирового производства урана [40-42].

Для подземного выщелачивания урановых руд применяются различные растворы, включая кислотные и щелочные. В кислотных растворах ключевым элементом является серная кислота, тогда как азотная кислота применяется значительно реже. В случае щелочных составов их основой служат карбонаты, а дополнительные компоненты включают бикарбонат натрия, карбонат аммония или растворённый углекислый газ. Современные усовершенствованные технологии предусматривают добавление кислорода в раствор, чтобы улучшить процесс извлечения урана. В США и СССР добыча урана методом подземного выщелачивания началась в начале 1960-х годов. В США первым месторождением, где применили этот метод, стал бассейн Ширли в штате Вайоминг, где с 1961 по 1970 год использовали серную кислоту. Однако начиная с 1970 года, при промышленной добыче в США преимущественно использовали карбонатные растворы [44, 47].

Подземная рекуперация включает извлечение урансодержащей воды (с концентрацией до 0,05% U_3O_8). Затем экстрагированный раствор проходит через шарики ионнообменной смолы, которая связывает уран. Далее насыщенные ураном смолы транспортируют на перерабатывающий завод, где из них выделяют U_3O_8 , получая так называемый "желтый кек". После отделения урана, ионнообменная смола может использоваться повторно.

К концу 2008 года в США функционировали четыре подземных урановых рудника, управляемых компаниями Cameco, Mestena и Uranium Resources, Inc. Все они использовали бикарбонат натрия в качестве выщелачивающего

реагента. В 2010 году Uranium Energy Corporation запустила проект Palangana в Техасе. Однако в 2012 году Cameco приостановила разработку проекта Kintyre из-за экономической нецелесообразности при цене \$45 за фунт U_3O_8 . По состоянию на 2009 год в США также существовал один проект подземной рекультивации [44].

На сегодняшний день подземное выщелачивание урана активно используется в России и Казахстане, являясь одной из ключевых технологий добычи урана [45–51]. Развитие технологии подземного выщелачивания подробно описано в работах [45–47]. Опыт мониторинга этого процесса с применением геофизических методов, а также инновационные технологии описаны в исследованиях [48, 49]. В работе [50] изучено сернокислотное подземное выщелачивание урана с добавлением HNO_2 в качестве окислителя.

В начале 1970-х годов в Советском Союзе метод подземного выщелачивания урана впервые был внедрен в Таджикистане на базе предприятия "Востокредмет" [13, 14, 27]. Завод "Востокредмет" сыграл ключевую роль в разработке и внедрении передовых технологий добычи и переработки урана [27, 30].

1.2. Сырьевая база урана в Центральной Азии

Основными источниками урана для атомной промышленности СССР во второй половине XX века стали республики Центральной Азии. Впервые крупные залежи урана были обнаружены в Таджикистане, а затем в Киргизии. Добыча велась как открытым, так и шахтным способом. Первым официальным решением, положившим начало созданию базы урановой промышленности СССР, явилось постановление Государственного комитета обороны от 27.11.1942 г., в постановлении была определена задача – на разведанных месторождениях Таджикской ССР организовать добычу урана.

Основанием для развития урановой промышленности СССР стало постановление Государственного комитета обороны от 27 ноября 1942 года, ко-

торым была поставлена задача организовать добычу урана на выявленных месторождениях Таджикистана. К концу 1940-х годов в Средней Азии были открыты значительные запасы урановых руд. Первоначально исследования в этой области курировались Министерством цветной металлургии СССР, но 8 декабря 1944 года, согласно постановлению ГОКО №7102, контроль над работами передали Народному комиссариату внутренних дел (НКВД), где для управления процессом создали Девятое управление. Позже, 15 мая 1945 года, в соответствии с постановлением ГОКО №8582сс/ов по распоряжению НКВД был учреждён Горно-химический комбинат № 6. В 1967 году он получил название Ленинабадский горно-химический комбинат, а с 1990 года стал известен как Производственное объединение "Востокредмет", который стал первым отечественным предприятием по добыче и переработке урановых руд в Средней Азии. Создание этого комбината ознаменовало рождение сырьевой отрасли атомной промышленности в СССР [13, 14].

Формирование системы управления урановым сырьём стало значительным этапом в развитии атомной промышленности СССР. На основании постановления ГОКО от 20.08.1945 г. за №9887сс/ов было создано Первое Главное управление (ПГУ) при Совете Министров СССР, которому было поручено как общее руководство развитием атомной промышленности, так и создание и укрепление сырьевой базы уранодобывающей промышленности. Принятие данного решения сыграло ключевую роль в институциональном становлении атомной промышленности как самостоятельной области народного хозяйства [13, 14, 27].

Ограниченные запасы природного урана требовали первоочередного развития уранодобывающих предприятий в Таджикистане. Максимальные капитальные вложения направлялись на строительство объектов Комбината № 6. Так, из 38 миллионов рублей, выделенных на развитие атомной отрасли в 1940 году, 12 миллионов рублей, или 30%, было инвестировано именно в Комбинат № 6. Ключевой акцент делался на геологоразведочные работы и добычу полезных ископаемых [13, 14].

К началу работы комбината № 6 в Таджикской ССР было известно о четырех урановых месторождениях – Адрасман, Табошар, Майлису и Уйгурсай, однако их геологическая изученность оставалась на низком уровне. В октябре 1945 года специалисты охарактеризовали их состояние как неудовлетворительное: несмотря на более чем десятилетнюю (с перерывами) разведку, изученность месторождений оставалась на низком уровне. Основные исследования проводились только в верхних зонах, а глубокие горные и буровые работы практически отсутствовали, что не позволяло точно оценить масштабы запасов.

На тот момент известные запасы месторождений Майлису и Адрасман впоследствии были полностью отработаны, однако в ходе дальнейших геологоразведочных работ запасы этих месторождений увеличились почти в четыре раза. Из-за слабой разведанности месторождений перед комбинатом встали сложные организационные задачи: требовалось одновременно обеспечивать текущее производство и расширять разведку. Эти задачи решались путем одновременного проведения детальной разведки, горно-капитальных, подготовительных и добычных работ, что позволило в сжатые сроки значительно увеличить запасы урана и создать устойчивую базу для дальнейшего развития комбината.

В дополнение к разведке известных месторождений комбинат №6 организовал поисковые работы в Карамазарских горах, Северной Фергане и Приташкентском районе. Работы велись Ферганской (1945-1947 гг.) и Красногорской (1948-1959 гг.) экспедициями, а также территориальными геологическими управлениями Узбекистана, Таджикистана и Киргизии. В 1946 году все поисковые геолого-разведочные партии были оснащены новым оборудованием – поиск залежей ураносодержащих руд стали осуществлять полевыми радиометрами (модели ВИРГ-47, ПР-5, ПР-6, ПР-7, ПР-12), что позволило полностью отказаться от устаревших способов работы, основывавшихся на массовом сборе образцов и их анализе с применением люминоскопического и электронноскопического методов.

Ферганская экспедиция достигла значительных результатов, обнаружив залежи урана на месторождениях Шакоптар и Майлисай. В это время Красногорская экспедиция активно проводила разведывательные работы на небольших залежах Восточного Карамазара, а в 1950-1951 годах провела геологоразведку месторождений Тарызкан, Джеркамар, Каракат и Аксай. В результате исследований разработаны рекомендации для Комбината № 6 по наиболее рациональному освоению месторождений и их дальнейшей эксплуатации. Несколько лет ранее, в 1948 году, Красногорская экспедиция значительно расширила географию геологических изысканий. Вместо локального изучения Северной Ферганы и Восточного Карамазара начались изыскательские работы на территории Чаткальского хребта, на его юго-западных участках. Одновременно геологи Узбекского геологического управления открыли месторождение Алатаньга, а в 1949 году - месторождение Каттасай. Эти открытия сделали Приташкентский район важным центром уранодобычи в Средней Азии и значительно расширили сырьевую базу Комбината № 6.

В 1949 году на месторождениях Алатаньга и Каттасай были созданы геологоразведочные партии, а в Приташкентском районе сосредоточены основные объёмы поисковых и разведочных работ. Открытию урановых месторождений в этом районе способствовали металлогенические исследования Е. Д. Карповой, чьи прогнозы легли в основу геологоразведочных работ Красногорской экспедиции. В последующие годы были открыты месторождения Чаули (1952 г.), Чаркасар (1953 г.), Майликатан (1954 г.), Ризак (1955 г.) и Джекиндек (1956 г.) [14, 27].

Соответственно, открытые месторождения урановых руд сыграли ключевую роль в становлении и развитии производства уранового концентрата в СССР. С начала 1980-х годов расположенный в г. Чкаловск Комбинат № 6 начал осуществлять масштабную переработку ураносодержащего сырья, ежегодно обрабатывая более миллиона тонн руды, добытой из месторождений на территории Таджикской ССР [29-31].

1.3. Состояние мировой ядерной энергетики

В этом подразделе проводится анализ значимости исходного компонента – U_3O_8 , с учётом текущего состояния атомной энергетики на глобальном уровне.

Начало развития ядерной энергетики было положено в 1954 году, когда в Советском Союзе заработала первая атомная станция, расположенная в городе Обнинске, мощностью всего 5 МВт. Позже в ряде стран началось строительство более мощных объектов. К 1980-м годам мировое сообщество насчитывало около 300 ядерных реакторов, мощность которых в совокупности равнялась около 200 ГВт (эл.), обеспечивая примерно 10 процентов объёмов электроэнергии в международном масштабе. Соответственно, за 25 лет мощности атомной энергетики возросли от 5 МВт до 200 ГВт. Настолько стремительный рост внедрения новой технологии трудно найти в истории энергетики. Эти высокие темпы развития были в значительной степени обеспечены государственными инвестициями, направленными на создание базы ядерных реакторов и топливного цикла, которые изначально развивались в рамках военных программ [30, 39, 44].

Ядерная энергетика прошла через три ключевых этапа развития. Первые коммерческие реакторы, созданные в 1950–1960-х гг., были основаны на военных технологиях, разработанных для судовых энергетических установок и производства материалов для ядерного вооружения, которые функционировали на основе трития и плутония. В 1970-х годах было внедрено новое – второе поколение реакторов, которое стало основой современных атомных станций. Большинство из них используют обычную воду в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя [52-54].

Тепловые ядерные реакторы расходуют природный уран неэффективно, поскольку лишь 1% его массы составляет изотоп U-235, способный к делению. В то же время 99% приходится на изотоп U-238, который не участвует в делительных процессах. Однако со временем U-238 преобразуется в плутоний, обладающий свойствами, необходимыми для дальнейших ядерных реакций.

Чтобы повысить эффективность использования ядерного топлива, отработанные материалы подвергаются переработке на специализированных предприятиях, где извлечённый плутоний становится сырьём для традиционных или бридерных реакторов.

Во многих странах разрабатывались технологии переработки ядерного топлива и создавались экспериментальные бридерные реакторы. Однако их эксплуатация оказалась экономически невыгодной, а значительный объём производимого плутония вызвал опасения, связанные с его потенциальным использованием для создания ядерного оружия. Это привело к сокращению или закрытию большинства проектов, связанных с переработкой топлива и развитием бридерных реакторов [55, 56].

Соединённые Штаты прекратили строительство новых атомных станций в 1970-х гг. В то же время Франция сделала значительные инвестиции в развитие ядерной энергетики, построив 58 атомных станций. На сегодняшний день Франция получает до 78% электроэнергии за счёт атомной энергетики, в то время как доля атомной энергетики в США составляет приблизительно 20% от общей выработки электроэнергии [44].

Снижение темпов строительства новых атомных электростанций началось в 1990-х годах. Некоторые развитые страны, такие как Бельгия, Германия и Швеция, приняли политику постепенного отказа от атомной энергетики. Австрия, Дания и Ирландия также заявили о намерении не развивать этот сектор. Негативное отношение к ядерной энергетике сформировалось в основном из-за масштабных аварий на таких объектах, как "Три-Майл-Айленд" (США), Чернобыльская АЭС (СССР) и Фукусимская АЭС (Япония), которые продемонстрировали недостаточный уровень безопасности первых поколений реакторов. Однако, несмотря на кризис в 1990-х годах, ядерная энергетика сохранила свое место среди ключевых источников энергии. Современная ядерная энергетика обладает уникальным опытом, накопленным за более чем 12 000 реакторо-лет эксплуатации. На сегодняшний день около 500 атомных энерго-

блоков, действующих в 34 странах, обеспечивают приблизительно 18% мирового производства электроэнергии. Этот показатель оставался неизменным с 1986 года, отражая стабильное развитие атомной энергетики в соответствии с глобальными темпами роста энергопотребления. В последние десятилетия рост производительности атомных станций обеспечивался не столько строительством новых объектов, сколько оптимизацией функционирования уже существующих энергоблоков, что стало возможным благодаря значительному улучшению технологий безопасности. Именно эти факторы сделали атомные станции надёжным и ценным элементом мировой энергетической системы. Хотя строительство АЭС требует крупных начальных финансовых вложений, их расходы на эксплуатацию остаются экономически выгодными и относительно стабильными [44, 58].

Современные разработки в области реакторных технологий ориентированы на повышение уровня безопасности, снижение выбросов радионуклидов в окружающую среду и продление срока эксплуатации АЭС. В ходе интенсивных исследований были разработаны реакторы третьего поколения, которые обладают усовершенствованными механизмами предотвращения аварий, усовершенствованными системами защиты, и рассчитанные на эксплуатацию сроком до 60 лет.

В 2004 году в Обнинске состоялась конференция МАГАТЭ, которая посвящалась 50-летию развития атомной энергетики и её будущим перспективам под названием "50 лет ядерной энергетике – следующие 50 лет". В рамках указанной конференции было подчёркнуто, что энергетическая отрасль достигла высоких показателей, продолжая оставаться фундаментальной частью инфраструктуры в обеспечении электроэнергией многих государств. Так, в Южной Корее, Украине, европейских странах - Бельгии, Словакии, Швеции, атомные электростанции генерируют более половины всей электроэнергии. До закрытия одного из энергоблоков Игналинской АЭС в 2004 году Литва, как и Франция, получала до 80% своей энергии из атомных источников.

По данным Всемирной ядерной ассоциации (WNA), в международном масштабе в настоящий момент ведётся строительство порядка 30 новых атомных энергоблоков. Предполагается, что к 2030 году суммарная мощность этих объектов достигнет примерно 570 ГВт [44, 53, 57].

Критический анализ развития мировой ядерной энергетики показывает, что её будущее неразрывно связано с решением двух ключевых задач: обеспечение долгосрочной энергетической безопасности экономически приемлемым способом и предотвращение распространения ядерного оружия. Важно отметить, что современная ядерная энергетика обладает высокой степенью эксплуатационной безопасности, что делает её надежным источником энергии для мирового сообщества [54-56, 58].

1.4. Радиоактивные отходы Таджикистана: проблемы и решения

1.4.1. Радиоактивные хвостохранилища Таджикистана

Сотрудники АХБРЯБ НАНТ в своих исследованиях детально изучили состояние хвостохранилищ, а также рассмотрели возможности повторной переработки отходов, образовавшихся в процессе уранодобычи и связанных с этим производств [59-67]. В этих работах рассматриваются история формирования урановых хвостохранилищ в Таджикистане, масштабы радиоактивного загрязнения, их характеристики, текущее состояние и перспективы повторной переработки. Также анализируются экологические аспекты воздействия хвостохранилищ на окружающую среду. Приведены химический и минералогический состав отходов, а также исследования почвы, воды и других загрязнённых территорий.

В работе [59] детально изучен состав хвостохранилищ Таджикистана, представлены паспорта всех объектов хранения отходов и рассмотрены возможные способы их утилизации. Хакимов Н. и соавторы [60, 61] разработали физико-химические и технологические основы извлечения урановых концентратов из отходов урановой промышленности.

В материалах международного семинара «Урановое наследие СССР в Центральной Азии» [64] рассмотрены актуальные проблемы и предложены решения, касающиеся хвостохранилищ Таджикистана. В исследовании [65] оценивается экологический риск, связанный с переработкой отходов Гафуровского хвостохранилища, а в работе [66] детально описан механизм переработки урановых отходов.

Анализ данных исследований [68-70] показывает, что наиболее перспективным объектом для вторичной переработки является хвостохранилище «Карты 1-9» в городе Бустон. Концентрация урана в его отходах оценивается в среднем на уровне 0,019% [59, 68, 69].

В рамках анализа, представленного в исследовании [68], подробно рассмотрен процесс извлечения соединения U_3O_8 из материалов хвостохранилища "Карты 1-9". Минералогический анализ отходов, отображённый на рисунке 1.2, показал, что основная часть состава представлена кварцем (69,4%), а содержание урана в хвостах находится на уровне 0,018%.

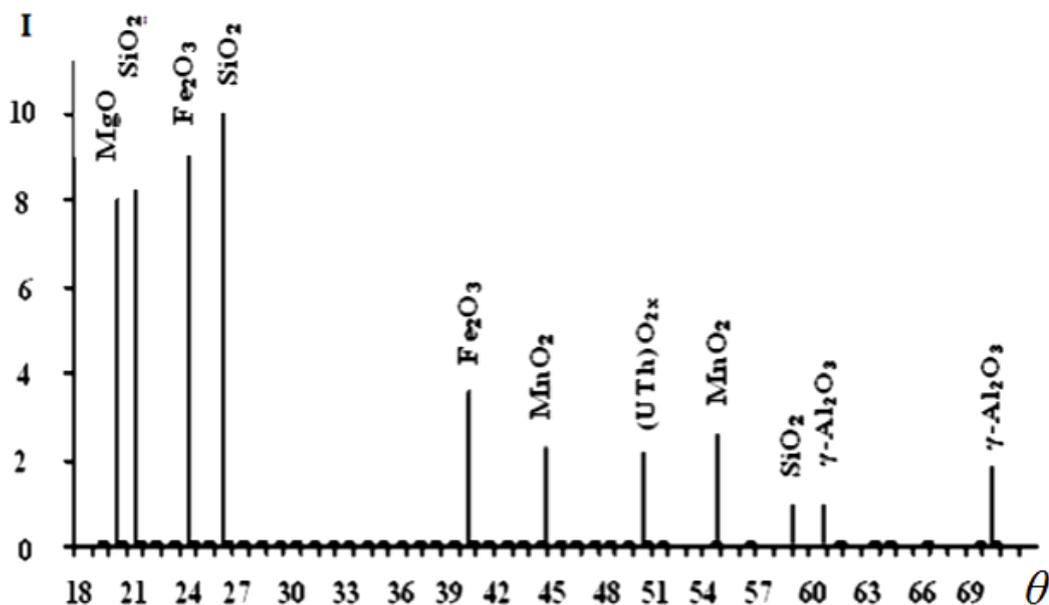


Рисунок 1.2 - Штрихдифрактограммы проб, отобранных из Бустонского хвостохранилища

Поскольку отходы техногенного месторождения «Карта 1-9» преимущественно состоят из кварца (69,4%), для их переработки применялось кислотное

выщелачивание. Лабораторные исследования по степени вскрытия руды и извлечения урана в раствор представлены в таблице 1.2.

Анализ данных, представленных в таблице 1.2, показывает, что при сернокислотном вскрытии хвостов с содержанием урана 0,008-0,021% степень перехода урана в раствор достигает 93,85%. Это объясняется высокой растворимостью урана в серной кислоте, а также длительным нахождением хвостового материала в щелочной среде, что способствует облегчённому извлечению урана без дополнительного измельчения.

Таблица 1.2 - Влияние расхода серной кислоты на извлечение урана при выщелачивании ($U=0,018\%$, $t=20^\circ\text{C}$, $\tau=10$ ч)

Соотношение Т:Ж=1:1		Соотношение Т:Ж=1:2	
расход H_2SO_4 , кг/т	извлечение урана в раствор, %	расход H_2SO_4 , кг/т	извлечение урана в раствор, %
60	20	60	23
90	24	90	26
100	31	100	35
110	37	110	40
120	39	120	43
130	41	130	48
180	46	180	54
350	55	350	61

Кинетика разложения отходов хвостохранилища "Карты 1-9" при оптимальном расходе серной кислоты 180 кг/т была изучена в изотермических условиях в диапазоне температур 293 – 353 К. Эксперименты проводились с выдержкой пульпы в течение 10 часов в термостатированном реакторе [68-74].

На основе обработки кинетических кривых автором [68] была определена энергия активации процесса, составляющая 6,0 кДж/моль, что свидетельствует о протекании реакции в диффузионной области.

Исследования [68-76] демонстрируют высокий потенциал переработки отходов уранодобывающей отрасли, что наглядно можно увидеть на примере хвостохранилища "Карты 1-9". По результатам данных исследований была разработана оптимизированная схематическая технология, направленная на переработку таких отходов, представленная на рисунке 1.3 [68, 69].

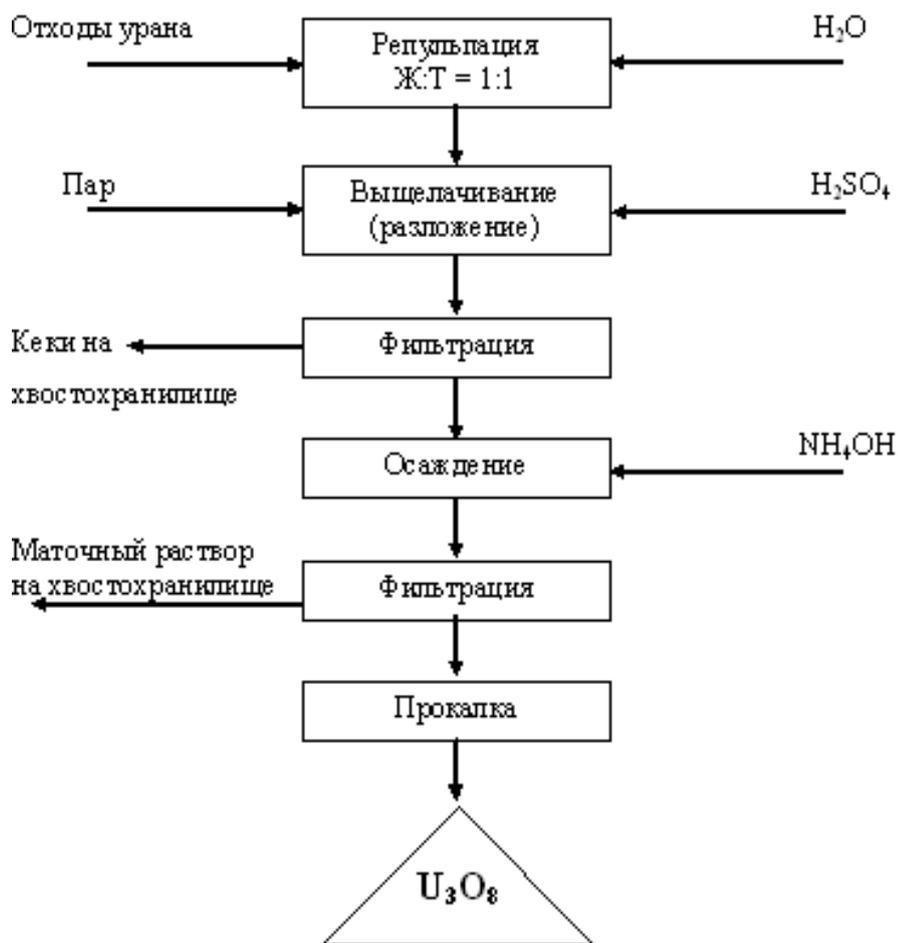


Рисунок 1.3 – Оптимизированная схематическая технология для переработки отходов уранового производства

В исследовании [69] изучена возможность извлечения урановых концентратов из материалов хвостохранилищ города Истиклол. Анализ включал изучение инженерно-геологических характеристик отходов, а также содержание радионуклидов. Установлено, что отходы обладают низкой радиоактивностью и могут быть эффективно переработаны для получения U_3O_8 [65, 66].

Исследования выявили, что переработка отходов возможна без использования этапов дробления, измельчения и сгущения, что значительно упрощает всю технологическую схему процесса. При этом выход концентрата урана превышает 90%. Оптимальные условия для извлечения урана в форме U_3O_8 из отходов были успешно установлены в [77, 78].

На основе проведённого анализа разработан схематический технологический процесс переработки, а также осуществлены вычисления его экономической эффективности [76].

Работы [60, 62, 63, 69] систематизируют основные проблемы переработки отходов урановой промышленности. В них изучена кинетика разложения урановых отходов и разработана технологическая схема переработки, с выявлением основных технологических стадий: подкисление, сорбцию, обжиг, разложение, сгущение, фильтрацию и высушивание конечного соединения.

Ключевым отличием предложенной схемы переработки является использование известняка для нейтрализации избытка кислоты до осаждения диураната аммония из десорбата. Это инновационное решение позволяет значительно снизить расход аммиачного раствора. На этапе осаждения урана эффективность извлечения достигает 99% [60, 62, 69].

Таким образом, исследования сотрудников Агентства по ХБРЯ безопасности НАН Таджикистана [59-71] подтверждают возможность вторичной переработки отходов урановой промышленности. Установлены оптимальные параметры процесса выщелачивания, определены кинетические и энергетические характеристики переработки хвостов, а также рассчитана энергия активации при различных температурах.

1.4.2. Радиоактивные почвы Таджикистана

Анализ почв вокруг хвостохранилищ показал наличие определённого количества радиоактивных веществ. Наибольшую радиоактивность продемонстрировал так называемый «Рудный двор», куда поступала урановая руда с различных месторождений бывшего СССР для дальнейшей переработки на гидromеталлургическом заводе (ГМЗ) «Востокредмет». Ежегодно комбинат в Чкаловске перерабатывал более 1 миллиона тонн руды, что привело к радиоактивному загрязнению почвы вокруг ГМЗ и рудного двора. Однако уровень радиационного фона в этих районах остается в допустимых пределах – до 0,6 мкЗв/час, что требует проведения дезактивационных мероприятий.

Наиболее загрязнённой оказалась почва месторождения Киик-Тал. Анализ седиментационных остатков выявил значительное накопление супесчаных почв. Супесчаные почвы представляют собой рыхлые горные породы, обладающие высокой способностью к сорбции урана.

Анализ, представленный в исследованиях [79-83], подробно раскрывает физико-химические особенности процесса извлечения U_3O_8 из супесчаных почв. Авторы изучили влияние минерального состава почвы на механизмы иммобилизации урана, а также изучили закономерности его геохимического распределения - от верхних почвенных горизонтов до донных отложений.

Работы [79, 81] уделяют внимание кинетике разложения урансодержащих супесчаных почв методом выщелачивания. Энергия активации, рассчитанная для данного процесса, составляет 16 кДж/моль, то есть реакции протекают в условиях, подчиняющихся диффузионным закономерностям.

В таблице 1.3 систематизированы основные кинетико-энергетические параметры, описывающие водную обработку супесчаных почв месторождения Киик-Тал, расположенного на территории Таджикистана. Эти данные позволяют оценить эффективность процесса и выявить факторы, влияющие на динамику уранового извлечения.

Таблица 1.3 – Влияние водной обработки на кинетико-энергетические характеристики супесчаных почв с ураном (месторождение Киик – Тал, Таджикистан)

Тем-ра водного раствора	Истинная скорость растворения в процессе U (%/минуту)	Энергия активации (E, кДж/моль)
333 К (~60°C)	0,9	16
313 К (~40°C)	0,59	
293 К (~20°C)	0,36	

Разработана оптимизированная схематическая технология по извлечению из состава супесчаных почв урана, в которой использован сорбент АМ(п) (рисунок 1.4) [79, 82].

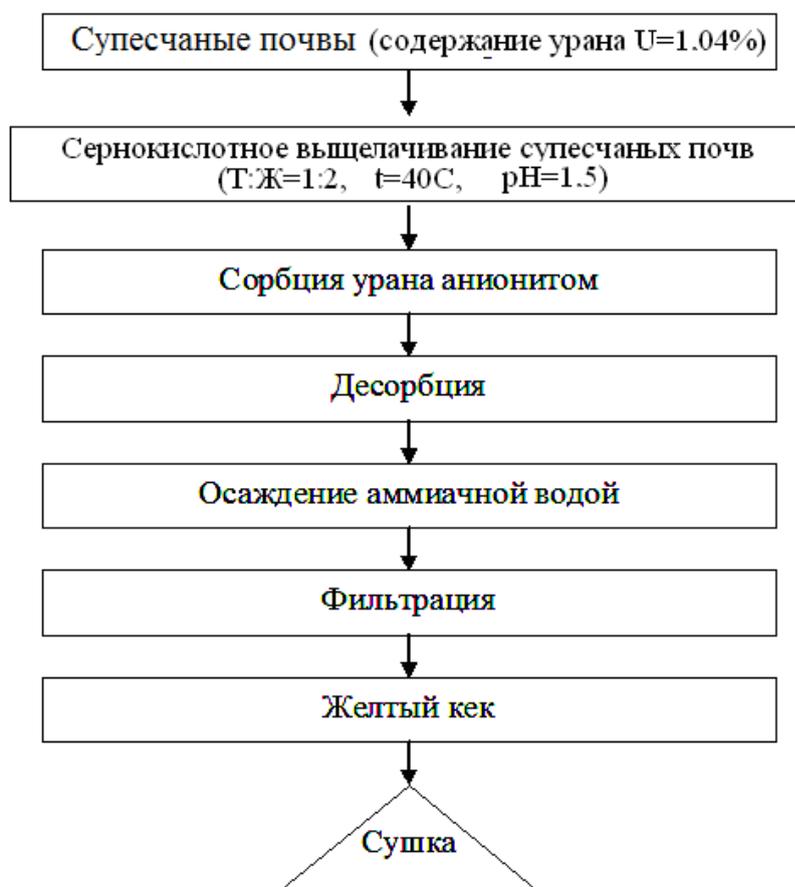


Рисунок 1.4 - Принципиальная технологическая схема извлечения урана из супесчаных почв

Химический состав почв является крайне неоднородным, что приводит к значительным различиям в концентрации радионуклидов в зависимости от местоположения. Эти различия особенно выражены для различных урановых хвостохранилищ.

В исследованиях Тиллобоева и его коллег [84, 85] изучены процессы миграции радионуклидов в системе «хвостохранилище – почва – растение». В работах описаны механизмы распространения радионуклидов в почвах, окружающих хвостохранилища. Данные о миграции радионуклидов с использованием гидрохимических методов для оценки экологической ситуации представлены в исследованиях [86, 87].

В рамках исследований [88, 89] был выполнен подробный анализ геохимического состояния природной среды, уделяя особое внимание механизмам миграции радионуклидов. Дополнительно, работы [90-94] сосредоточены на изучении уровня естественных радионуклидов в почвах, находящихся вблизи хвостохранилищ, а также на оценке экологических рисков, связанных с урановыми отходами.

1.4.3. Радиоактивные урансодержащие воды Таджикистана

Высокий уровень загрязнения окружающей среды во многом связан с деятельностью объектов ядерной энергетики и химической промышленности. Присутствие радиации в воде, используемой для хозяйственных, бытовых и производственных нужд, определяется совокупностью природных и техногенных факторов. Существенное превышение допустимых концентраций радионуклидов в воде негативно сказывается на здоровье человека и может привести к серьёзным заболеваниям.

Радиационное загрязнение природных источников водоснабжения обусловлено способностью некоторых элементов к спонтанному распаду. В естественных условиях содержание радионуклидов в воде безопасно, однако при превышении допустимых концентраций возрастает риск развития патологий.

Нормативные значения допустимого содержания радионуклидов устанавливаются специальными регламентами, а контроль качества воды осуществляется с использованием специализированных методик. Для удаления опасных примесей применяются фильтрующие установки, работающие на различных физических принципах [95, 96].

Источники ионизирующего излучения могут иметь разное происхождение, но все они обладают способностью ионизировать вещество. Содержание радионуклидов (неустойчивых изотопов) в воде определяет уровень её загрязнённости. Исследования показывают, что химические элементы, обладающие радиационной активностью, могут проникать в подземные и поверхностные источники воды, особенно в районах с высокой техногенной нагрузкой.

По уровню облучения природные радионуклиды в воде занимают четвертое место среди факторов воздействия на человека, составляя до 14% от общей накопленной дозы радиационного воздействия [97, 98].

В ряде научных трудов и монографий [99-102] подробно описано состояние водных экосистем и наличие радионуклидов в воде, проведена комплексная оценка качества поверхностных вод. В исследовании [103] изучен мониторинг миграции урана и радона в водной среде. В Соросовском образовательном журнале [104] представлены данные по экологическому мониторингу водных систем с участием радионуклидов. Формы миграции радионуклидов в пресных водах рассмотрены в работе [105]. Особенности присутствия тяжёлых металлов в водных экосистемах исследованы в работах [106, 107].

В исследованиях [108-114] изучены источники загрязнения реки Сырдарья и Кайракумского водохранилища радионуклидами. Проведён радионуклидный мониторинг на берегах Кайракумского водохранилища, дана оценка экологической ситуации вокруг водоёма, а также изучено качество поверхностных вод реки Сырдарья в пределах Согдийской области Таджикистана. В исследованиях Разыкова и соавторов [115-121] детально рассмотрены

характеристики воды бассейна Сырдарьи, выявлено содержание тяжёлых металлов и радионуклидов, а также изучено влияние донных отложений на формирование качества воды.

Ряд исследований [122-124] посвящён вопросам регулирования качества воды в соответствии с международными стандартами и нормативными требованиями. В работах [125, 126] проанализировано содержание различных радионуклидов в искусственном озере, расположенном на территории города Истиклол. В ходе работ детально рассмотрены механизмы, по которым осуществляется миграция урана в системе "дренажные воды-почва", затрагивающая территории вокруг хвостохранилищ 1 и 2 города Истиклол.

Исследования Гиллобоева и соавторов [127-132] были посвящены изучению биогенных изотопов урана в водных объектах Таджикистана. Проведена оценка качества воды вблизи хвостохранилищ и водохранилищ, исследована миграция радионуклидов в воде с измерением концентрации радона, а также предложено использование подземных вод как индикатора состояния водных объектов.

Качество воды реки Зеравшан исследовано в работе [133], а состояние родников горного массива Моголтау – в исследовании [134]. В сборнике научных трудов Агентства по ХБРЯ безопасности Национальной академии наук Таджикистана [135] представлена технология очистки урансодержащих шахтных и дренажных вод. В исследовании [136] дана характеристика почвенных вод хвостохранилищ Таджикистана. В работах [137-140] предложены технологические методы очистки воды от радионуклидов, изучены особенности удаления урансодержащих загрязнений из водных объектов [141]. Экологические аспекты извлечения урана из вод месторождений Таджикистана рассмотрены в материалах конференции «Сахаровские чтения – 2007» [142]. В работах [143, 144] исследованы сорбционные свойства скорлупы урюка для очистки урансодержащих вод.

1.4.4. Очистка урансодержащих вод Таджикистана

Для очистки урансодержащих вод применяются различные методы. Одним из наиболее простых и доступных является использование фильтрующих материалов с соответствующими сорбентами.

Исследования [59, 69, 71, 73] предоставляют обширную информацию о физико-химических принципах извлечения урановых концентратов из вод с содержанием урана на территории Таджикистана. В рамках этих работ представлена оптимизированная схематическая технология для очистки указанных вод, в которой в качестве сорбентов используются местные сорбирующие материалы. Также в работе [141] подробно исследовано извлечение из шахтных вод месторождения Киик – Тал урансодержащих соединений в форме оксида урана U_3O_8 .

Согласно данным [59, 69, 71], шахтные воды, поступающие из штольни месторождения Истиклол, характеризуются стабильным объёмом потока в 40 м³/час, при этом концентрация урана колеблется в пределах от 0.01 до 0.07 г/л. Аналогичные процессы наблюдаются и в шахтных водах, вытекающих из месторождения Киик – Тал, то при примерно одинаковых объёмах потоков содержание урана здесь значительно более высокое, достигает 0.025-0.03 г/л. Эти данные доказывают, что из таких вод получение U_3O_8 является целесообразным [144-147].

Также проведено исследование кинетики сорбции урана из шахтных и технологических вод с применением местных сорбционных материалов, включая сорбент на основе скорлупы абрикосовых косточек. Экспериментальные результаты позволили определить оптимальные параметры для эффективного извлечения урана.

Разработана современная технологическая схема по выделению из шахтных и производственных вод урана. Данный метод включает многоэтапный процесс, направленный на максимальное извлечение урана с минимальными потерями. Основные стадии технологии: коррекция рН среды (подкисление),

сорбционная очистка, термическая обработка (обжиг), химическое выщелачивание, осаждение соединений – формирование осадка урановых солей для последующего выделения, фильтрация – удаление примесей и повышение чистоты целевого вещества, финальная сушка – стабилизация полученного концентрата урана. Предложенная технология представлена на рисунке 1.5 [145–147].



Рисунок 1.5 - Оптимизированная схематическая технология сорбции урана из ураносодержащих вод с использованием сорбента - скорлупы абрикосовой косточки

Предварительный анализ технико-экономической эффективности, проведённый авторами в [69], показывает, что внедрение разработанной технологической схемы переработки шахтных и промышленных вод обеспечит экономическую выгоду, которая составит 119146 \$.

Исследования, направленные на извлечение урана и урановых концентратов из этих вод, подтверждают возможность успешного использования местных сорбционных материалов в качестве сорбентов для получения концентратов урана [69, 71].

Согласно данным [71], в составе дренажных вод концентрации урана могут достигать значений до 0.07 граммов на 1 литр. На берегах ручьев в летний период наблюдается образование кристаллических структур характерного жёлтого цвета, представляющих собой скопления кристаллогидратов уранилсульфата. Этот процесс визуально продемонстрирован на изображении 1.6.



Рисунок 1.6 - Кристаллы кристаллогидратов сульфатов уранила, сформированные вдоль ручьев из дренажей хвостохранилища г. Истиклол

Исследования [69, 71] представляют собой всесторонний анализ экологической обстановки водных ресурсов города Истиклол. В ходе этих исследований были проведены измерения концентрации урана в восьми пробах, отобранных из хвостохранилищ № 1–2. Итоговые данные сведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты исследования проб, взятых из хвостохранилищ № 1-2 города Истиклол

Номера проб							
1	2	3	4	5	6	7	8 (кристаллы)
Радиационный фон, мЗв/ч							
$4.2 \cdot 10^{-4}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$5.3 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$6.2 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$11.3 \cdot 10^{-4}$
Содержание U_3O_8 урана в пробах (по данным спектрального анализа (%))							
$4.7 \cdot 10^{-2}$	$12.0 \cdot 10^{-2}$	$11.0 \cdot 10^{-2}$	$9.5 \cdot 10^{-2}$	$5.1 \cdot 10^{-2}$	$9.1 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$54.0 \cdot 10^{-2}$
Содержание U_3O_8 урана в пробах (по данным химического анализа (%))							
$7.4 \cdot 10^{-2}$	$17.9 \cdot 10^{-2}$	$9.7 \cdot 10^{-2}$	$14.7 \cdot 10^{-2}$	$7.0 \cdot 10^{-2}$	$13.7 \cdot 10^{-2}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$54.0 \cdot 10^{-2}$

Дополнительно, работы [148-159] сосредоточены на сравнительном анализе сорбционных свойств различных местных материалов, включая шишки арчи, сосны, а также скорлупу орехов и скорлупу косточек абрикоса, с целью определения их эффективности в извлечении урана.

Анализ сорбционной способности исследованных сорбентов выявил, что шишки арчи обладают значительным потенциалом в поглощении веществ. Однако процесс их полной активации занимает значительно больший промежуток времени сравнительно с другими сорбентами природного происхождения, достигая приблизительно 90 дней [160]. Графическое представление этих данных приведено в рисунках 1.7 и 1.8.

Исследования показали (рисунок 1.8), что за 90 дней скорлупа косточек абрикоса превосходит другие растительные сорбционные материалы по поглощению урана. Сорбционная способность указанного сорбента существенно превосходит результаты, полученные при использовании других сорбентов - скорлупы грецкого ореха, шишек сосны и шишек арчи.

На основании экспериментальных данных, полученных в пилотных испытаниях, проведённых для очистки шахтных вод месторождения Киик-Тал, исследователи [157] разработали и создали опытно-промышленную установку, эффективно удаляющую загрязняющие вещества из указанных вод.

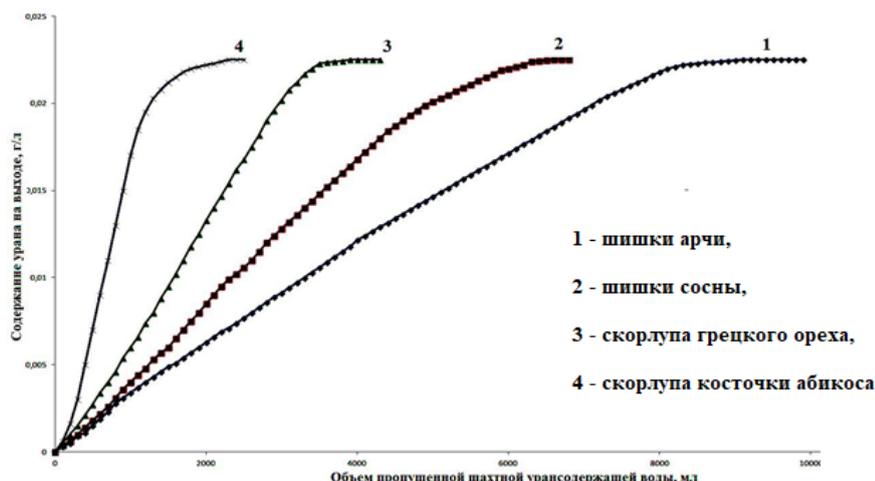


Рисунок 1.7 - Зависимость эффективности извлечения урана от объема воды, проходящего через различные растительные сорбенты

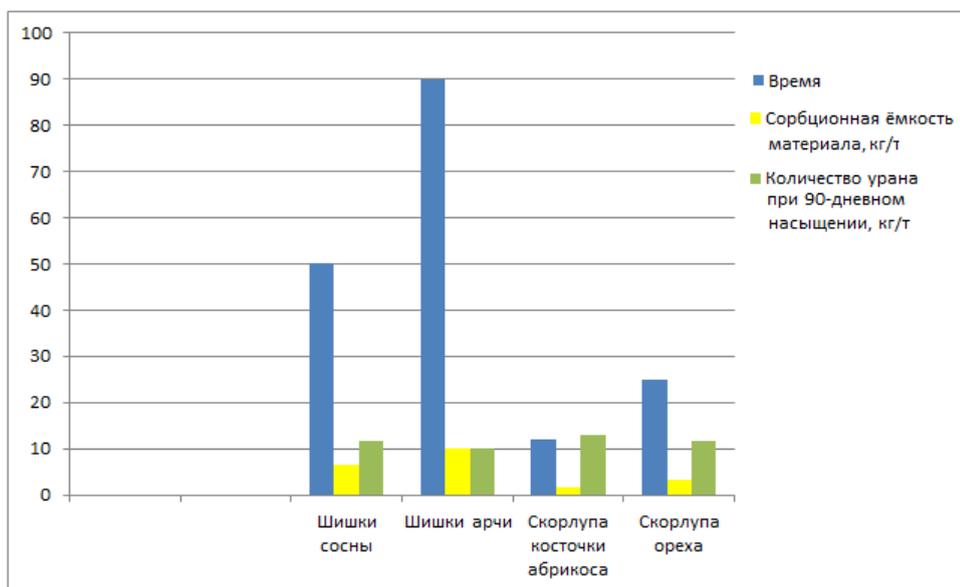


Рисунок 1.8 - Сравнительная характеристика сорбционных свойств растительных сорбционных материалов в сорбировании на них урана

1.5. Переработка урановых руд на примере месторождений Таджикистана

Наркомцветмет СССР в 1930-х гг. инициировал разработку технологий переработки урановых руд, с целью получения высокочистых урановых концентратов и соединений радия [13, 14], обеспечив фундамент для дальнейших исследований и совершенствования методик извлечения радиоактивных элементов.

В 1936 году на урановом месторождении Табошар (Таджикская ССР) была создана база, в состав которой вошли два объекта - небольшой рудник и компактный перерабатывающий цех. Производственная мощность объекта составляла ежедневно от 6 до 8 тонн урановой руды, а конечная продукция включала концентраты урана с содержанием 7–10% и особо чистые радиевые соли. Но в Советском Союзе урановые концентраты не нашли практического применения, а процесс производства радиевых солей оказался финансово невыгодным. В итоге, в 1940 г. работа рудника и перерабатывающего цеха была прекращена, а оборудование законсервировано [161].

В 1941 году завод "В" Главредмета СССР, ранее специализировавшийся на производстве соединений висмута, стронция и люминесцентных составов, был эвакуирован в город Табошар (нынешний Истиклол) [161]. В 1943 г. предприятию было поручено вновь расконсервировать месторождение Табошар и добывать и перерабатывать урановую руду. Когда был введен в эксплуатацию Комбинат № 6, завод "В" перерабатывал в среднем ежедневно 9-15 тонн руды. Производственные здания были выполнены из глинобита, а оборудование отличалось примитивностью. Большая часть технологических операций, включая переработку руды, выполнялась рабочими комбината вручную [67, 161].

После основания Комбината № 6 в 1945 году на территории Табошарского рудника начал функционировать опытный завод № 3, предназначенный для получения уранового концентрата с массовой долей 40% и его последующей переработки в технический U_3O_8 . В основе применяемой технологии лежал процесс кислотного-содового выщелачивания, обеспечивающий эффективное извлечение урановых соединений. Заключительная стадия предполагала осаждение целевого продукта, где использовался раствор каустической соды для стабилизации выделенных веществ и повышения их концентрации. Эта методика оставалась актуальной на протяжении многих лет, благодаря высокой степени извлечения урана и технологической простоте. В 1945 году предприятие достигло суточной производственной мощности 40 тонн урановой

руды, однако коэффициент извлечения урана составлял не более 40%. На начальном этапе технологический процесс отличался низким уровнем автоматизации. Руда сначала измельчалась в шаровой мельнице, после чего её вручную перемещали в специализированные реакционные ёмкости, где происходила кислотная обработка. В процессе химической реакции использовалась сода, которая помогала нейтрализовать нежелательные примеси и повысить степень очистки полученного концентрата. Далее выщелоченные пески отделялись в бетонных отстойниках, а полученный ураносодержащий концентрат проходил сушку в металлических противнях над открытым пламенем. Спустя некоторое время после запуска завода № 3 было принято решение о его модернизации. Одним из ключевых изменений стало внедрение мокрого измельчения руды вместо традиционного сухого метода. Благодаря этому подходу удалось снизить уровень пылеобразования, улучшить равномерность фракционного состава, а также минимизировать потери урановых соединений [162].

Параллельно с модернизацией производственных объектов проводились исследования способов предварительного обогащения урановой руды, что позволило сосредоточиться только на обработке кондиционного материала. Были разработаны и внедрены радиометрические сортировочные установки (РКС), работающие по принципу кусковой сортировки руды, которые размещались непосредственно на рудниках [67, 161-163].

В 1953 году на заводах Комбината впервые в Советском Союзе была внедрена технология очистки уранового концентрата с использованием углеаммонийного метода, позволившая получать уран в виде U_3O_8 . Благодаря внедрению этой новаторской методики уровень извлечения урана из руды достиг значительных 79,4% к концу года. Такой прогресс стал возможным благодаря ряду технологических усовершенствований, включая контроль концентрации двух- и трёхвалентного железа в растворах, поддержание высокой карбонатности среды, интенсивное перемешивание пульпы во время выщелачи-

вания, а также другим методическим модификациям. В [13] авторами подробно описывается данная технология, обеспечившая эти показатели (рисунок 1.9).

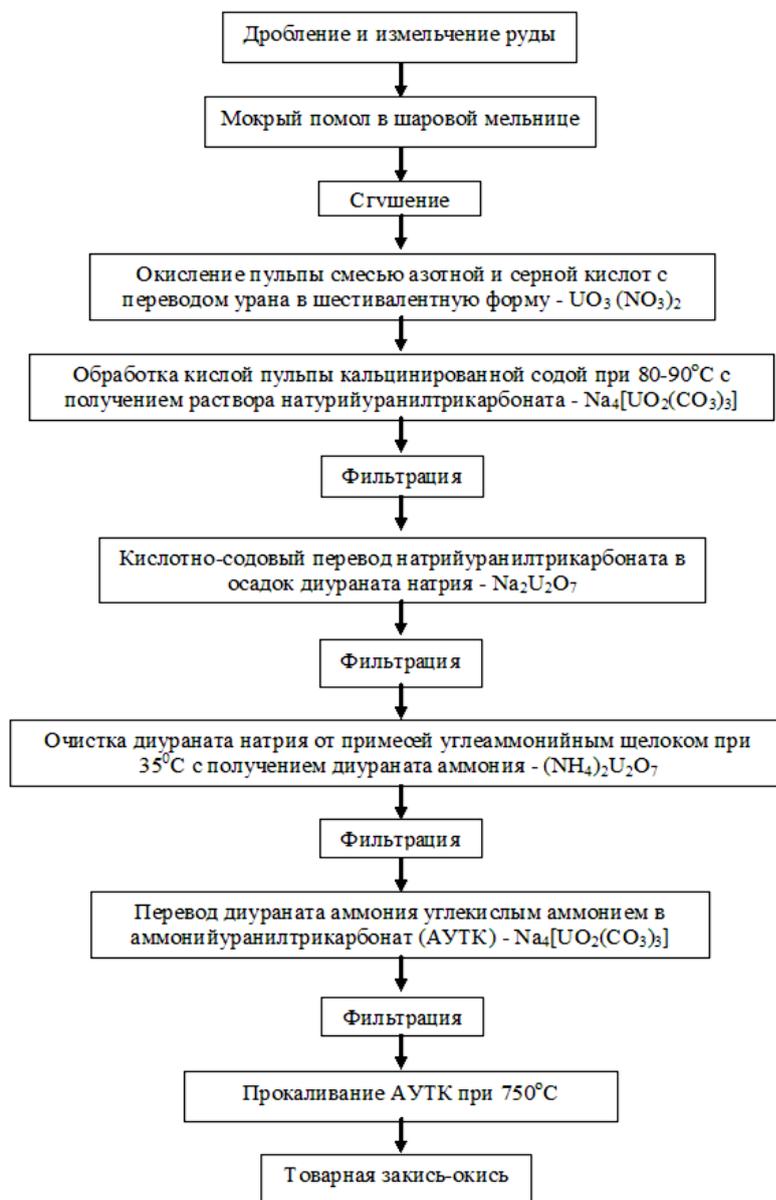


Рисунок 1.9 – Основные этапы переработки ураносульфидных руд и получения U_3O_8 : кислотно-содовая технология

Технология, представленная схематически на рисунке 1.9, много лет являлась ключевой в обработке урановых руд, пока не была прекращена подземная добыча на месторождениях Таджикистана – Адрасманском, Табошарском, Октябрьском, Тарызкан, Каракат. С течением времени атомная промышлен-

ность предъявила более строгие требования к чистоте производимого уранового соединения (U_3O_8), что привело к разработке и внедрению новых технологий его извлечения и концентрирования [14, 161].

В 1960–1970-х годах были внедрены усовершенствованные технологии, среди которых сорбционное извлечение урана из растворов, остающихся после кислотного выщелачивания руды, а также экстракционное извлечение из десорбционных растворов. В указанный период была разработана инновационная технологическая схема (рисунок 1.10).

Успешное применение метода кучного выщелачивания урана послужило основанием для принятия решения о проектировании и строительстве специализированной перколяционной фабрики, получившей название Фабрика бедных руд (ФБР). Основное назначение этого объекта заключалось в переработке низкосортных и забалансовых руд, добываемых открытым способом с поверхности месторождений [164–177].

В 1960-х годах на Ленинабадском горно-химическом комбинате была внедрена новая технология - так называемая технология подземного выщелачивания урана, что позволило существенно сократить затраты на добычу — до 15–20%. Успешность данной методики способствовала её активному распространению на ведущие урановые месторождения Казахской и Узбекской ССР, которые также входили в структуру Ленинабадского комбината. В результате обогащённые растворы, полученные на рудниках № 5 и № 6, отправлялись в железнодорожных цистернах в Чкаловск, где проходили переработку на гидрометаллургическом заводе. На заключительной стадии уран извлекался и превращался в закись-окись урана, готовую для дальнейшего применения.



Рисунок 1.10 – Схематическая технология получения U_3O_8 , включающая извлечение серной кислотой, сорбционное концентрирование и экстракционную очистку товарного продукта

Одновременно была разработана сорбционная колонна напорного типа (СНК), пришедшая на смену устаревшим устройствам типа "пачуки". Новое оборудование, внедрённое в промышленном цикле на Ленинабадском горно-химическом комбинате, обеспечило повышение эффективности технологического процесса [166-168].

Главное техническое отличие колонны СНК заключалось в исключении механического перемешивания ионообменной смолы на стадии сорбции, а также в наличии функции периодической замены части смолы, насыщенной ураном. Рабочий процесс был организован таким образом, что урансодержащий раствор подавался под давлением в нижний отсек колонны и проходил вверх через "уплотнённую" массу смолы. В результате смола насыщалась ураном снизу вверх, а очищенный раствор отводился через верхнюю дренажную систему. При этом приблизительно 30% уранонасыщенной смолы периодически заменяли новой порцией, поступающей из дополнительной ёмкости.

В качестве сорбционного материала в этой технологии применялась ионообменная смола марки АМ(п). Перед поступлением в колонну растворы проходили этап предварительного отстаивания для удаления примесей. Экстракция урана выполнялась при помощи сернокислого раствора, который после этого направлялся на дальнейшую переработку для получения конечного продукта - U_3O_8 [161, 172].

Гидрометаллургические заводы по переработке урана в бывшем СССР специализировались на обработке монометаллических руд из Приташкентского региона, а также карбонатных руд месторождения "Восток", расположенном на территории Казахстана. Технологический процесс основывался на сернокислотном выщелачивании, после которого переработка пульпы проводилась с использованием сорбционно-бесфильтрационного метода, применяя ионообменный катионит марки СГ – 1. Для очистки урана из сернокислых десорбционных растворов использовалась экстракционная технология, основанная на смеси жирных спиртов ($C_{10}-C_{12}$), очищенного керосина и триалкиламина. В качестве конечного продукта указанные заводы производили уран в

виде U_3O_8 , с содержанием урана 84%. Получение продукта обеспечивалось прокалкой кристаллов ураниламмонийтрикарбоната [161, 172].

На заводе использовался двухэтапный процесс извлечения урана, который позволял повысить эффективность переработки и сократить время обработки сырья. В начале измельчённую руду разделяли на две части: мелкодисперсную (иловую) и крупнофракционную (песчаную). На первом этапе весь объём кислотного реагента направлялся на интенсивную обработку мелкодисперсной фракции, продолжавшуюся 7–8 часов. Затем полученную массу объединяли с крупными частицами руды, где дальнейшее растворение происходило благодаря остаточной кислотности, данная стадия имела длительность 5–6 часов. Такая технологическая схема позволила значительно увеличить производительность завода и улучшить показатели качества переработки руды [67, 167].

На этапе предварительной подготовки перед основной стадией измельчения использовалась сортировочная установка, предназначенная для промывки и удаления мелких примесей из руды. После среднего дробления частицы размером $-70+30$ мм поступали на радиометрическую систему обогащения, где отходы направлялись в отвалы, а концентрированный материал проходил дальнейшее измельчение. Одностадийно измельчённая минеральная суспензия поступала в спиральные сепараторы, которые разделяли её на крупнофракционный компонент (песчаная фракция) $(+0,1$ мм) и тонкодисперсную массу (иловая фракция) $(-0,1$ мм). Осадочная фракция из сепараторов направлялась в гидроциклоны, где верхний поток подавался в загустители, а нижний смешивался с уплотнённым материалом и поступал на процесс выщелачивания [168–172].

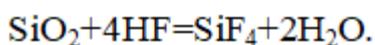
Во время процесса выщелачивания уран из твёрдого материала переходит в раствор, что непосредственно влияет на уровень его извлечения и возможные технологические потери. Часть урана утрачивается при разделении полученной суспензии на крупнофракционную и тонкодисперсную фракции, а также при промывке крупнофракционной фракции [168–172].

Перед началом сорбционного этапа проводится регулирование кислотности пульпы до рН 3,4–3,6, что вызывает осаждение гидратов алюминия, марганца и железа. В результате этих процессов часть урана оказывается связанной в осадке, снижая его способность к дальнейшему извлечению. Во время сорбции осуществляется переход в раствор урана, однако его полное извлечение затрудняется, что приводит к неизбежным дополнительным потерям [167].

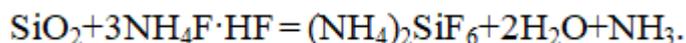
Общий показатель извлечения урана в финальный продукт определялось путём сравнения его содержания в отходах, отправленных в хвостохранилище. Сравнивая эти показатели с исходной концентрацией урана в руде, а также учитывая увеличение объёма твёрдой фазы, можно вычислить общий коэффициент извлечения [172].

1.6. Некоторые технологические аспекты переработки урановых руд

В [173–179] представлены результаты использования различных фторидных соединений для вскрытия руд и минералов. Авторами [173] детально рассматриваются методы обработки, такие как кислотный, щелочной, аммиачный и карбонатный. Но нужно указать на тот факт, что данные способы оказываются неэффективными при разрушении кварцевой компоненты руд, поскольку кремнезём (SiO_2) проявляет устойчивость к воздействию большинства кислот, кроме плавиковой, а со щелочами вступает в реакцию исключительно при автоклавной обработке. Применение плавиковой кислоты с целью удаления кремнезёма, этот процесс называется "обескремнивание" кварцевых руд, сопровождается образованием значительного объёма токсичного газа SiF_4 (кремний тетрафторид), который требует специальной утилизации. Данная реакция имеет вид:



Одним из методов обработки кремнийсодержащих руд, описанных в [174], является метод обработки с введением в процесс аммония гидрофторида (общеупотребительное сокращение - ГДФА). В ходе реакции происходит образование аммонийного гексафторосиликата $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$:

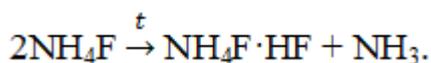
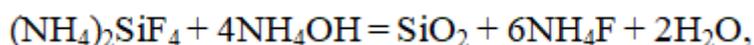


В ходе реакции образуется гексафторосиликат аммония (общеупотребительное сокращение - ГФСА) – легкорастворимого соединения, которое выводится из технологического процесса в виде жидкой фазы.

По сравнению с фтороводородной кислотой соединение аммония гидрофторид обладает некоторыми преимуществами:

1) использование аммония гидрофторида при фторировании кварцевых руд помогает избежать формирования крупных объёмов токсичного газа SiF_4 , что минимизирует экологические риски;

2) гидрофторид аммония обладает способностью к регенерации, что снижает эксплуатационные затраты и повышает экономическую эффективность технологии. Регенерация осуществляется через следующие реакции:



Ранее гидрофторид аммония был предметом исследований, направленных на его использование в процессах фторирования различного минерального сырья. Так, в работе [175] подробно изучены химические реакции между этим реагентом и кремнийсодержащими минералами, относящимися к разным структурным типам. Кроме того, была выполнена термодинамическая оценка вероятных реакций и их результатов. Результаты показали, что смешивание реагентов в условиях комнатной температуры вызывает частичное разложение силикатных соединений примерно на 38-42%. Неразложившаяся часть сырья подвергается активации, что упрощает её дальнейшее разложение в ходе сушки смеси при температуре 110°C . Эти данные позволили сделать заключе-

ние о высокой перспективности гидрофторида аммония ($NH_4F \cdot HF$) в качестве эффективного реагента для обработки силикатных горных пород, обеспечивающего оптимальные условия переработки.

Взаимодействие кварца с гидрофторидом аммония изучалось в ряде исследований [175, 176]. В работе [176] было выявлено, что для обеспечения полного процесса фторирования кремнезёма (SiO_2) необходимо использовать гидрофторид аммония в количестве, превышающем стехиометрическую норму на 8–10%. Однако, как показывают данные работы [175], наиболее оптимальное мольное соотношение компонентов ($NH_4F \cdot HF:SiO_2$) составляет 1:3.5. Реакция протекает с выделением тепла при температуре выше $100^\circ C$ и сопровождается выделением аммиака в газообразной форме. В ходе фторирования получают соединения $(NH_4)_2SiF_6 \cdot NH_4F$ и $(NH_4)_2SiF_6$, которые начинают сублимироваться при достижении температуры $319^\circ C$. Анализ в рамках работы [176] указывает на то, что образование соединения $(NH_4)_3SiF_7 = (NH_4)_2SiF_6 \cdot NH_4F$ является более вероятным, чем формирование SiF_4 или $(NH_4)_2SiF_6$, что делает его ключевым результатом данного процесса.

Фторирование руд с применением различных соединений фтора подробно исследовалось специалистами Института геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН [177-182], которыми данный процесс был изучен детализировано. В этих исследованиях рассмотрены методы фторирования рутиловых, цирконовых, ильменитовых руд, а также изучены условия разложения таких силикатных минералов, как кварц, диопсид, хлорит, волластонит, каолинит, ларнит и других. Экспериментальные данные демонстрируют, что гидрофторид аммония является чрезвычайно эффективным реагентом для обработки этих материалов. Процесс фторирования приводит к образованию растворимых соединений, включая гексафторосиликат аммония и разнообразные фторометаллаты, которые легко удаляются из системы. Это свидетельствует о высокой пригодности гидрофторида аммония для переработки кварцсодержащих руд, включая урансодержащие руды, благодаря его универсальности и эффективности.

На примере урановых руд Эльконского рудного района Якутии продемонстрирована активация минералов гидрофторидом аммония [174]. Введённая дополнительная стадия активации позволила существенно повысить эффективность процесса выщелачивания урана - с 50–70% до 96%. Для оптимизации процесса (уменьшение температуры, концентрации реагентов, продолжительности реакции, использование окислителей и т. д.) требуются дополнительные исследования [174].

Сорбционные технологии играют ключевую роль в процессе производства концентратов урана, таких как "жёлтый кек" (U_3O_8). В рамках атомного проекта СССР были инициировано множество работ, связанных с сорбцией урана, в которых применялись различные химические реагенты. Важнейшим достижением стало создание непрерывного бесфильтрационного метода, разработанного под руководством академика Б. Н. Ласкорина [180-186].

Бесфильтрационный метод Ласкорина стал революцией в гидрометаллургии урана, позволив за короткий срок увеличить мощности заводов в три раза и открыть новые возможности для переработки бедных руд. Ключевым преимуществом этой технологии является замкнутая система водооборота, которая минимизирует сбросы в открытую гидрографическую сеть и снижает воздействие предприятий на окружающую среду. За разработку и промышленное внедрение этой технологии Ласкорин Б.Н. был удостоен Ленинской премии в 1958 году.

В исследованиях под руководством Ласкорина изучались не только уран, но и редкоземельные элементы, металлы платиновой группы, а также индивидуальные металлы – Ag, Au, Sn, Re, V, Sc, W, Mo, Nb, Ta, Hf, Zr, Be, Li, Th [184, 187, 188].

Б. Н. Ласкорин является автором промышленных технологий синтеза сорбентов и экстрагентов для извлечения урана, плутония, золота и других металлов. Под его руководством проводились фундаментальные исследования по разработке и совершенствованию технологий синтеза сорбентов, которые заняли ключевое место в атомной промышленности [183-187].

Научные исследования [189–203] подробно рассматривают различные методы сорбционного извлечения урана, рассматривая широкий спектр поглощающих материалов (сорбентов) и их эффективность при обработке урансодержащих растворов. Работа [191] посвящена исследованию свойств волокнистых сорбентов, оценке их способности селективно поглощать уран. В свою очередь, исследование [193] рассматривает применение неорганических адсорбентов для экстракции урана из сложных солевых систем. Особенно высокую результативность продемонстрировал диоксид титана [195]. В исследовании [196] авторы уделили внимание сорбционным характеристикам природных материалов, включая шунгит, фосфоргипс и другие минеральные соединения. Работа [197] сосредоточена на применении естественных адсорбентов для извлечения урана из озёрных вод, где природные цеолиты и горные породы, содержащие их, подтвердили свою эффективность [200–203]. Исследование [200] посвящено анализу способности природных материалов поглощать радиоактивные компоненты, а в [201] продемонстрированы возможности очистки урансодержащих вод с использованием цеолитов. Наибольший интерес вызывают модифицированные природные сорбенты и композиции на основе цеолитов, которые зарекомендовали себя как перспективные материалы для извлечения урана [202].

Анализ литературного обзора позволяет сделать заключение, что такие сорбенты, как шунгит, скорлупа косточки абрикоса и цеолит, являются не только экологически, но и экономически выгодным выбором благодаря их доступной стоимости по сравнению с органическими аналогами.

1.7. Заключение по литературному обзору и задачи настоящей работы

В главе 1 приведен обзор технологических основ получения урана из руд и других сырьевых материалов. В нём рассмотрены основные виды урановых руд, их химический состав и методы переработки, включая кислотное и щелочное выщелачивание, прямое фторирование и микробиологические методы. Подробно проанализированы промышленные типы урановых месторождений,

их морфологические особенности и технологическая применимость различных методов переработки.

В данной главе особое внимание уделено гидрометаллургическим процессам, таким как кучное и подземное выщелачивание, их применение в уранодобывающей промышленности, а также истории развития урановой отрасли в Таджикистане. Приведены данные о переработке урановых хвостохранилищ, показана возможность вторичного использования отходов уранового производства, предложены технологические схемы переработки.

Также рассмотрено текущее состояние мировой ядерной энергетики, развитие реакторных технологий и их связь с обеспечением урановым сырьём. Подчёркнуто значение экологических аспектов уранодобычи, а также необходимость оптимизации технологических процессов для минимизации радиоактивных отходов.

По обзору литературы можно комплексно оценить существующие проблемы переработки урансодержащих руд, включая сложность выделения урана из различных типов руд, высокие затраты на технологии переработки и утилизацию отходов, а также влияние уранодобывающей промышленности на окружающую среду. Обсуждённые материалы могут быть использованы для совершенствования методов переработки, повышения их экономической эффективности и снижения негативного воздействия на экологию.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УРАНОВЫХ РУД ТАДЖИКИСТАНА

2.1. Методика экспериментов, техника работы с радиоактивными веществами

Процедура отбора проб. Лабораторные образцы были взяты на различных уровнях и участках месторождения посредством бурения мелких скважин и рытья шурфов. Из каждой точки отбора собиралась объединённая проба из нескольких точечных проб. По завершении отбора шурфы и скважины были засыпаны нейтральным грунтом.

Анализ минералогического состава. Минералогические характеристики образцов определялись с применением рентгеновской дифрактометрии и рентгенофлуоресцентной спектрометрии на специализированном лабораторном оборудовании.

Подготовка порошка для рентгенофазового исследования. Получение порошкообразного образца осуществлялось посредством тщательного измельчения материала в агатовой ступке. После измельчения каждого образца агатовую ступку в целях устранения возможных примесей очищали два раза ацетоном и два раза затем этиловым спиртом. Подготовленную порошкообразную массу распределяли равномерно на платформе анализатора, формируя в рабочей зоне прибора тонкий слой исследуемого образца. Для его надёжной фиксации на поверхности добавляли 3–4 капли этилового спирта, обеспечивая более плотный контакт между частицами образца. После полного испарения этилового спирта образец помещался в анализатор и осуществлялась регистрация дифрактограммы при $T=12-80$ градусов по шкале детектора.

Рентгенофазовый анализ. Исследование структуры фаз проводилось с применением рентгеновского дифрактометра "XRDynamic", использующего медное $K\alpha$ -излучение. На полученной дифрактограмме были зарегистрированы линии фаз различной степени интенсивности.

Определение химического состава. Элементный состав образцов анализировали рентгеноспектральным методом, используя спектрометр "Спектроскан МАКС-GVM".

Гамма-съёмка. Радиометрическое исследование осуществлялось по наземным пешим маршрутам, что позволило обеспечить непрерывный контроль за уровнями излучения между точками измерения. Конфигурация профилей и дистанция между исследуемыми зонами внутри каждого маршрута были определены с учётом размеров хвостохранилища и его расположения относительно близлежащих населённых пунктов. Для регистрации параметров радиационного фона применялся переносной цифровой спектрометр "МКС-АТ1421", разработанный компанией "Атомтех" (Республика Беларусь). Дополнительно анализировались вариации радиационного фона в динамике, что позволило повысить детализацию исследования и точность полученных данных.

Анализ природных радионуклидов. Содержание естественных радиоактивных элементов в исследуемых образцах оценивалось методом гамма-спектрометрии с использованием высокоточного спектрометра "Canberra". В процессе исследования регистрировались активности изотопов урана (^{235}U) и урана (^{238}U), радия (^{226}Ra), тория (^{232}Th), а также свинца (^{210}Pb) и полония (^{210}Po).

Аппаратура и технические средства. Для проведения экспериментальных исследований применялась высокоточная измерительная аппаратура, обеспечивающая надёжность и точность получаемых данных. В частности, использовались аналитические весы Sartorius LA 230P. Для контроля параметров кислотно-щелочного баланса применялся многофункциональный рН-метр multi-parameter analyser Eijkelkamp 18.28, оборудованный чувствительным стеклянным сенсором. Для гарантии достоверности измерений прибор проходил процедуру калибровки с применением специализированных буферных растворов, предоставленных компанией Mettler Toledo.

Объёмный метод анализа концентрации урана.

Включал последовательные этапы подготовки и химической обработки образца. Сначала берут от 0,1 до 10 мл образца, при необходимости доводя объём до 10 мл водой. Для корректировки кислотности добавляют аммиачный раствор, карбамид и ортофосфорную кислоту, затем смесь нагревают до кипения. Далее вводят перманганат калия до появления окрашивания, затем соль Мора для восстановления. После охлаждения раствор подвергается дополнительному окислению с нитратом натрия, тщательно перемешивается, а затем стабилизируется. Завершающий этап - титрование ванадатом аммония с индикатором, при котором желтый цвет раствора сменяется фиолетовым.

В образцах объём урана вычисляли следующим образом:

$$V = \frac{0,001 \cdot 1000}{\alpha(1-10)}, \text{ г/л.}$$

2.2. Химический и минералогический состав урановых руд

2.2.1. Химический и минералогический состав урановых руд

месторождения "Танзим"

Основные ураносодержащие минералы Танзимского урановорудного района - это титанатные соединения, силикатные структуры и, вероятно, титано-силикатные урановые комплексы. В рудных породах иногда встречаются минералы уранинит и настуран как незначительные включения в основной минералогический состав [68].

Геологические формации содержат не только соединения урана, но и ряд других минералов, включая рутил, антимонит, пирит и галенит, а также уран-титановые и уран-марганцевые минералы. Среди неметаллических составляющих преобладают структуры кварца и карбонатные соединения.

Уран-титанаты кристаллизуются в виде вытянутых призматических образований, имеющих форму игольчатых структур или плоских пластин. В некоторых случаях они объединяются в плотные скопления, создавая узкоориентированные линейные агрегаты, что визуально напоминает псевдожилыные

зоны. Размеры минеральных выделений могут находиться в диапазоне от десятков до сотых долей миллиметра, что указывает на сложность их морфологии и закономерности формирования.

Исследование образцов с применением лазерно-спектрального анализа, при котором диаметр кратера составляет 30–55 мкм, подтвердило присутствие титана (Ti), урана (U) и кремния (Si) (достигающее десятков процентов), алюминия (Al) (в пределах десятых долей – первых процентов), кальция (Ca), магния (Mg) и свинца (Pb) (примерно десятые доли процента). Также были зафиксированы присутствие иттрия (Y), стронция (Sr), ванадия (V) (на уровне десятых долей процента), а также никеля (Ni) и хрома (Cr) (в сотых долях процента). Повышенное содержание Si указывает на возможное присутствие урановых титанато-силикатных соединений, подобных тем, что были выявлены в месторождениях Украины и Забайкальском крае (Приаргунский район).

Уран-силикатные минералы способны формировать метакристаллы таблитчатой конфигурации, отличающиеся сохранением чётко выраженной внешней гранёной структуры, несмотря на возможные внутренние включения посторонних компонентов. Размер их выделений варьируется в диапазоне от тысячных до сотых долей миллиметра, что указывает на сложность их микроструктурного строения. Анализ, выполненный методом лазерно-спектрального исследования, подтвердил присутствие урана (U) и кремния (Si) в концентрации порядка десятых долей процента, а также наличие железа (Fe), титана (Ti) и кальция (Ca), зафиксированных в количестве сотых долей процента.

Уранинит представлен мелкими кристаллами, достигающими около 0,1 мм в размере и имеющими призматическую или кубическую структуру. Чаще всего он формирует плотные линзовидные скопления, которые находятся в ассоциации с браннеритом и локализуются вдоль зон сланцеватости и складчатых образований рудоносных пород.

Настуран выявлен в виде тонких микропрожилков, обладающих характерной почковидной зональной текстурой, что отличает его среди других урановых минералов.

Заключительная стадия минералообразования сопровождается формированием прожилков, содержащих минеральные ассоциации альбит-гематитового и кальцит-хлорит-пиритового состава, завершающих процесс рудообразования.

Урановые альбититовые (эйситовые) образования формируются преимущественно в процессе кварц-альбитовой и карбонатной фаз минералогического развития. В отдельных участках наблюдается значительное преобладание соединений карбонатного этапа, которые доминируют над минералами начальной стадии формирования. Основными носителями урана в породах выступают браннерит и коффинит, обладающие высокой концентрацией этого элемента и определяющие его распределение в геологических структурах. Их кристаллические разновидности зарождаются на ранних этапах минералообразования, концентрируя основную массу урана в рудных залежах.

По преобладающим минералам исследуемые залежи представляют собой ураново-титановый тип.

Средний уровень содержания урана в породах соответствует типичным значениям, однако выявлены участки с повышенной концентрацией этого элемента.

В 1994 году в лаборатории ГП "Востокредмет" были проведены исследования технологических свойств руды, отобранной "Таджикглавгеологией" на рудопроявлении Газара. Технологическая проба массой 1800 кг была взята с поверхности рудной зоны. Среднее содержание урана в руде составило 0,086%. Минералогический анализ данной пробы не проводился.

Установлено, что после дробления руды выход классов крупности оказался равномерным, а содержание компонентов распределено по классам крупности без значительных отклонений (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Концентрация элементов в отдельных фракциях руды, отобранной "Таджикглавгеологией» на рудопроявлении Газара

Крупность кусков, мм	Выход, %	Вес, кг	Содержание по данным химанализа			
			титан, %	уран, %	серебро, г/т	золото, г/т
-2	20,0	180	0,6	0,079	2,3	>0,2
-5+2	21,2	189	0,6	0,084	7,2	>0,2
-10+5	26,9	240	0,6	0,082	2,7	>0,2
-15+10	20,6	185	0,6	0,091	4,2	>0,2
-30+16	11,3	100	0,6	0,087	4,5	>0,2
Исходная руда	100,0	894	0,6	0,086	2,3	>0,2

Исследования покусковой контрастности класса -30+15 мм показали, что покусковая сортировка позволит извлечь 60,8% хвостов с концентрацией урана 0,015%, в отработанных материалах при этом потери урана не будут превышать значения в 10,7 процентов.

Доля выхода обогащённого концентрата (содержание U = 0,196 процентов) составила 39,2%, что соответствует увеличению концентрации урана в переработанном материале в 2,28 раза по сравнению с исходной рудой.

При порционной сортировке (размер порции - три куска) класса -30+15 мм удаётся выделить 47,1% хвостов с содержанием урана 0,028%. Потери при этом составляют 15,2%. Доля обогащенного концентрата составляет 52,9% при содержании урана 0,144%, что в 1,6 раза выше по сравнению с исходной рудой.

Для исследований были отобраны образцы руды из месторождения Танзим, которые затем подвергались дроблению на дисковом истирателе модели ИД-175 ("НПО Техноком"). После измельчения материал был рассортирован

по размерным категориям с использованием ситового анализатора А-20. Суммарные результаты гранулометрического разделения обобщаются в таблице 2.2 [68].

Таблица 2.2 – Концентрация урана в различных фракциях рудных отложений месторождения Танзим

Фракция руды по крупности, мм	-0,1	+0,1	+0,16	+0,2	+0,315	
Весовой выход фракций, %	22,92	41,25	1,66	33,54	0,63	$\Sigma=100$
Выход фракции по весу, г	220	396	16	322	6	$\Sigma=960$
Содержание CaCO ₃	-	13,98	-	14,48	-	
Содержание U, %	0,238	0,215	0,250	0,254	0,258	

На рисунке 2.1 представлены результаты рентгеноспектрального исследования рудных образцов [68], представленных в виде рентгеновских спектров. Спектры получены на рентгено-флуоресцентном спектрометре СПЕКТРОСКАН-МАКС-GF2E с серебряной рентгеновской трубкой БХ-7. Рентгеновская трубка имеет параметры: напряжение 40 кВ, сила тока 100 мкА. Для регистрации данных использовался детектор с рабочим напряжением 1586 В. В результате проведённого анализа установлены химические характеристики образцов (таблица 2.3) [68].

Для определения химического состава исследуемых образцов применялся анализатор HazMat ID System, разработанный в США. В ходе эксперимента были получены и систематизированы данные, представленные в таблице 2.4 [68], где отражены количественные показатели зафиксированных элементов, а также возможные вариации их содержания.

Таблица 2.3 - Результаты рентгеноспектрального анализа образцов руды из месторождения Танзим

Определяемый элемент	As	Zn	Ni	Co	Pb	Cu	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Th	U	Cr	V
Содержание, %	0,0055	0,10	0,026	0,033	0,013	0,035	19,04	1,27	1,76	0,02	0,241	0,027	0,070

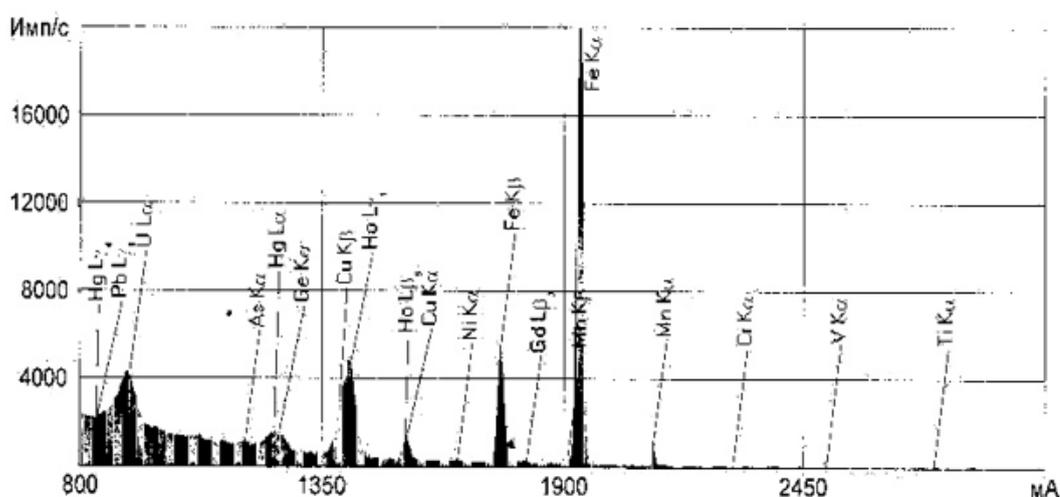


Рисунок 2.1 - Рентгеновские спектры образцов руды месторождения Танзим

Таблица 2.4 - Состав проб

Содержание минералов и веществ в пробе	Химическая формула
Монтмориллонит (бен-тонитовая глина, слоистый водный силикат магния и алюминия)	$m\{Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2\} \cdot p\{(Al,Fe^{3+})_2[Si_4O_{10}](OH)_2\} \cdot nH_2O$. Примерный состав: Al ₂ O ₃ - 11-22%; MgO - 4-9%; вода 12-24%; Fe ₂ O ₃ – 5% и больше, в минерале присутствуют также K ₂ O, Na ₂ O и CaO (до 3,5%)
Коффинит	U(SiO ₄)(OH) ₄

Пирофиллит	$Al_2[OH]_2\{Si_4O_{10}\}$. Примерный состав: MgO – 0,48%; SiO ₂ – 64,58%; Fe ₂ O ₃ – 0,17%; Al ₂ O ₃ – 29,38%; Na ₂ O – 0,14%; CaO – 0,38%
Иллит	$(Al(OH)_2((Si,Al)_2O_5)) \cdot K(H_2O)$
Калиевый бентонит	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
Каолинит	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ Содержит: Al ₂ O ₃ – 39,5%; SiO ₂ – 46,5%; H ₂ O – 14%
Сапонит	$(OH)_4(Si_{7,34}Al_{0,66}\{Na_{0,66}\})Mg_6O_{20}$
Бейделлит	$(Na, Ca_{0,5})_{0,3}Al_2(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$

2.2.2. Минералогический анализ проб месторождения "Центральный Таджикистан"

Месторождение "Центральный Таджикистан" обнаружено в 1950-х гг. После его открытия были инициирован предварительный этап его разработки, который включал проведение выемочных исследований, бурение шурфов, сооружение короткометражных штолен для изучения структуры рудных залежей. По данным, полученным М. А. Биленским, урановые руды в месторождении имеют мелкозернистую текстуру, но при этом их качество достаточно высокое. Первоначально предполагалось проведение расширенных геологоразведочных мероприятий, однако дальнейшая реализация этих инициатив так и не состоялась. Согласно общепринятой геологической типологии, месторождение относится к эндогенным формациям гидротермального происхождения. Исследования подтверждают, что основными урановыми минералами данного объекта являются минералы уранинит и настуран

[13].

Данный рудный объект имеет промышленное значение и является стратегически важным источником уранового сырья для Таджикистана. В связи с этим его руды были тщательно исследованы, включая минералогический анализ и детальные исследования [204].

Для исследований отбирались образцы из различных разведочных канав, после чего образцы проходили лабораторный анализ в ВНИИХТ Российской Федерации (Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии) с использованием современного лабораторного оборудования. В процессе анализа применялся микроскоп CamScan, дополнительно оснащённый спектрометром Link, а также использовался анализатор AN 10000, разработанный в Японии. Эти приборы позволили провести детальное исследование минерального состава образца 659. Полученные результаты энерго-дисперсионного анализа были систематизированы и представлены в таблице 2.5 [204], где отражены основные характеристики состава минералов, их концентрация и возможные вариации содержания.

Согласно представленным результатам, ключевыми урановыми минералами данного образца (проба 659) являются кальциевый титаносиликат урана и коффинит. Их визуальные изображения размещены на рисунках 2.2–2.4.

Таблица 2.5 – Элементный состав образца 659 по данным энерго-дисперсионного анализа (мас%)

Окси-ды	Минералы					
	Галенит	Коффи-нит	Оксид урана	Са-титаносиликат	КПШ	Альбит
UO ₂	-	73,94	96,98	59,72	-	-
Na ₂ O	-	0,34	-	0,67	-	14,40
Al ₂ O ₃	-	1,46	-	1,17	18,42	18,26
PbO	83,60	0,06	1,67	2,18	-	-

P ₂ O ₅	-	1,20	-	2,22	-	-
TiO ₂	-	0,19	-	15,88	-	-
SiO ₂	-	16,33	0,01	12,20	64,84	64,86
K ₂ O	-	0,14	-	0,03	15,00	1,00
CaO	-	3,83	0,85	3,10	0,61	0,61
ZnO	1,27	-	-	-	-	-
FeO	1,07	1,61	0,24	2,67	0,33	0,33
SO ₃	14,06	-	-	-	-	-
Σ	100,00	99,10	99,75	99,84	99,20	99,46

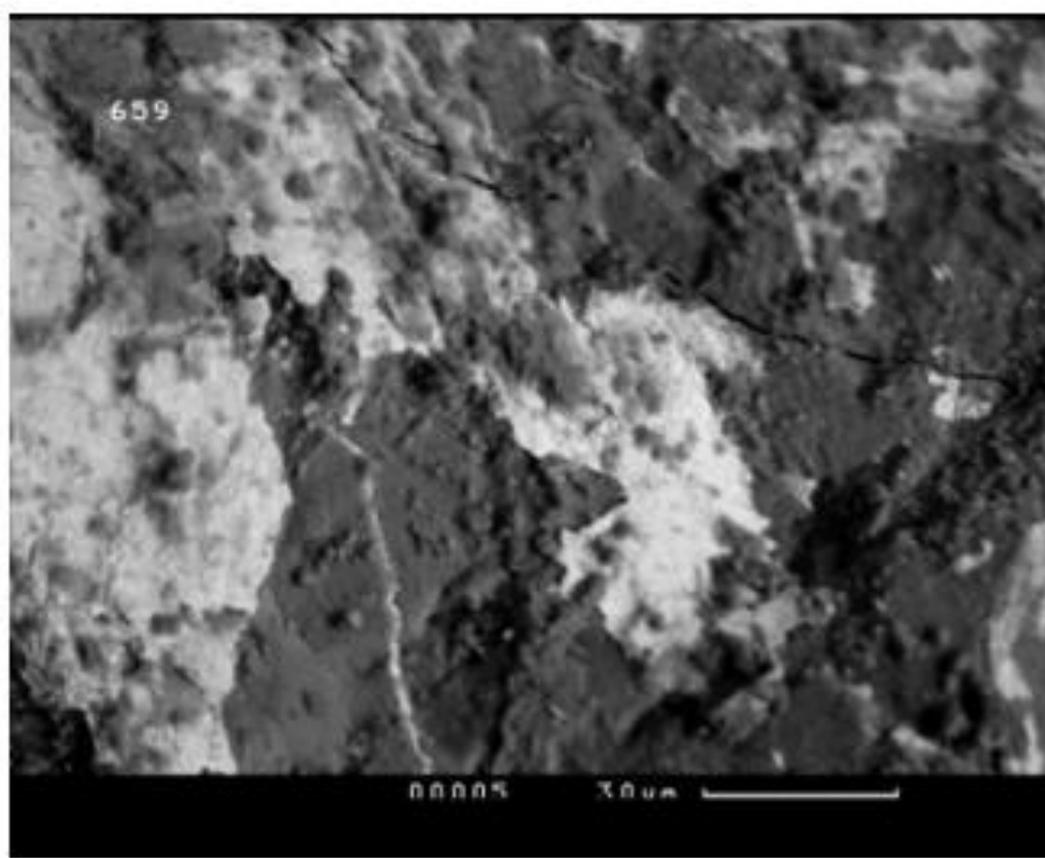


Рисунок 2.2 – Фрагменты зёрен коффинита (микрофотография отражённых электронов (белые проявления))

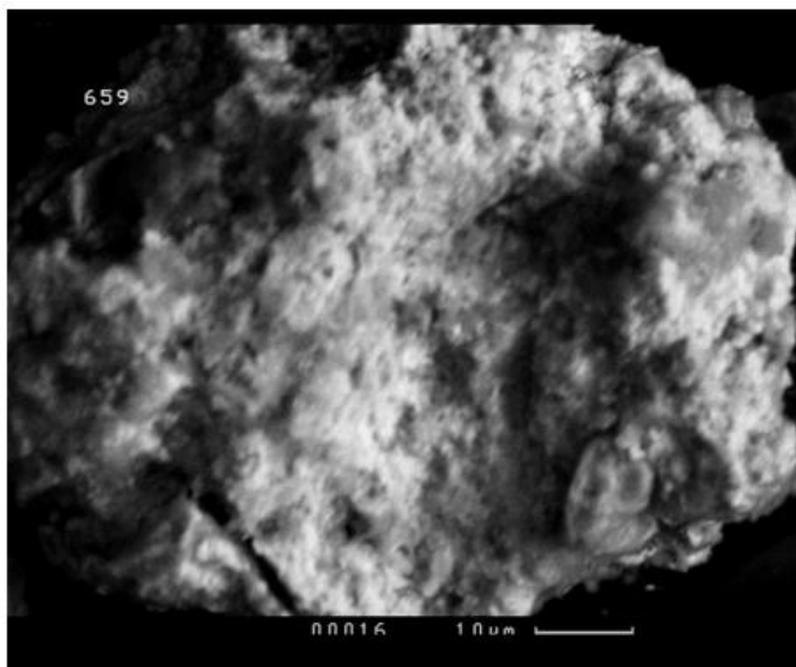


Рисунок 2.3 – Микроскопическое изображение Са-титаносиликата урана в режиме отражённых электронов (белые проявления)

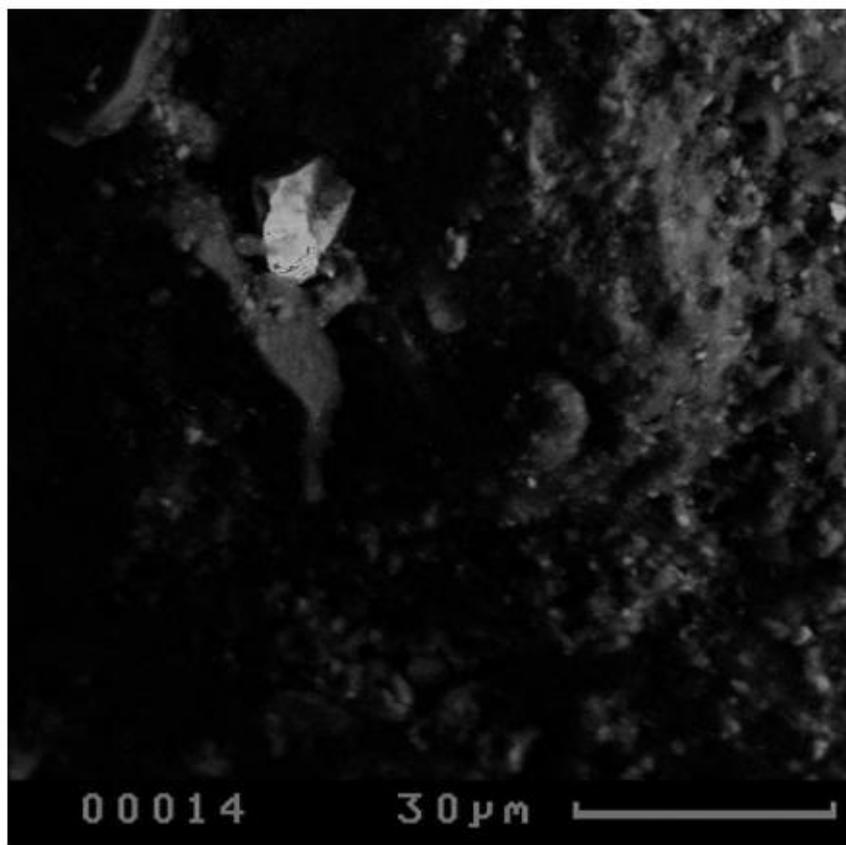


Рисунок 2.4 – Микроскопическое изображение галенита в режиме отражённых электронов (белое проявление в верхнем левом углу)

В таблице 2.6 обобщаются результаты минералогического анализа образца 660, полученные энерго-дисперсионным методом.

Исследование состава образца 660 показало, что его минеральная структура представлена преимущественно урановым оксидом, цирконсодержащими урановыми соединениями, уранофаном, коффинитом и Са-титано-силикатом урана. Эти минералы встречаются в комбинации с CaTiSiO_4 и FeS_2 , что влияет на химико-минералогический профиль образца. Визуальные изображения изученных минералов представлены на рисунках 2.5–2.7, где детально отражены их морфологические особенности.

Ранее геологические исследования предполагали, что ключевыми урансодержащими минералами в рудных отложениях данного месторождения являются настуран и уранинит [13]. Однако результаты текущего исследования не подтвердили эти выводы, продемонстрировав другой спектр урановых соединений.

Таблица 2.6 - Элементный состав образца 660 по данным энерго-дисперсионного анализа (мас%)

Окси-ды	Минералы					
	Коффинит	Урановый циркон	Са-титано-силикат урана	Оксид урана, в смеси с FeS_2 , CaTiSiO_4	Уранофан	KZnTaSi-фаза
SiO_2	16,43	35,01	12,20	2,59	16,33	1,76
Al_2O_3	1,77	0,10	1,47	-	1,11	-
CaO	3,85	1,93	5,26	6,21	7,26	1,07
FeO	0,95	0,85	0,63	3,54	1,64	0,25
P_2O_5	0,00	0,55	1,18	-	0,62	-
UO_2	74,10	19,87	62,25	85,30	69,79	-
TiO_2	-	-	15,94	2,98	0,68	-
PbO	0,09	-	1,43	-	0,36	-

CuO	-	-	-	-	-	1,29
ZrO ₂	-	41,29	-	-	-	-
Ta ₂ O ₅	-	-	-	-	-	63,30
K ₂ O	-	0,32	0,25	-	0,17	29,04
Na ₂ O	-	-	0,01	-	0,16	-
Σ	99,19	99,92	100,00	100,00	99,12	99,93

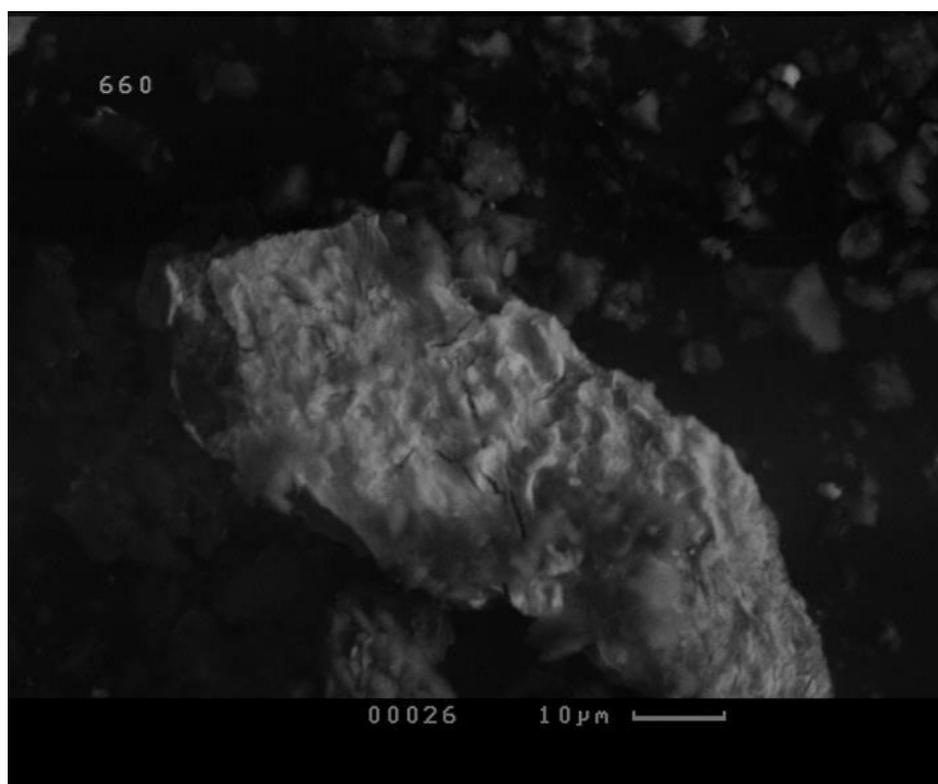


Рисунок 2.5 - Фрагмент зерна коффинита (микрофотография в режиме отражённых электронов).

Минералогический анализ рудных образцов также выполнялся на базе ИГЕМ РАН (Институт геологии рудных месторождений), в специализированной лаборатории кристаллохимии минералов им. Н. В. Белова. До начала непосредственно самих исследований осуществлялась предварительная обработка проб.

Определение концентрации урана в рудных пробах месторождения "Центральный Таджикистан" проводилось методом титрования в Научно-

производственном центре "Технология", который представляет собой структурное подразделение ГУП "Таджредмет". Итоговые аналитические данные систематизированы в таблице 2.7.

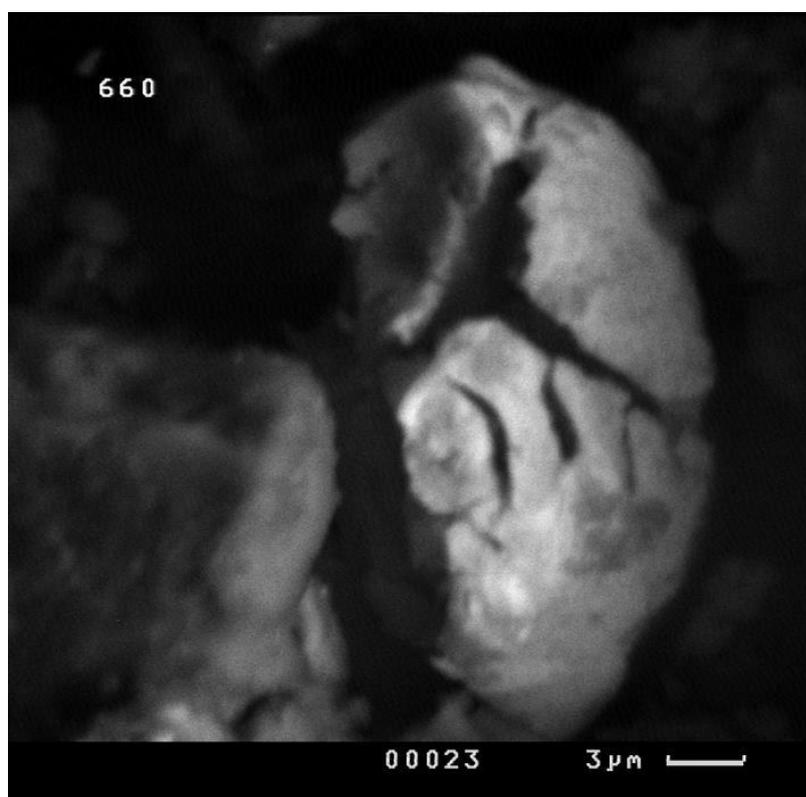


Рисунок 2.6 – Микрофотография зерна Са-титаносиликата урана, полученная методом отражённых электронов

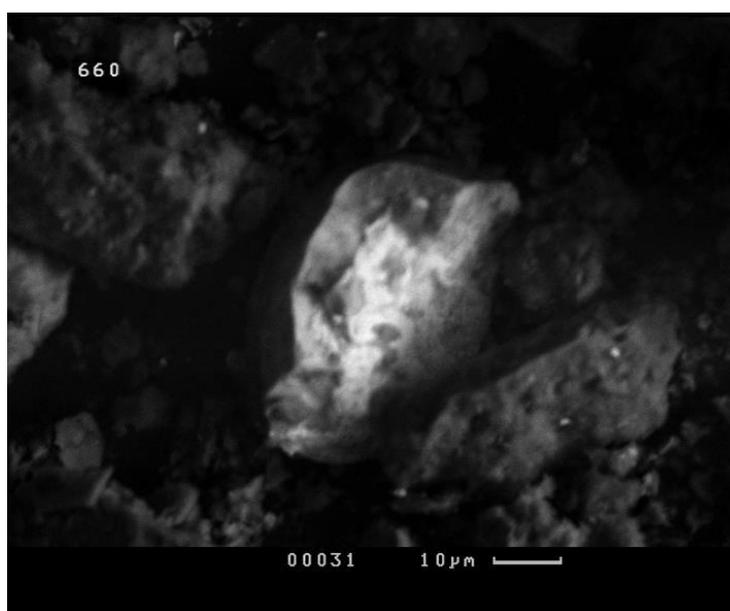


Рисунок 2.7 - Микрофотография зерна высокоуранового циркона, полученная методом отражённых электронов (в центре светло-серое)

Согласно данным таблицы 2.7, в образцах, извлечённых из канав 659 и 660, была выявлена максимальная концентрация урана, то есть в данных участках определено значительное локальное содержание урана.

Для точного определения химсостава исследуемых образцов был проведён количественный спектральный анализ с использованием спектрометра «Спектроскан-GF2E», который обладает высокой чувствительностью. В ходе эксперимента также применялось специализированное программное обеспечение «QAV». Дополнительно исследование выполнялось в Научно-производственном центре «Технология», где были проведены дополнительные аналитические процедуры.

Таблица 2.7 - Результаты спектрального анализа рудных образцов из месторождения "Центральный Таджикистан"

Наимено- вания проб	Определяемый элемент, %				
	Mg	Fe	Ca	U	SiO ₂
К-629	0,25	3,0	5,4	0,027	53,1
К-635	0,48	3,6	3,85	0,038	51,7
К-659	0,8	3,1	1,1	0,298	57,7
К-660	0,66	3,5	1,55	0,310	56,2
К-647	0,51	3,3	1,8	0,047	53,8
К-649	0,33	3,3	0,4	0,023	57,2

Концентрацию химических компонентов в образцах руды определяли классическим методом регрессии, сущностью которого является сравнение полученных экспериментально значений интенсивности с предварительно установленной градуировочной характеристикой. Процесс работы аналитической программы включает два ключевых этапа: градуировка и анализ. Подготовительная стадия (градуировка) - осуществляется настройка программного обеспечения для корректной обработки образцов определённого

типа. Основной этап (анализ) – здесь непосредственное исследование выполняется после завершения градуировки.

Значения интенсивности, полученные при спектрометрическом анализе, зависят не только от концентрации химических элементов в образце, но и от множества сопутствующих факторов. Среди них особое значение имеют агрегатное состояние материала (порошкообразное, растворённое, сплавленное), гранулометрический состав и степень равномерности распределения компонентов (для порошковых и стружечных проб). Чтобы минимизировать эти различия, введено понятие «продукт» — набор характеристик, обеспечивающих сопоставимость анализируемых проб с градуировочными образцами.

Спектрометрические приборы данной модификации позволяют настраивать рабочие параметры, включая регулирование напряжения детектора, режим функционирования рентгеновской трубки и пороговые значения дискриминации. При настройке напряжения на рентгеновской трубке варьировали диапазон в пределах 20-40 кВ, регулировали силу тока в диапазоне 20–200 мкА. В таблице 2.8 отражены результаты исследования образцов рентгено-флуоресцентным методом.

Анализ химического состава исследуемых образцов проводился в ИГЕМ РАН в специализированной лаборатории кристаллохимии минералов им. Белова. В процессе исследования применялся метод рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РФА), который позволяет с высокой точностью определить концентрацию ключевых и второстепенных элементов. Для выполнения анализа использовался вакуумный спектрометр AxiosmAX Advanced, разработанный компанией PANalytical. В ходе работы применялась рентгеновская трубка с Rh-анодом, обладающая мощностью 4 кВт. Максимально допустимое напряжение на трубке составляло 60 кВ, а анодный ток достигал 160 мА. Градуировка спектрометра осуществлялась на основе отраслевых и государственных эталонов по минеральному сырью. Верификацию осуществляли

через анализ контрольных проб, которые были любезно предоставлены со стороны Геологической службы США (USGS), что позволило подтвердить достоверность результатов.

В исследовании использовали методики НСАМ, разработанные Всероссийским научно-исследовательским институтом минерального сырья имени Н. М. Федоровского (ВИМС) [205–210]. Данные процедуры позволяют получать результаты количественного анализа, соответствующие категории точности третьей, как установлено в ГОСТе РФ 41-08-205-04. Указанный уровень аналитической точности широко используется при массовом исследовании образцов минерального сырья, при контрольных измерениях химического состава, а также в процессе расчёта запасов полезных ископаемых в месторождениях.

Перед началом исследований технологические образцы руды из месторождения «Центральный Таджикистан» предварительно просушивали при температуре 110°C, чтобы устранить лишнюю влагу. Далее они проходили подготовку по стандартному методическому процессу, включавшему несколько последовательных этапов:

- термическое прокаливаниe при 1200°C, после которого формировались диски для дальнейшего анализа. В рамках этого процесса материал подвергался индукционному плавлению в присутствии бората лития;

- определение потери массы (Loss on Ignition, LOI) проводилось при 1000°C, после чего образцы подвергались окончательному прокаливанию, способствующему стабилизации их состава;

- для исследования содержания микроэлементов образцы прессовались методом холодного формования, из сухой массы. В сухую массу дополнительно добавляли полимерное связующее.

Результаты исследований обобщены в таблицах 2.9-2.11, где систематизированы данные по анализу плавленных и прессованных образцов, а также данные по LOI. Показатели были объединены и структурированы, обеспечивая целостное представление информации. В колонке $S_{\text{общ}}$ Указана суммарная

концентрация серы, без учёта её конкретного валентного состояния, что является характерной особенностью применяемого метода.

Анализ экспериментальных данных демонстрирует, что показатели содержания урана практически совпадают во всех исследуемых методах – как химическом, так и рентгенофлуоресцентном. Незначительные отклонения не выходят за пределы допустимой погрешности, что подтверждает необходимость использования сернокислотного метода выщелачивания для указанных руд месторождения "Центральный Таджикистан".

Таблица 2.8 - Химический состав проб, отобранных из месторождения "Центральный Таджикистан", по результатам рентгено-флуоресцентного анализа

Пробы	Определяемый элемент, %										
	<i>Zn</i>	<i>As</i>	<i>Sr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Mn</i>	<i>Bi</i>	<i>Th</i>	<i>U</i>
К-629	0,0183	0,0182	0,0215	0,1901	3,0875	0,3726	0,0112	0,2202	0,0013	0,0132	0,0268
К-635	0,0248	0,1624	0,0218	0,1954	3,6332	0,4589	0,0060	0,1694	0,0033	-	0,0392
К-659	0,0262	0,1057	0,0420	0,1767	3,2221	0,4614	0,0042	0,1648	0,0183	-	0,3092
К-660	0,0264	0,1145	0,0467	0,1797	3,7281	0,4345	0,0025	0,2135	0,0201	-	0,3208
К-647	0,0192	0,0354	0,0268	0,1697	3,2018	0,4550	0,0018	0,0580	0,0026	0,0067	0,0462
К-649	0,0270	0,0263	0,0176	0,1812	3,3544	0,4893	0,0043	0,1830	0,0045	0,0126	0,0254

Таблица 2.9 - Минералогические показатели проб, отобранных из месторождения "Центральный Таджикистан"

Пробы	Оксиды (в процентах)											
	Al_2O_3	P_2O_5	MgO	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	SiO_2	TiO_2	MnO	CaO	П.п.п	$S_{общ.}$
К-629	13,55	0,12	1,11	4,52	2,40	2,89	61,85	0,48	0,110	6,31	6,78	< 0,02
К-635	14,90	0,12	1,64	5,07	2,53	2,78	60,11	0,49	0,098	5,20	6,64	< 0,02
К-647	15,32	0,13	1,29	4,09	3,78	3,32	64,44	0,53	0,081	2,92	4,26	< 0,02
К-649	16,82	0,13	1,59	5,11	3,78	3,33	64,98	0,57	0,064	0,56	2,98	< 0,02
К-659	15,51	0,12	1,45	4,80	3,88	2,97	65,18	0,50	0,071	1,70	3,44	< 0,02
К-660	15,68	0,13	1,44	4,26	3,75	3,23	64,14	0,49	0,073	2,56	3,98	< 0,02

Таблица 2.10 - Химический состав проб, отобранных из месторождения "Центральный Таджикистан", по результатам рентгеноспектрально-флуоресцентного анализа

Пробы	Содержание элементов, ppm											
	Co	V	Cr	Ni	Cu	Th	Sr	U	Zn	Pb	Bi	As
К-629	52	65	11	<10	42	21	154	230	93	203	<20	90
К-635	57	59	16	<10	257	20	178	403	81	281	<20	951
К-647	69	66	15	<10	26	21	188	467	65	198	<20	111
К-649	40	73	21	<10	33	28	129	220	89	223	<20	36
К-659	59	63	15	<10	23	22	172	2965	70	376	<20	221
К-660	55	73	10	<10	27	16	170	3177	72	244	<20	164

Таблица 2.11 – Величины среднеквадратичных отклонений (отн. %) для результатов анализа, выполненных методами категории III

Интервал содержаний	Al_2O_3	MgO	Na_2O	SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	CaO	P_2O_5	$S_{общ.}$	П.п.п.
0.001-0.002								30,0				
0,002-0,005							30,0	30,0		25,0		
0,005-0,01						30,0	29,0	30,0	30,0	24,0		
0,01-0,02	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	27,0	30,0	30,0	21,0	26,0	
0,02-0,05	30,0	30,0	28,0	30,0	28,0	28,0	21,0	28,0	30,0	16,0	21,0	
0,05-0,1	28,0	27,0	24,0	27,0	24,0	25,0	18,0	25,0	27,0	12,0	17,0	
0,1-0,2	25,0	21,0	20,0	21,0	20,0	21,0	14,0	21,0	21,0	9,3	14,0	
0,2-0,5	20,0	16,0	16,0	17,0	16,0	17,0	11,0	17,0	17,0	8,2	12,0	11,0
0,5-1	15,0	13,0	12,0	12,0	12,0	13,0	9,0	13,0	12,0	6,0	10,0	9,0
1-2	11,0	9,0	10,0	9,3	10,0	10,0	7,0	10,0	9,3	4,3	7,5	7,0
2-5	8,0	6,5	8,0	6,8	8,0	7,0	5,4	7,0	6,8	5,0	5,4	5,4
5-10	5,4	4,6	5,4	5,0	5,4	4,3	3,5	4,3	5,0	3,2	3,3	3,5
10-20	3,5	3,4	3,5	3,2	3,5	2,1	2,1	2,1	3,2	2,7	1,5	2,1
20-30	2,8	2,5		1,9		1,4	1,5	1,4	2,1	1,6	1,2	1,4
30-40	2,1	1,8		1,3		1,1	1,2	1,1	1,8	1,1	1,0	
40-50	1,6	1,7		1,0		0,9	1,0	0,9	1,4		0,8	
50-60	1,2	1,4		0,8		0,8	0,8	0,8	1,2			
60-100	1,1			0,7		0,7						

2.2.3. Месторождение «Западный Таджикистан»

В рамках данного раздела приведены и обсуждены результаты комплексного исследования характеристик урансодержащей руды, добытой на месторождении «Западный Таджикистан». В процессе исследования химического состава использовался широкий спектр аналитических методик, что позволило достигнуть высокой достоверности полученных данных. Сводные данные по изучаемым параметрам интерпретированы, обобщены и наглядно представлены в таблице 2.12.

Используемые методы анализа химсостава образцов руды:

- титриметрический метод с Трилоном Б – определяли содержание Al и Fe в образцах руды;
- гравиметрический метод – определяли содержание в образцах руд оксида кремния.

Результаты проведенных анализов убедительно продемонстрировали, что содержание урана в исследуемом образце рудной массы отвечает установленным нормативам промышленного стандарта (ГОСТ), что обеспечивает возможность её эффективной переработки с применением современных технологий. Учитывая полученные данные, рассматриваемое месторождение представляет собой экономически целесообразный объект, обладающий высоким потенциалом для дальнейшего освоения, разработки и внедрения в промышленное производство [211].

Таблица 2.12 - Химический состав руды месторождения «Западный Таджикистан»

Компонент	Al ₂ O ₃	MnO ₂	U	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Pb	Cr	Zn	As	V
%	13,7	0,08	0,11	69,4	8,13	0,53	0,10	0,01	0,027	0,07	0,05

Для руды месторождения "Западный Таджикистан" определены радионуклидные характеристики, которые систематизированы в виде таблицы 2.13.

С учётом высокого содержания в указанной руде силикатных соединений, для её разложения наиболее эффективным методом является сернокислотное выщелачивание.

После завершения сернокислотного процесса была выполнена рентгенографическая съёмка обработанного образца (рисунок 2.8). Как видно на рентгенограмме, после кислотной обработки характерным минералом является кварц [211].

Таблица 2.13 – Концентрация различных радионуклидов в ураносодержащих рудах месторождения "Западный Таджикистан"

Радионуклиды	Значения средней удельной активности (кБк /кг)
^{212}Pb	0.0427
^{231}Pa	0.4435
^{214}Pb	13.69687
^{40}K	0.4687
^{238}U	2.1092
^{226}Ra	32.6967
^{235}U	0.6202
^{214}Bi	15.9164
^{212}Bi	0.0323
^{227}Th	0.7211
^{228}Ac	0.0508

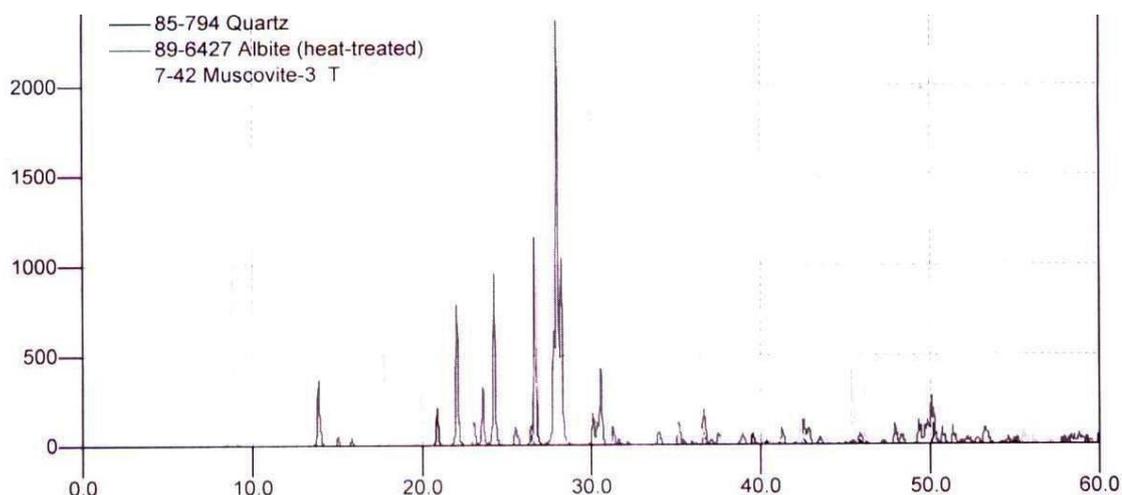


Рисунок 2.8 - Рентгенограмма руды месторождения «Западный Таджикистан» после выщелачивания

2.2.4. Месторождение "Восточный Памир"

Для определения состава руды была подготовлена объединённая проба, состоящая из двадцати отдельных образцов, отобранных на месторождении "Восточный Памир". Первоначально содержание урана в пробе определяли традиционным объёмным методом. По результатам анализа установлено, что среднее содержание урана в руде месторождения "Восточный Памир" составляет 0,035% от общей массы [212].

Для химического анализа руды использовался спектрометр СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM, предназначенный для измерений в соответствии с аттестованными методиками, охватывающий диапазон элементов от натрия (^{11}Na) до урана (^{92}U). Определение содержания химических элементов в образце проводилось по интенсивности аналитических линий с применением различных методов, регламентирующих подготовку проб, порядок измерений, использование стандартных образцов известного состава и математическую обработку результатов. Определяемый диапазон содержаний варьируется от 0,0001% до 100% без концентрирования, в зависимости от типа пробы и анализируемого элемента.

Результаты химического анализа, выполненного с использованием СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM, представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Результаты определения оксидного состава образцов руды месторождения "Восточный Памир"

Оксиды	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂
Содержание, %	7,4	4,6	3,87	0,96	0,072	0,28	43,13	0,1

Одним из ключевых методов анализа радиоактивности руд является гамма-спектрометрия - эффективный инструментальный подход, позволяющий не только идентифицировать присутствие γ -излучающих радионуклидов, но и провести их детальный количественный анализ. Этот метод применяется для определения как природных, так и искусственно созданных источников радиации.

Для определения радионуклидного состава руды месторождения «Восточный Памир» был проведён гамма-спектрометрический анализ с использованием гамма-спектрометра Канберра, оснащённого полупроводниковым детектором и системой цифровой обработки Genie 2000. Результаты обработки спектра приведены в таблицах 2.15 и 2.16.

Таблица 2.15 – Результаты рентгенофлуоресцентного анализа пробы руды месторождения "Восточный Памир"

Соединение, элементы	Содержание, мг/кг	Соединение, элементы	Содержание, мг/кг
MnO	654	Sc	13.20
Cr	48	Yb	2.84
Co	33	Dy	2.62
Ni	4	Eu	8.7
Cu	9	Lu	3.8
Zn	86	Nd	18.56
As	7	Pr	1.65
Sr	256	Sm	3.63

Продолжение таблицы 2.15

Tb	1.17	Ce	42.52
Y	23.9	La	34.32

Таблица 2.16 - Состав радионуклидов в рудном материале месторождения "Восточный Памир" и их активности

Радионуклиды	Средневзвешенная активность, кБк/кг	Погрешность
⁴⁰ K	0.09	0.0046
²¹¹ Bi	0.042	0.0038
²¹⁴ Bi	0.55	0.0064
²¹⁴ Pb	0.43	0.013
²²⁶ Ra	0.59	0.105
²²⁸ Th	0.29	0.0304
²³⁴ Th	0.862	0.2107
²³⁴ Pa	0.0036	0.000861
²³⁵ U	0.052	0.0059
²³⁸ U	0.673	0.049

На основании проведённых исследований установлено, что урансодержащая руда месторождения «Восточный Памир» относится к карбонатным рудам, поэтому для её переработки рекомендуется карбонатный метод.

Удельная активность изотопов урана и трансурановых элементов в некоторых пробах, которые были отобраны из руды месторождения "Восточный Памир", показала достаточно высокие показатели. Это даёт основание рассматривать урановую руду этого объекта как перспективную.

2.3. Дифференциальный термический анализ руд

Поиски промышленных урановых руд в Таджикистане начались в послевоенные годы и вскоре привели к открытию ряда месторождений. До этого времени на севере республики с 1926 года было известно месторождение Табошар, из руд которого периодически добывался радий. В 1940 году уран был также обнаружен в месторождении Адрасман, где с середины 30-х годов XX века велась добыча висмута [13].

Дифференциально-термический анализ (ДТА) является одним из наиболее распространённых методов термического анализа благодаря широкому спектру получаемой информации [213-214].

В данной работе с помощью ДТА исследованы урановые руды месторождений Таджикистана: «Восточный Памир-1», «Западный Таджикистан», «Центральный Таджикистан», «Северный Таджикистан - 2». Проведена оценка термических превращений минералов, содержащихся в этих рудах [212, 215].

Для исследований использовался дериватограф “Labsys Evo-1600” фирмы “Setaram” - современный синхронный термический анализатор, объединяющий термогравиметрию и дифференциальную сканирующую калориметрию (ТГА-ДТА/ДСК, TG-DTA/DSC). Этот прибор обладает высокой чувствительностью и точностью анализа. “LabSys Evo” оснащён TG-весами с точностью 0,01 мг, 3D (Calvet) DSC сенсором теплоты и печью с обогревом до 1600°C и водяным охлаждением. Чувствительность 3D сенсора составляет 0,5 мВ/мВт, а скорость нагрева/охлаждения достигает 100°C/мин (с минимальной градацией 0,1°C/мин). Точность измерения теплоёмкости (C_p) достигает 2% во всём температурном диапазоне. 3D C_p (Calvet) сенсор состоит из 10 термопар, полностью окружающих образец. Возможно использование корундовых и платиновых тиглей объёмом 0,1 мл при различных газовых средах (воздух, азот, кислород, гелий, аргон, водород и их смеси). Скорость нагрева составляла 10°C/мин.

Дифференциально-термический анализ (ДТА) образца урансодержащей руды месторождения «Центральный Таджикистан» представлен на рисунке 2.9.

Анализ термических кривых показывает, что основными минералами, присутствующими в урансодержащей руде, можно назвать следующие минералы - доломит, слюда, кварц и каолинит.

Доломит (карбонат)

На термоаналитической кривой, полученной методом дифференциальной сканирующей калориметрии (рисунок 2.9), в температурном интервале $T = 650\text{--}800^\circ\text{C}$ чётко прослеживается пик эндотермической реакции, обусловленной процессом термической декомпозиции доломита, входящего в минеральный состав исследуемой горной породы. Максимальная выраженность данного теплового эффекта достигается при температуре $T = 726^\circ\text{C}$. В то же время при $T=775^\circ\text{C}$ фиксируется слабый термический отклик.

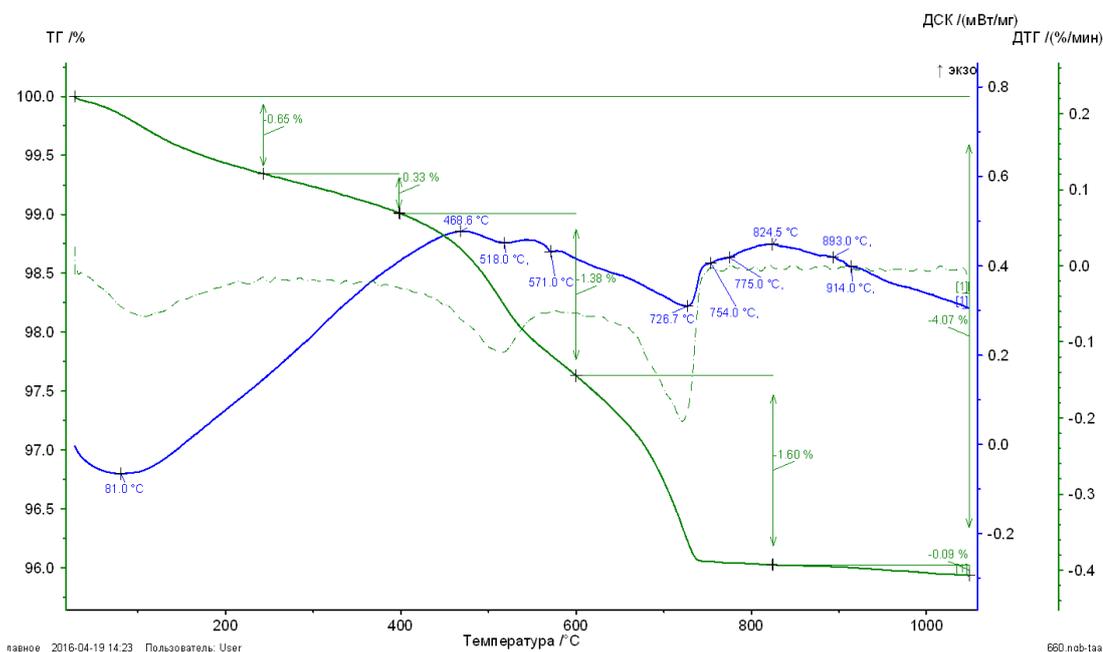


Рисунок 2.9. Термограмма образцов урансодержащей руды из месторождения "Центральный Таджикистан"

Слюда

На термограммах ДСК зафиксирован выраженный эндотермический эффект при $T=1000^\circ\text{C}$. Этот термический эффект ассоциируется с разрушением

кристаллической решётки минерала слюды и сопровождается выделением заключённой в его структуре конституционной воды. Наряду с этим, в районе $T = 825^{\circ}\text{C}$ наблюдается менее выраженный экзотермический сигнал, указывающий на протекание окислительно-восстановительной реакции, связанной с превращением железосодержащих компонентов, входящих в состав слюди-стого комплекса.

Кварц

Термограмма ДСК подтверждает присутствие кварца в урансодержащей руде, демонстрируя характерный пик (рисунок 2.9) при $T=571^{\circ}\text{C}$, согласно параметрам этого пика, можно утверждать, что происходит фазовый переход α -модификации кварца в его β -модификацию.

Каолинит

Термограммы ДТА-анализа выявляют три выраженные тепловые реакции: два эндотермических явления и одно экзотермическое. Первый эндотермический эффект был зафиксирован при температуре около $T = 81^{\circ}\text{C}$ и обусловлен процессом испарения адсорбированной влаги, удерживаемой на внешней поверхности минеральных частиц. Этот процесс сопровождается незначительным снижением массы образца — примерно на 0,65%, что свидетельствует о малом объёме связанной воды. Второй термический эндоэффект, наблюдаемый при $T = 518^{\circ}\text{C}$, связан с дегидроксилизацией каолинита — минерала, входящего в состав исследуемой породы. В ходе этого процесса происходит расщепление гидроксильных групп в кристаллической структуре, что приводит к более существенной потере массы образца — около 1,38% в диапазоне температур 400–600 $^{\circ}\text{C}$. Если пересчитать потери относительно чистого каолинита, они достигают 9,9%. Ещё один термический эффект – только экзотермический, наблюдается при 893°C и характеризует образование шпинельной фазы и структурные изменения дисперсности каолинита.

Дифференциально-термический анализ образцов урансодержащей руды месторождения «Восточный Памир-1» представлен на рисунке 2.10. Согласно

расположению термических кривых, основными минералами в урансодержащей руде являются кальцит, доломиты и слюды.

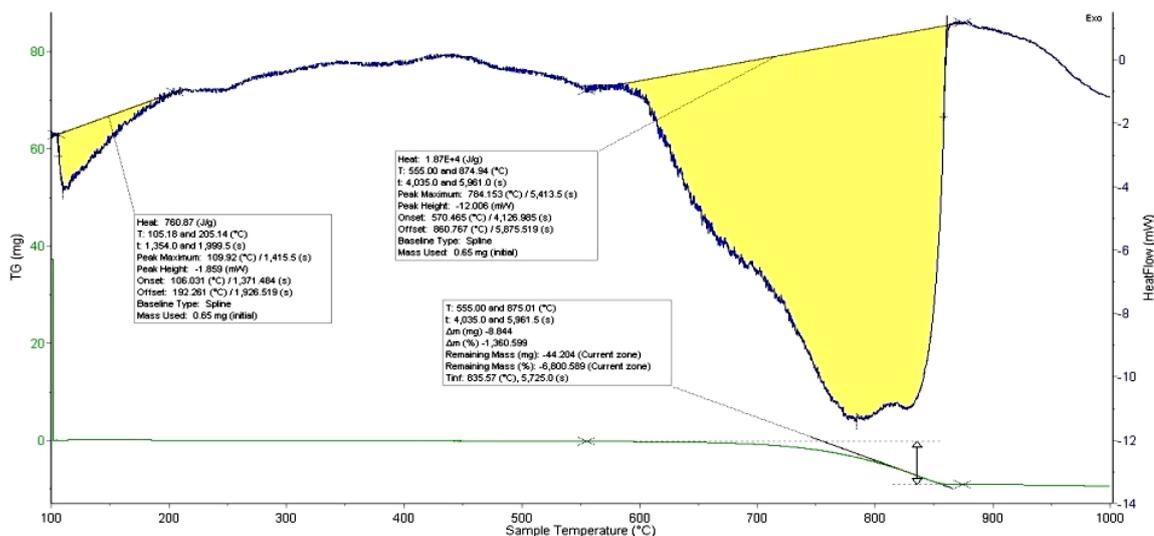


Рисунок 2.10 - Дериватограмма пробы месторождения «Восточный Памир-1» (нагрев до 1000°C, при скорости 10 К/мин в течении 1 ч 30 мин, масса навески 0,65 мг)

Соответственно, как показывают кривые ДТА, урансодержащая руда месторождения «Восточный Памир-1» по своим минералогическим характеристикам относится к карбонатному типу руд и для её выщелачивания целесообразно применять карбонаты щелочных металлов.

Руду месторождения "Западный Таджикистан" также исследовали методом ДТА (рисунок 2.11). Но на полученной дериватограмме линии ДТА проявляются недостаточно чётко, и поэтому затруднительно было идентифицировать минералы состава этой руды. В этих рудах, по-видимому, содержится большое количество кварца (свыше 50%), незначительное количество каолинита, урансодержащие минералы находятся в малых количествах, поэтому не обнаруживаются в кривых ДТА. Как видно из рисунка 2.11, в широком эндоэффекте при 450-600°C происходит дегидроксилизация каолинита.

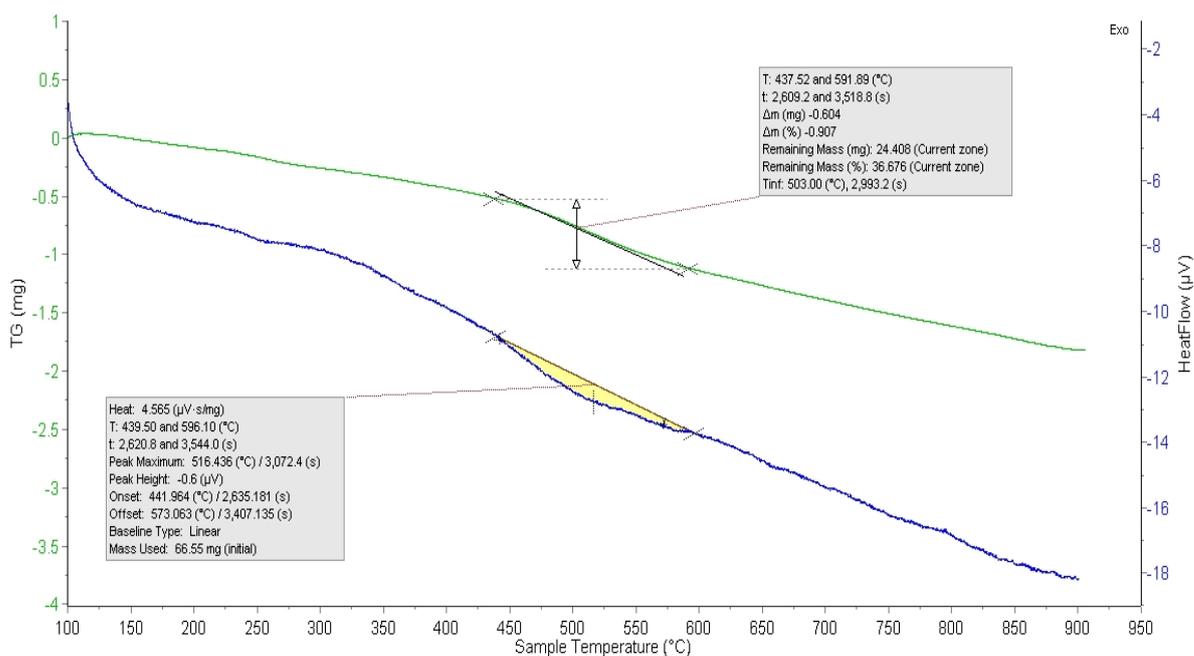


Рисунок 2.11 - ДТА руды месторождения “Западный Таджикистан”

На рисунке 2.12 представлены дифференциально-термические кривые (ДТА), полученные для урансодержащей руды месторождения «Северный Таджикистан – 2». В пределах температурного интервала 450–550°C чётко выражен эндотермический пик, ассоциирующийся с фазовым превращением каолинита, входящего в состав исследуемой руды.

В образцах руд, полученных из месторождений «Западный Таджикистан» и «Северный Таджикистан – 2», не обнаружены характерные α - и β -фазовые переходы кварца, что свидетельствует об их отсутствии либо крайне незначительном содержании кварцевой фазы. Кроме того, термоаналитические данные указывают на отсутствие карбонатных соединений в этих рудах, поскольку на кривых ДТА не фиксируются соответствующие термические эффекты, присущие декомпозиции карбонатов.

Наоборот, урансодержащие руды из районов «Центральный Таджикистан» и «Восточный Памир – 1» демонстрируют минералогические признаки, характерные для карбонатного типа сырья, что подтверждается наличием соответствующих термических эффектов на ДТА. В связи с этим для переработки данных руд наиболее рациональным считается применение технологии

карбонатного выщелачивания. В то же время, для руд, добытых на месторождениях «Западный Таджикистан» и «Северный Таджикистан – 2», целесообразно использование сернокислотного метода, предполагающего внедрение окислителей на этапе разложения.

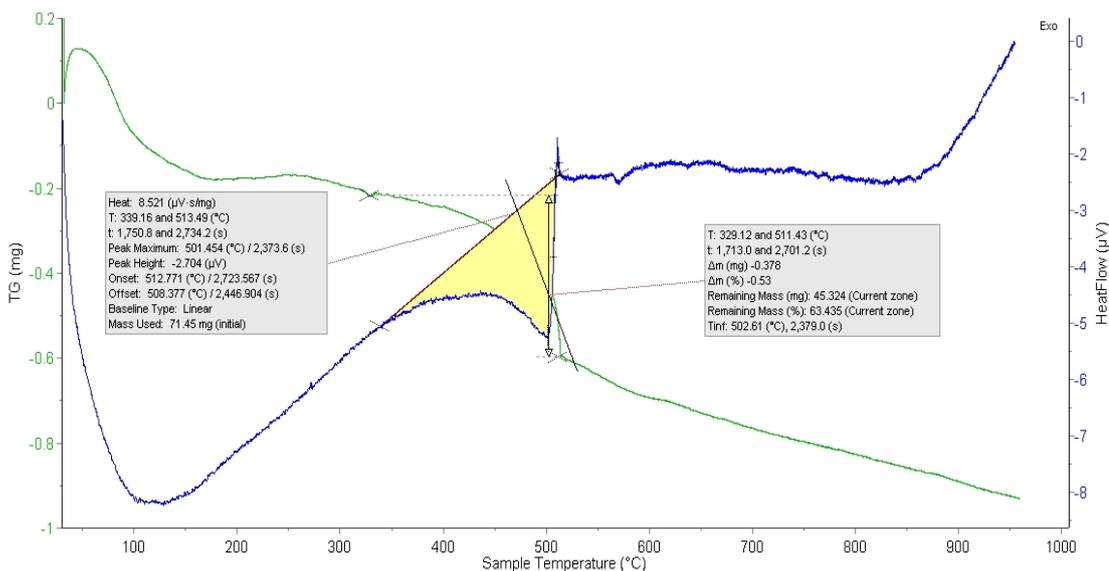


Рисунок 2.12 - ДТА руды месторождения «Северный Таджикистан - 2»

Проведённые дифференциально-термические анализы урансодержащих руд Таджикистана показали, что по минералогическому составу урановые руды месторождений Таджикистана относятся в основном к карбонатно-силикатному типу.

2.4. Рентгенофазовый анализ руд

2.4.1. Месторождение "Танзим"

Институтом геологии и минералогии (ИГЕМ) были проведены исследования минералогического состава урановых руд месторождения "Танзим" и определены основные рудо составляющие минералы. Наибольшую распространённость среди них получили соединения силикатного и титанатного типа, которые доминируют в составе исследованных образцов. В то же время ураносодержащие минералы, такие как уранинит и настуран, обнаруживаются

значительно реже и представлены в ограниченных количествах. Среди минералов, не содержащих уран, особого внимания заслуживают титановые и марганцевые соединения, а также сульфидные образования — в частности, пирит и галенит. Также в составе зафиксировано присутствие антимонитовых и рутиловых минералов. Среди нерудных включений наиболее часто встречаются кварцевые фазы, наряду с различными карбонатсодержащими образованиями. Данные результаты были получены по результатам рентгенофазового анализа (рисунок 2.13) и химического анализа указанных руд [68].

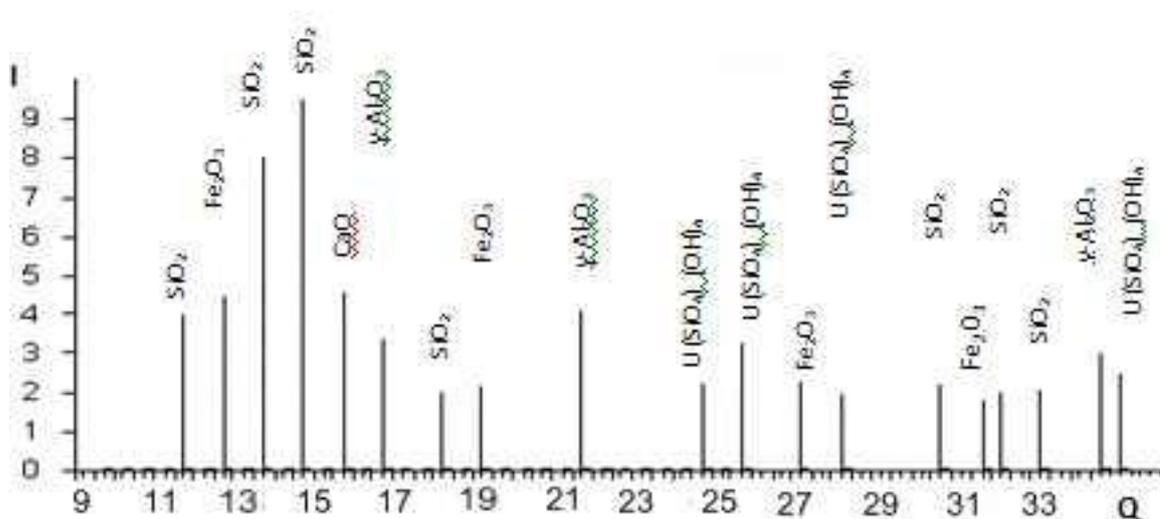


Рисунок 2.13 – Результаты РФА образцов урановой руды месторождения "Танзим"

2.4.2. Месторождение "Центральный Таджикистан"

Руда Месторождения "Центральный Таджикистан" исследовалась методом рентгенодифракционного анализа, предварительно из образцов руды готовились порошковые образцы и анализировались на рентгеновском дифрактометре ULTIMA-IV производства Rigaku (Япония).

Прибор работает при напряжении 40 кВ и силе тока 40 мА, с диапазоном измерений 3–65° 2θ и шагом сканирования 0,02° 2θ. В системе использовались фиксированные фокусирующие щели, никелевый фильтр и источник медного излучения. Для повышения точности данных и ускорения про-

цесса анализа использовали полупроводниковый детектор DTex/Ultra, обеспечивающий скорость сканирования $5^\circ 2\theta/\text{мин}$ [204].

Диагностическое исследование и анализ

Определение минералогического состава проводилось методом сопоставления экспериментальных спектральных данных с эталонными спектрами, содержащимися в базе PDF-2. В качестве инструмента обработки информации использовался программный комплекс Jade 6.5 (MDI), который позволял выполнять высокоточные идентификационные расчёты.

Количественный анализ

Фазовый состав исследуемых образцов определялся методом полнопрофильной обработки рентгенограмм согласно методике Ритвельда, реализованной в программном обеспечении BGMN. Точность проведённого анализа оценивается в пределах 2–3%, с учётом совокупных вычислительных погрешностей для каждой фазы. Для отдельных компонентов отклонение может варьироваться от 0,5 до 2,0–3,0 процентов.

Было осуществлено рентгенодифракционное исследование руды месторождения "Центральный Таджикистан" на примере образцов 635 и 660, взятых из тела месторождения, и результаты минералогического состава образцов обобщены на рисунке 2.14.

Рисунок 2.15 характеризует влияние углов вращения детектора оборудования на интенсивность пиков, отвечающих за индивидуальные минералы, которые были определены для образцов 635 и 660.

Исходя из данных, представленных на рисунках 2.14 и 2.15, сделан вывод, что рудные материалы месторождения "Центральный Таджикистан" имеют преимущественно силикатный состав, исходя из чего процесс их переработки необходимо проводить сернокислотным выщелачиванием.

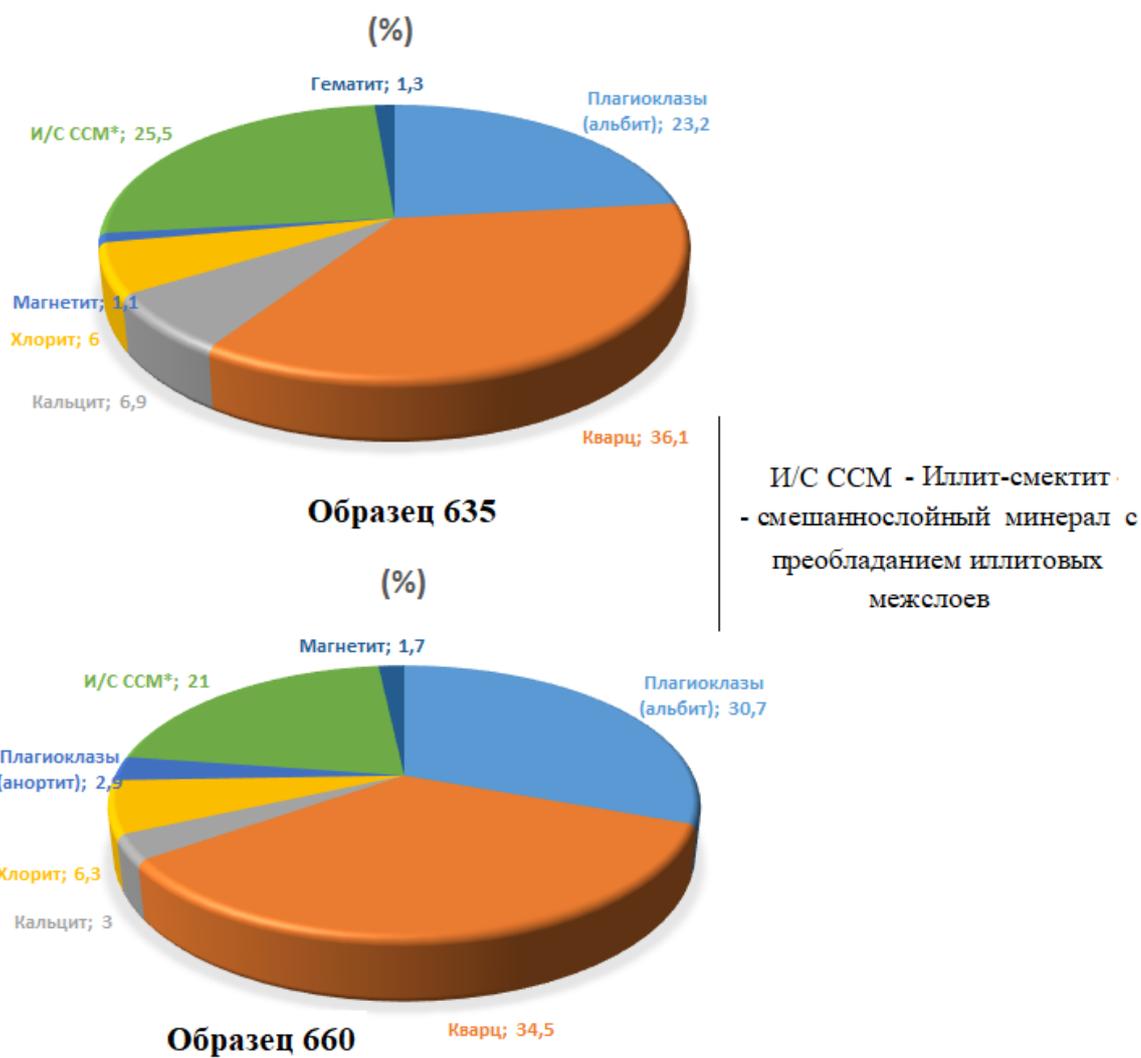


Рисунок 2.14 - Результаты минералогического состава образцов 635 и 660 по данным рентгенодифракционного исследования руды месторождения "Центральный Таджикистан"

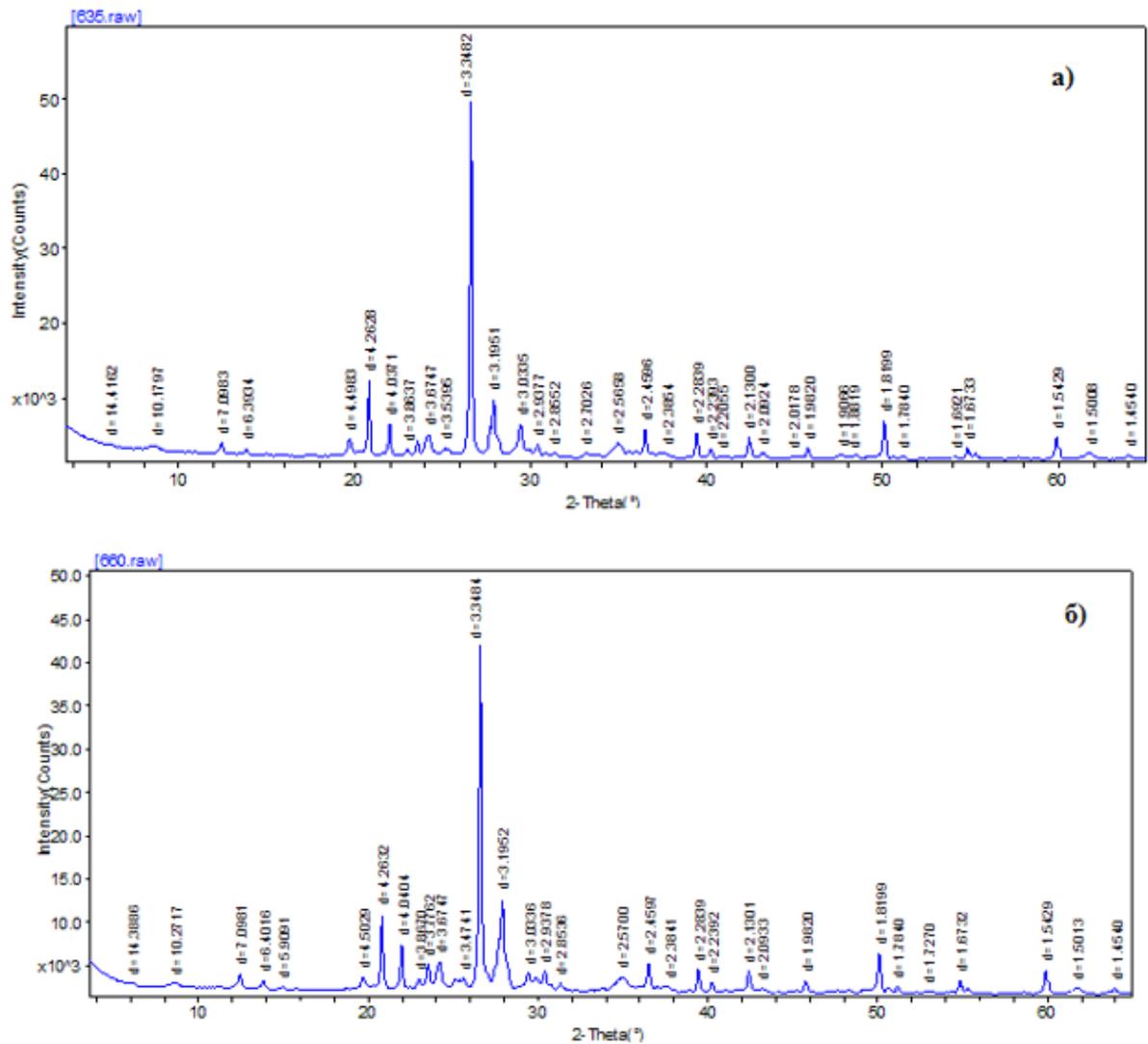


Рисунок 2.15 - Влияние углов вращения детектора оборудования на интенсивность пиков, отвечающих за индивидуальные минералы: (а) образец 635, (б) образец 660

2.4.3. Месторождение "Западный Таджикистан"

Минералогический состав руды определяли рентгенофазовым анализом на приборе ДРОН-3 (модернизированный) с цифровой обработкой на медном аноде (35 кВ и 20 мА) и никелевым фильтром. Основными минералами руды являются кварц, альбит, мусковит, пирит, уранинит, урановая слюда (рисунок 2.16) [211].

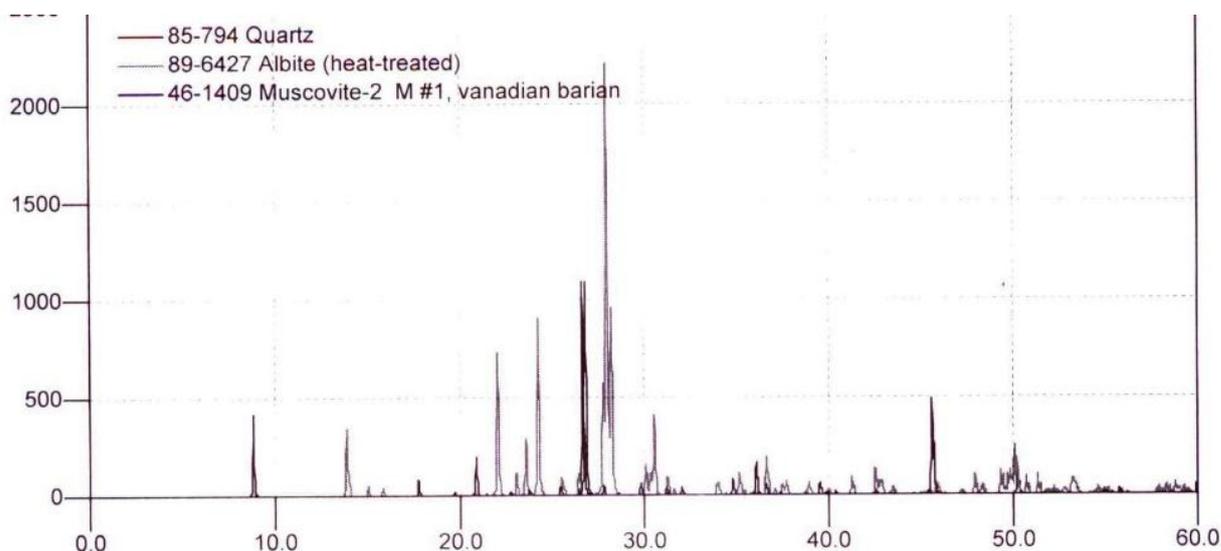


Рисунок 2.16 - Рентгенограмма руды месторождения "Западный Таджикистан"

2.4.4. Месторождение "Восточный Памир"

Рентгенофазовый анализ на оборудовании XRDynamic 500 позволил выявить минералогический состав урановой руды месторождения "Восточный Памир" Восточный Памир». Максимальная угловая скорость составляет 15 °/секунду. Максимальное угловое разрешение данного прибора равно 0.021° (FWHM первого пика LaB₆). Максимальный используемый угловой диапазон в XRDynamic 500 составляет -95° - 162.5° 2θ. Исследования РФА подтвердили наличие в урансодержащей руде ключевых минералов, включая уранинит (в виде урановой слюды), кальцит, доломит и незначительное количество кварца, являющихся основными составляющими руды (рисунок 2.17) [212].

Поскольку карбонаты в составе руды представлены максимальными содержаниями, то эффективна её переработка методом карбонатного выщелачивания.

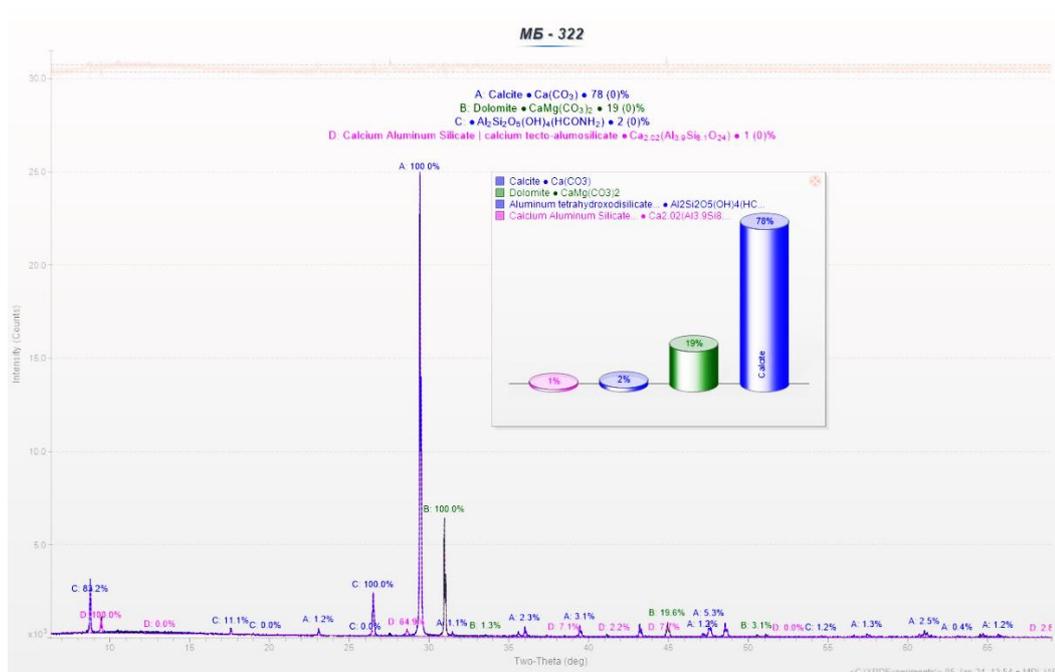


Рисунок 2.17 – Результаты РФА ураносодержащей руды месторождения "Восточный Памир"

2.4.5. Рентгенофазовый анализ ураносодержащей руды месторождения "Северный Таджикистан - 2"

В данном разделе представлены результаты исследования химико-минералогического состава ураносодержащей руды месторождения «Северный Таджикистан-2». По данным рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) установлено, что основные рудообразующие минералы включают урановую слюду, уранинит, пирит, мусковит, альбит и кварц [216].

В настоящее время запасы богатых урановых руд в Северном Таджикистане практически исчерпаны. Исчерпание этих запасов требует разработки новых технологий, ориентированных на переработку бедных месторождений. Перспективным направлением является получение урановых концентратов из ураносодержащих хвостов и забалансовых бедных руд.

Анализ вещественного и химического состава урановых руд выполнялся методом РФА с использованием современного оборудования: вакуумного спектрометра «AxiosmAX Advanced» и рентгеновского дифрактометра

«ULTIMA-IV» производства Rigaku (Япония). Минералогический анализ образцов ураносодержащей породы месторождения "Северный Таджикистан - 2" проводился методом рентгенофазового исследования на устройстве "ДРОН-3" с системой цифрового анализа данных.

Поскольку силикатные минералы являются преобладающими в указанной руде, её обработку более эффективно осуществлять посредством серно-кислотного выщелачивания.

Результаты РФА позволили определить основные рудообразующие минералы в исследованных образцах, к которым относятся урановая слюда, ортоклаз, альбит и кварц (рисунок 2.18). Обобщённые данные исследований приведены в таблице 2.17.

Концентрация урана в породе была определена на уровне 0.2%. Учитывая преобладание силикатных компонентов, оптимальный метод извлечения включает кислотное воздействие, приоритетным среди которых является серно-кислотное выщелачивание.

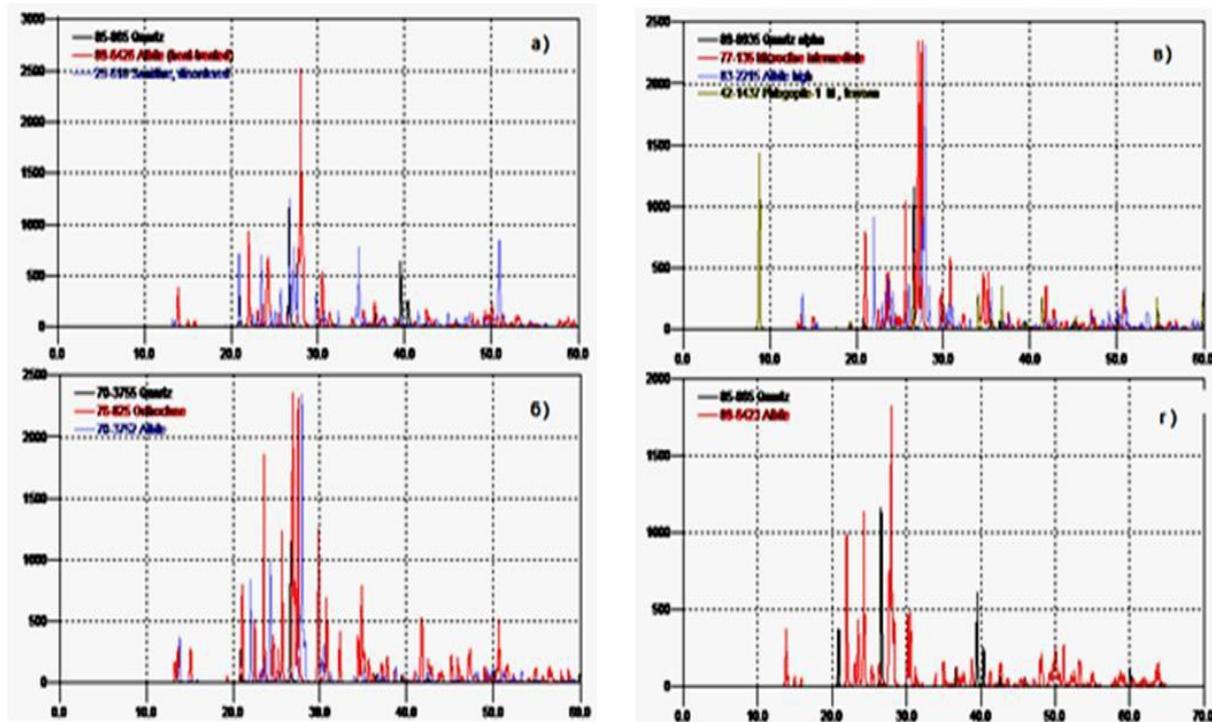


Рисунок 2.18 - Рентгенограмма пробы ураносодержащей руды месторождения "Северный Таджикистан - 2"

Таблица 2.17 – Петрографическая и минералогическая оценка проб урансодержащей руды (месторождение "Северный Таджикистан - 2")

Образцы	Названия минералов	Концентрация (в %)		
		№1	легкая фракция	серая фракция
Образцы руды	Альбит – $K(Si_{0.75}Al_{0.25})_4O_8$	–	–	1.67
	Кварц - SiO_2	87.67	90.64	92.99
	Флогопит – $K(Mg, Fe)_3(Al, Fe)Si_3O_{10}(OH, F)_2$	–	–	3.25
	Альбит – $(K_{0.88}Na_{0.10}Ca_{0.009}Ba_{0.012})(Al_{1.005}Si_{2.995}O_8)$	–	2.48	–
	Альбит - $Na(AlSi_3O_8)$	12.33	–	–
	Ортоклаз – $(Na_{0.98}Ca_{0.02})(Al_{1.02}Si_{2.98}O_8)$	–	6.88	–
	Микроклин – $K_{0.2}Na_{0.8}AlSi_3O_8$	–	–	2.09
Образцы из отвала	Кварц - SiO_2	88.16	–	–
	Альбит - $Na(AlSi_3O_8)$	11.84	–	–

2.5. Термодинамическая оценка протекания реакций минералов руд

2.5.1. Термодинамический анализ протекающих процессов при сернокислотном выщелачивании руд месторождений "Западный Таджикистан" и "Центральный Таджикистан"

В работе [217] изучены термодинамические характеристики процессов дегидратации и термического разложения уранилнитрата и уранилсульфата.

Найдены термодинамические функции процесса разложения указанных соединений.

Руды месторождений «Западный Таджикистан» и «Центральный Таджикистан» имеют сложный состав. Рентгенофазовым анализом установлено, что в состав этих руд входят следующие минералы, которые приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.18 - Минералогический состав месторождений «Западный Таджикистан» и «Центральный Таджикистан»

Месторождение «Западный Таджикистан»	Месторождение «Центральный Таджикистан»
Уранинит (UO_2)	Коффинит $(U,Th)SiO_4(OH)_4$
Мусковит $(KA_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2)$	Доломит $(CaCO_3 \cdot MgCO_3)$
Альбит $(Na[AlSi_3O_8])$	Уранофан $(CaUO_2SiO_3(OH)_2 \cdot 5H_2O)$
Пирит (FeS_2)	Каолинит $(Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O)$
	Сфен $(CaTiSiO_4)$

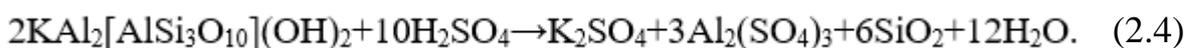
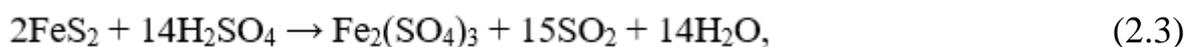
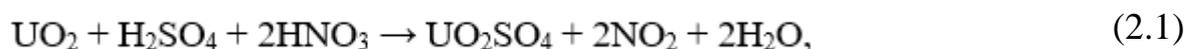
В таблице 2.19 приведены справочные данные по изменению энтальпии и энтропии веществ и минералов, которые содержатся в урановых рудах месторождений «Западный Таджикистан» и «Центральный Таджикистан».

Таблица 2.19 - Термодинамические характеристики минералов месторождений «Западный Таджикистан» и «Центральный Таджикистан»

Соединения	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К	ΔH_{298}^0 , кДж/моль
UO_2 (тв)	0,08	-1081,23
H_2SO_4 (ж)	0,157	-814,2
$Na[AlSi_3O_8]$ (тв)	0,2074	-3938,8
FeS_2 (тв)	0,053	-163,18
HNO_3 (ж)	0,155	-174,14
$Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O$ (т)	0,203	-4098,65

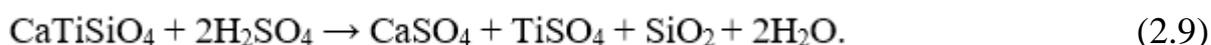
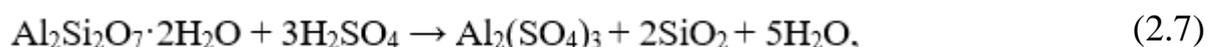
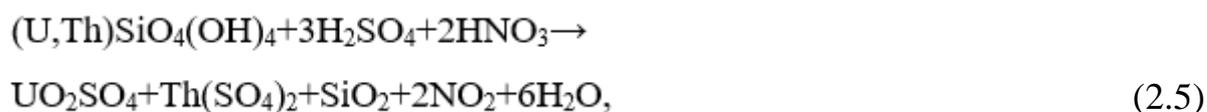
TiSO ₄ (p-p)	-	-1601,4
CaTiSiO ₄ (т)	-0,173	-2600,56
CaSO ₄ (p-p)	-	-1454,06
UO ₂ SO ₄ (p-p)	-	-1929,7
CaCO ₃ ·MgCO ₃ (т)	-	-2311,7
MgSO ₄ (p-p)	-	-1379,1
Na ₂ SO ₄ (p-p)	-	-1395,9
NO ₂ (г)	-	33,5
H ₂ O ж	-	-285,8
CO ₂ (г)	-	-398,78
Al ₂ (SO ₄) ₃ (p-p)	-	-3792,33
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (p-p)	-	-2825,7

В процессе взаимодействия серной кислоты с минеральными компонентами руд месторождения «Западный Таджикистан» могут протекать различные химические реакции, обуславливающие эффективное извлечение урана. Эти реакции зависят от минералогического состава руды и включают как кислотно-основные, так и окислительно-восстановительные процессы. Ниже представлены наиболее вероятные направления протекания химических превращений:



В ходе химического взаимодействия серной кислоты с минеральной составляющей урансодержащей руды, добытой на месторождении «Центральный Таджикистан», возможно протекание ряда характерных реакций, определяющих эффективность процесса выщелачивания. Учитывая преобладание

карбонатных соединений в структуре этой руды, а также наличие сульфидов и алюмосиликатов, можно выделить следующие основные направления химических превращений:



Для каждой из приведённых выше химических реакций (2.1)-(2.9) были проведены расчёты термодинамических параметров. Полученные значения, отражающие энергетическую целесообразность протекания указанных процессов, систематизированы и представлены в сводных таблицах 2.20 и 2.21.

Таблица 2.20 - Расчёт термодинамических характеристик реакций при взаимодействии минералов руды месторождений «Западный Таджикистан» и «Центральный Таджикистан» с серной кислотой

№ реакции	ΔS^0_{298} , Дж/моль·К	ΔH^0_{298} , кДж/моль	ΔG^0_{298} , кДж/моль
(2.1)	0,006	-190,62	-192,41
(2.2)	-0,924	-662,7	-387,35
(2.3)	1,84	482,63	-65,7
(2.7)	0,79	-502,11	-737,53
(2.8)	-0,057	-262,28	-245,3
(2.9)	0,1705	-309,1	-359,91

Результаты расчёта термодинамических характеристик предполагаемых реакций (2.1)-(2.9) (таблица 2.21) указывают на вероятность протекания процесса в стандартных условиях. В таблице 2.21 и на рисунке 2.19 приведены

результаты влияния температуры на значения энергии Гиббса рассматриваемых процессов. Как видно из таблицы 2.21 и рисунка 2.19, повышение температуры способствует протеканию всех рассматриваемых реакций (2.1)-(2.9). Для реакций (2.4)-(2.6) не найдены значения энергии Гиббса, так как для минералов мусковит, коффинит и уранофан в литературе отсутствуют термодинамические характеристики.

Таблица 2.21 - Значения энергии Гиббса (ΔG , кДж/моль) при различных температурах в реакциях (2.1)-(2.9)

№ схемы	ΔG^0_{373}	ΔG^0_{353}	ΔG^0_{333}	ΔG^0_{313}	ΔG^0_{298}
(2.1)	-188,41	-188,53	-188,64	-188,76	-192,41
(2.2)	317,91	-336,4	-354,9	-373,36	-387,35
(2.3)	-203,7	-166,9	-130,1	-93,3	-65,7
(2.7)	-796,8	-780,98	-765,18	-749,38	-737,53
(2.8)	-241,02	-242,16	-243,3	-244,44	-245,3
(2.9)	372,7	-369,28	-365,88	-362,47	-359,91

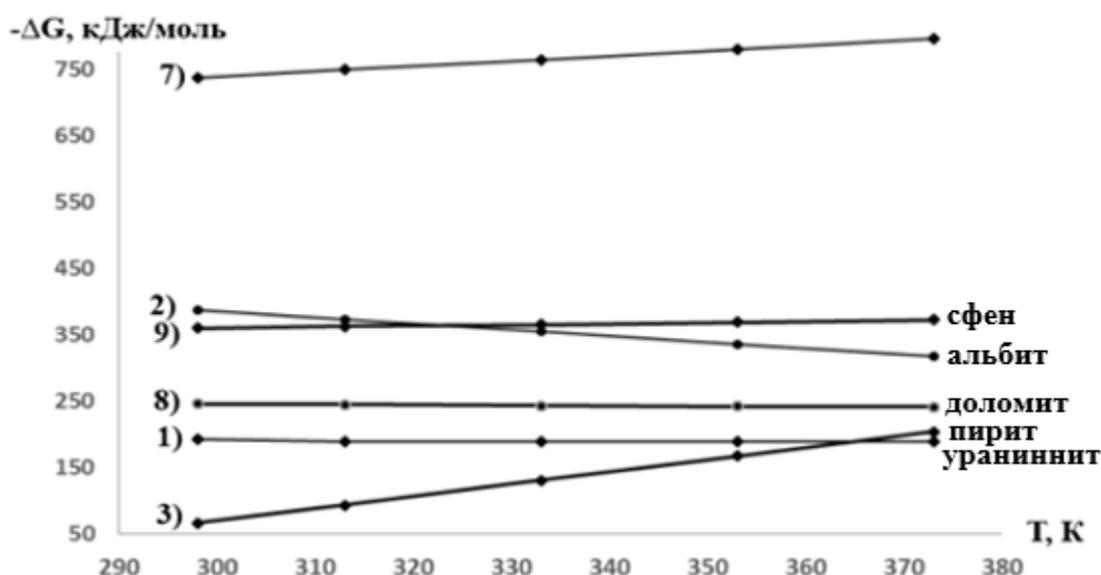


Рисунок 2.19 - Сравнительная диаграмма зависимости свободной энергии Гиббса (ΔG) от температуры для минералов из месторождений "Западный Таджикистан" и "Центральный Таджикистан"

Таким образом, проведённый анализ показывает, что процесс сернокислотного выщелачивания урансодержащих руд, добытых на месторождениях «Западный Таджикистан» и «Центральный Таджикистан», требует реализации в температурном интервале 298–373 К для обеспечения оптимального извлечения целевых компонентов. Соблюдение данного температурного режима способствует повышению степени извлечения урана и других полезных элементов.

2.5.2. Термодинамический анализ протекающих процессов при разложении урансодержащих руд серной кислотой

Обсуждаются результаты, полученные при термодинамическом анализе процессов разложения минеральных компонентов урансодержащей руды месторождения «Октябрьский» (также обозначенного как «Северный Таджикистан – 2») под воздействием серной кислоты [218]. Для целей исследования были отобраны несколько образцов рудного материала, прошедших комплексное лабораторное обследование, включающее рентгенофазовый анализ (РФА) и дифференциально-термический анализ (ДТА). На основании полученных аналитических данных удалось провести детальную идентификацию минерального состава данной руды. По результатам РФА и интерпретации ДТА было установлено, что минеральная структура урансодержащих пород месторождения «Северный Таджикистан – 2» (сводная информация приведена в таблице 2.19) представлена следующими компонентами: кварц, уранофан, каолинит, сфен, альбит, уранинит и пирит. Дополнительно, таблица 2.22 содержит уточнённую минералогическую характеристику, позволившую определить относительное содержание указанных минералов.

Для минеральных компонентов урансодержащей руды месторождения «Северный Таджикистан – 2» были проведены расчёты ключевых термодинамических параметров, включая значения стандартной энтальпии образования, энтропии и изменения энергии Гиббса. Результаты этих расчётов охватывают

как твёрдые минеральные фазы, так и отдельные жидкие соединения, в том числе продуктивные растворы, образующиеся в процессе выщелачивания, и представлены в таблице 2.23.

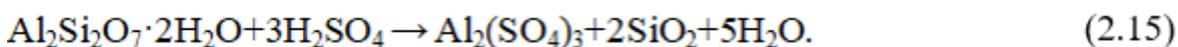
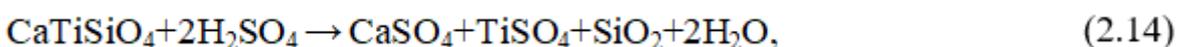
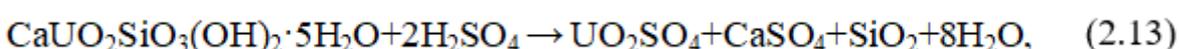
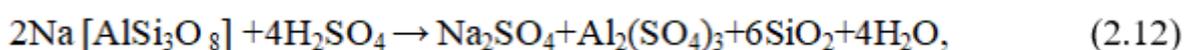
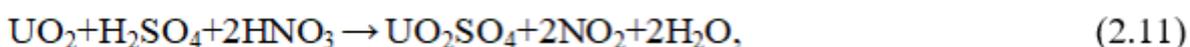
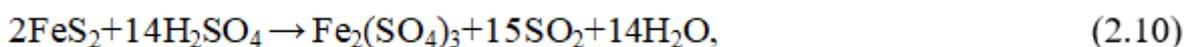
Таблица 2.22 – Минералы ураносодержащей руды месторождения «Октябрьский»

№ п/п	Минералы
1	Пирит (FeS_2)
2	Сфен (CaTiSiO_4)
3	Уранинит (UO_2)
4	Альбит ($\text{Na[AlSiO}_8]$)
5	Кварц (SiO_2)
6	Каолинит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
7	Уранофан ($\text{CaUO}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Таблица 2.23 – Энтальпия и энтропия некоторых минералов руд (месторождение "Северный Таджикистан - 2")

Соединения	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К	ΔH_{298}^0 , кДж/моль
UO_2 (тв.)	0.08	-1081.23
H_2SO_4 (ж.)	0.157	-814.2
$\text{Na[AlSi}_3\text{O}_8]$ тв.	0.2074	-3938.8
FeS_2 (тв.)	0.053	-163.18
CaTiSiO_4 (т.)	-0.173	-2600.56
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (т)	0.203	-4098.65
HNO_3 (ж.)	0.155	-174.14
UO_2SO_4 (р-р)	0.0812	-1929.7
CaSO_4 (р-р)	-0.04	-1454.06
TiSO_4 (р-р.)	-0.1733	-1601.4
Na_2SO_4 (р-р)	0.136	-1395.9
NO_2 (газ)	0.24	33.5
H_2O (ж.)	0.07	-285.8
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (р-р)	-0.564	-2825.7
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (р-р)	0.55	-3792.33

Кроме того, в рамках исследования была выявлена специфика химических превращений, инициируемых серной кислотой при взаимодействии с минеральной матрицей рудного материала. Установлено, что воздействие кислоты запускает ряд химических реакций, приводящих к специфическим изменениям в составе вещества:



Фундаментальные термодинамические параметры, определяющие состояние системы, включают энтальпию (ΔH_p^0), энтропию (ΔS_p^0) и энергию Гиббса (ΔG_p^0). Исходя из этого, для исследования процессов разложения минералов ураносодержащей породы были выбраны соответствующие математические зависимости. В рамках проведённых расчётов использованы следующие выражения:

- для энтальпии: ($\Delta H_p^0 = \sum \Delta_f H_{\text{продукт}}^0 - \sum \Delta_f H_{\text{исходное вещество}}^0$),

- для энтропии: ($\Delta S_p^0 = \sum \Delta_f S_{\text{продукт}}^0 - \sum \Delta_f S_{\text{исходное вещество}}^0$),

- для энергии Гиббса: ($\Delta G_p^0 - T\Delta S^0$).

На основании этих уравнений были вычислены термодинамические характеристики каждой из приведённых выше химреакций (2.10) – (2.15), которые обобщаются в таблицах 2.24 и 2.25.

Исследование термодинамических свойств химических реакций (2.10)-(2.15) (таблица 2.24) показывает, что для разложения ураносодержащей руды сернокислотным методом необходимы стандартные условия.

Таблица 2.24 – Величины термодинамических характеристик реакций (2.10) – (2.15), протекающих при разложении минералов руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" сернокислотным методом

Реакции	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔG_{298}^0 , кДж/моль
(2.10)	184.0×10^{-2}	4.83×10^2	0.65×10^2
(2.11)	0.6×10^{-2}	-1.91×10^2	-1.92×10^2
(2.12)	-92.4×10^{-2}	-6.63×10^2	-3.87×10^2
(2.14)	17.1×10^{-2}	-3.10×10^2	-3.60×10^2
(2.15)	79.0×10^{-2}	-5.02×10^2	-7.38×10^2

Таблица 2.25 и рисунок 2.20 характеризуют результаты исследования влияния температуры на трансформацию значений энергии Гиббса. Анализ этих данных свидетельствует о том, что рост температуры способствует активизации химических преобразований в составе руды.

Таблица 2.25 - Расчёт ΔG реакций 2.10–2.15 при сернокислотном разложении урановых минералов из месторождения "Северный Таджикистан - 2"

Реакции	ΔG_{373}^0	ΔG_{353}^0	ΔG_{333}^0	ΔG_{313}^0	ΔG_{298}^0
	ΔG , кДж/моль				
(2.10)	-2.04×10^2	-1.67×10^2	-1.30×10^2	-0.93×10^2	-0.66×10^2
(2.11)	-1.88×10^2	-1.89×10^2	-1.89×10^2	-1.89×10^2	-1.92×10^2
(2.12)	-3.18×10^2	-3.36×10^2	-3.55×10^2	-3.73×10^2	-3.87×10^2
(2.14)	-3.73×10^2	-3.69×10^2	-3.66×10^2	-3.62×10^2	-3.60×10^2
(2.15)	-7.97×10^2	-7.81×10^2	-7.65×10^2	-7.49×10^2	-7.38×10^2

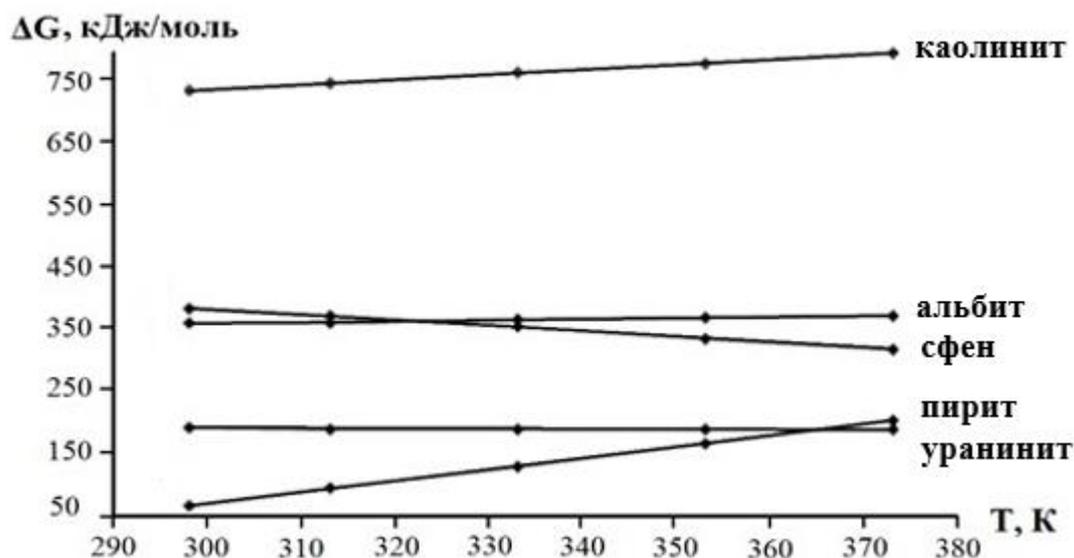


Рисунок 2.20 – Влияние температуры разложения минералов руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" на энергию Гиббса процессов

Кроме того, в ходе термодинамических расчётов и анализа экспериментальных данных был определён оптимальный температурный диапазон, при котором процесс разрушения минеральных компонентов урановой руды рассматриваемого месторождения посредством сернокислотного выщелачивания протекает с наибольшей эффективностью. Установлено, что температурный интервал 298–373 К способствует активному протеканию ключевых химических реакций, обеспечивающих максимальное извлечение целевых элементов, включая уран.

2.5.3. Термодинамический анализ процессов при сернокислотном выщелачивании руд месторождения "Танзим"

Ураносодержащие руды месторождения "Танзим" отличаются сложной минералогической структурой. Проведённый рентгенофазовый анализ позволил идентифицировать их состав, который представлен в таблице 2.26.

В дополнение к проведённому исследованию термодинамические параметры выявленных минералов, охватывающие значения энтальпии и энтропии, были детально изучены и систематизированы в таблице 2.27 [219].

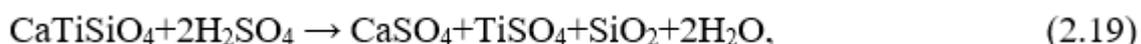
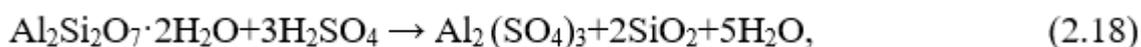
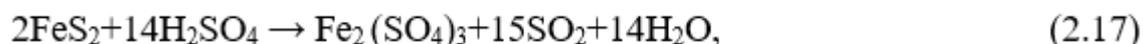
Таблица 2.26 – Основные минералы урановой руды месторождения "Танзим"

№	Минералы
1.	Пирофиллит – $Al_2[OH]_2[Si_4O_{10}]$
2.	Уранинит – UO_2
3.	Галенит - PbS
4.	Пирит - FeS_2
5.	Каолинит – $Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O$
6.	Сфен - $CaTiSiO_4$

Таблица 2.27 – Термодинамические показатели минералогического состава урановой руды месторождения "Танзим"

Соединения	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К	ΔH_{298}^0 , кДж/моль
UO_2 (т)	80	-1081.23
$Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O$ (т)	203	-4098.65
FeS_2 (т)	53	-163.18
H_2SO_4 (ж)	157	-814.2
$CaSO_4$ (р-р)	-40	-1454.06
HNO_3 (ж)	155	-174.14
$CaTiSiO_4$ (т)	173	-2600.56
NO_2 (г)	240	33.5
$TiSO_4$ (р-р)	-173.3	-1601.4
UO_2SO_4 (р-р)	81.2	-1929.7
$Fe_2(SO_4)_3$ (р-р)	-564	-2825.7
H_2O ж	70	-285.8
$Al_2(SO_4)_3$ (р-р)	550	-3792.33
SiO_2 (т)	41.84	-910.94
S (т)	167.7	1.68
SO_2 (г)	248.1	-296.9
$Al_2[OH]_2\{Si_4O_{10}\}$ (т)	236.8	42.342
PbS (т)	91.21	-100.42
$PbSO_4$ (т)	31.01	-911.9

Чтобы понимать механизмы, которые происходят в минералах руды месторождения "Танзим" при её разложении серноокислотным методом, были составлены теоретические химреакции этих процессов:



Следующим этапом были вычислены термодинамические характеристики каждой из приведённых выше химреакций (2.16) – (2.21), которые обобщаются в таблице 2.28.

Анализ термодинамических характеристик, рассчитанных для реакций (2.16)–(2.21) (таблица 2.28), демонстрирует, что эффективное разложение урансодержащей руды при использовании серноокислотной технологии возможно при соблюдении стандартных условий.

Дополнительно, таблица 2.29 и рисунок 2.21 представляют результаты моделирования влияния температурного фактора на изменение энергии Гиббса для данных процессов. Из анализа приведённых данных следует, что с увеличением температуры наблюдается значительное снижение значения ΔG° , что свидетельствует о термодинамическом усилении направленности реакций и интенсификации их протекания. Кроме того, в ходе исследования был установлен оптимальный температурный интервал для эффективного разложения урансодержащей руды методом серноокислотного выщелачивания ($T=298\text{--}373\text{ K}$).

Таким образом, установлено, что наиболее благоприятные условия для эффективного разложения минеральных компонентов урансодержащей руды месторождения «Танзим» достигаются при температуре в диапазоне $T = 298\text{--}$

373 К. Именно в этом интервале обеспечивается максимальный уровень разрушения исходной кристаллической структуры минералов, что, в свою очередь, способствует интенсификации процессов выщелачивания и обеспечивает высокую степень извлечения целевых соединений, включая уран.

Таблица 2.28 – Термодинамические показатели процессов разложения минералов урановой руды месторождения "Танзим" в среде серной кислоты (реакции (2.16) – (2.21))

Реакции	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔG_{298}^0 , кДж/моль
(2.16)	0.01	-190.62	-192.41
(2.17)	1.84	482.63	-65.7
(2.18)	0.79	-502.11	-737.53
(2.19)	0.17	-309.1	-359.91
(2.20)	-0.06	-617.9	-599.72
(2.21)	0.932	115.72	-162.02

Таблица 2.29 – Термодинамический анализ (энергии Гиббса) реакций (2.16) – (2.21) минералов руды месторождения "Танзим" при серноокислотном выщелачивании при T=298 – 373 К

Реакции	ΔG_{373}^0	ΔG_{353}^0	ΔG_{333}^0	ΔG_{313}^0	ΔG_{298}^0
	ΔG , кДж/моль				
(2.16)	-188.41	-188.53	-188.64	-188.76	-192.41
(2.17)	-203.7	-166.9	-130.1	-93.3	-65.7
(2.18)	-796.8	-780.98	-765.18	-749.38	-737.53
(2.19)	372.7	-369.28	-365.88	-362,47	-359.91
(2.20)	-595.15	-596.37	-597.59	-598,81	-599.72
(2.21)	-231.9	-213.3	-194.94	-175.96	-162.02

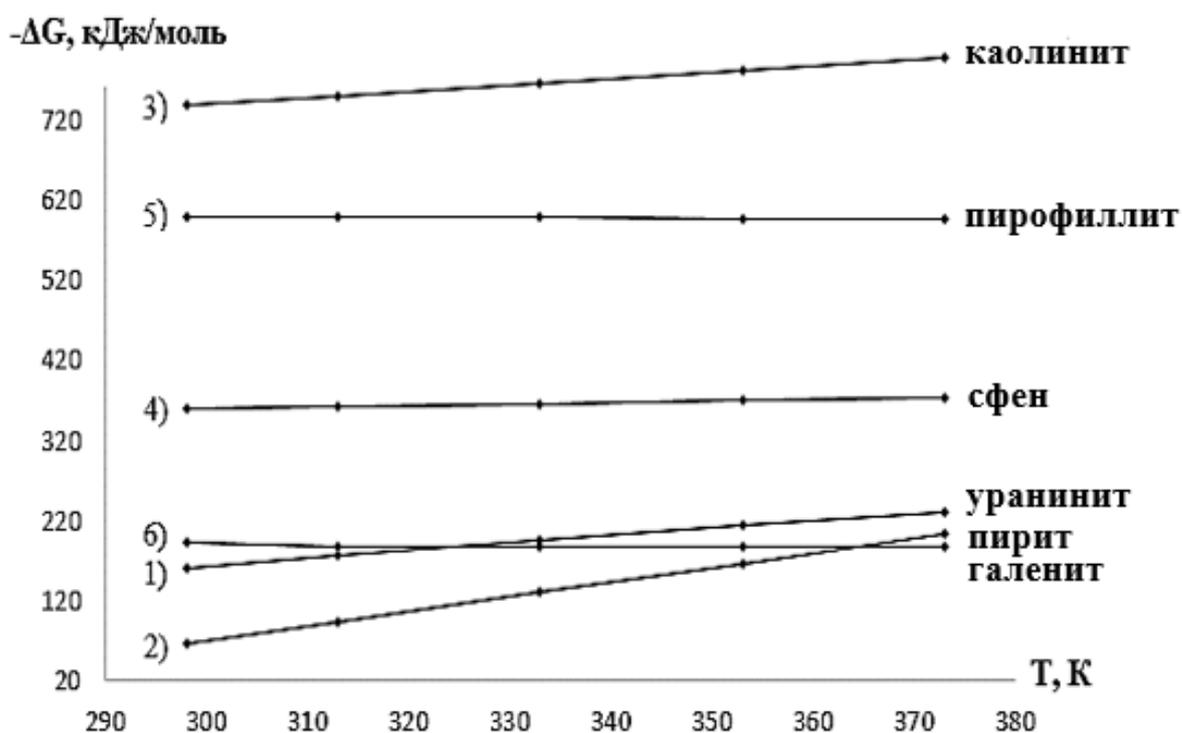


Рисунок 2.21 – Изменение энергии Гиббса в процессе разложения минералов урановой руды месторождения "Танзим" при варьировании температуры

2.5.4. Термодинамический анализ химических процессов при кислотном разложении урансодержащей руды месторождения "Восточный Памир"

Определение энергии Гиббса позволяет оценить вероятность протекания химической реакции при заданной температуре. Для расчёта этого параметра необходимо учитывать изменения энтальпии и энтропии реакции. Отрицательное значение энергии Гиббса свидетельствует о том, что данное химическое превращение возможно в рассматриваемых условиях.

В исследовании [220] проведён термодинамический анализ химических процессов, сопровождающих кислотное воздействие на урановую руду месторождения «Восточный Памир». Вычисленные параметры энергии Гиббса для реакций с участием минералов данного месторождения подтверждают их термодинамическую осуществимость и вероятность протекания.

В исследованиях [221-223] рассмотрен процесс разложения урановых минералов под воздействием минеральных кислот. Определены оптимальные условия кислотного расщепления руды и предложена технологическая схема

переработки урансодержащего сырья. В научных работах [224, 225] выполнено термодинамическое описание процессов дегидратации и термического разложения уранилнитрита и уранилсульфата, а также рассчитаны термодинамические функции этих процессов.

Урановые руды месторождения "Восточный Памир" характеризуются сложной геохимической структурой с преобладанием карбонатных соединений. По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что основными минералами породы являются минералы – уранинит, кальцит, альбит, доломит. Развёрнутая информация о минералогическом составе рассматриваемой руды приводится в таблице 2.30.

Таблица 2.30 – Основные минералы, входящие в состав урансодержащей руды (месторождение "Восточный Памир")

Название минерала	Химическая формула
Уранинит	UO ₂
Пирит	FeS ₂
Доломит	CaCO ₃ ·MgCO ₃
Альбит	Na[AlSi ₃ O ₈]
Кальцит	CaSO ₃

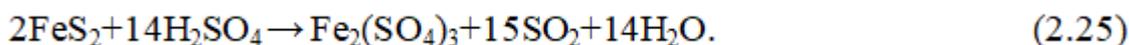
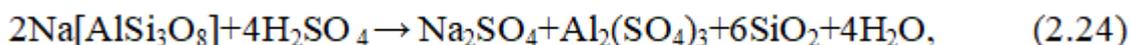
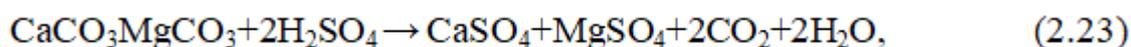
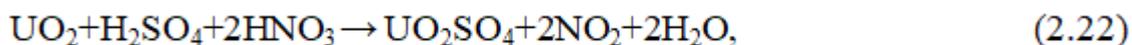
В таблице 2.31 приведены вспомогательные сведения об изменении энтальпии и энтропии веществ, участвующих в химических процессах, в том числе минералов, содержащихся в урановой руде рудника «Восточный Памир».

Таблица 2.31 - Термодинамическое описание минералов руды рудника «Восточный Памир»

Соединения	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К
UO ₂ (т)	- 1081,23	0,08
FeS ₂ (т)	-163,18	0,053

H ₂ SO ₄ (ж)	- 814,2	0,157
HNO ₃ (ж)	- 174,14	0,155
CaSO ₄ (р-р)	-1454,06	-0,04
CaCO ₃ +MgCO ₃ (т)	-2311,7	0,155
MgSO ₄ (р-р)	-1379,1	-0,116
Na[AlSi ₃ O ₈] (т)	- 3938,8	0,2074
UO ₂ SO ₄ (р-р)	-1929,7	0,0812
Na ₂ SO ₄ (р-р)	-1395,9	0,136
NO ₂ (г)	33,5	0,24
H ₂ O (ж)	-285,8	0,07
Al ₂ (SO ₄) ₃ (р-р)	-3792 , 33	0,55
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (р-р)	-2825,7	- 0, 564
CO ₂ (г)	-398 , 78	0,2 14
SO ₂ (г)	-296,9	0,2481
SiO ₂ (т)	-910,9	0,042

Для понимания механизмов, по которым осуществляется разложение минералов руды месторождения "Восточный Памир" при воздействии на неё серной кислоты, нами составлены вероятные теоретические химреакции этих процессов:



Изменение энтальпии (ΔH) и энтропии (ΔS) каждой реакции определялось с использованием закона Гесса, а свободная энергия (ΔG) для каждой реакции определялась с использованием формулы Гиббса, как показано в таблицах 2.32 и 2.33.

Таблица 2.32 - Изменение энтальпии, энтропии и энергии Гиббса при действии серной кислоты на минералы руды рудника "Восточный Памир"

Реакции	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К	ΔG_{298}^0 , кДж/моль
(2.22)	- 190,62	0,01	- 192,41
(2.23)	- 262,28	-0,057	- 245,30
(2.24)	-662,7	-0,924	-387,35
(2.25)	482,63	1,84	- 65,70

Таблица 2.33 - Значения ΔG реакций, протекающих при кислотном разложении руды месторождения "Восточный Памир" (реакции 2.22–2.25)

Реакции	ΔG_{373}^0	ΔG_{353}^0	ΔG_{333}^0	ΔG_{313}^0	ΔG_{298}^0
	ΔG , кДж/моль				
(2.22)	-188.41	-188.53	-188.64	-188.76	- 192.41
(2.23)	-241.02	-242.16	-243.30	-244.44	-245.30
(2.24)	-317.91	-336.4	-354.90	-373.36	-387.35
(2.25)	-203.7	-166.9	-130.10	-93.30	- 65.70

В рамках исследования ставилась задача изучения воздействия температурного режима на уровень энергии Гиббса в анализируемых процессах. Результаты отражены соответственно в таблице 2.33 и на рисунке 2.22. Как следует из графика 2.22, увеличение температуры создаёт благоприятные условия для протекания большинства реакций с участием серной кислоты.

Анализ термодинамических вычислений демонстрирует вероятность протекания упомянутых химических реакций в стандартных условиях. Следовательно, разложение урановой руды месторождения "Восточный Памир" с использованием серной кислоты может происходить при температурах от 298 до 373 К, сопровождаясь образованием целевых компонентов.

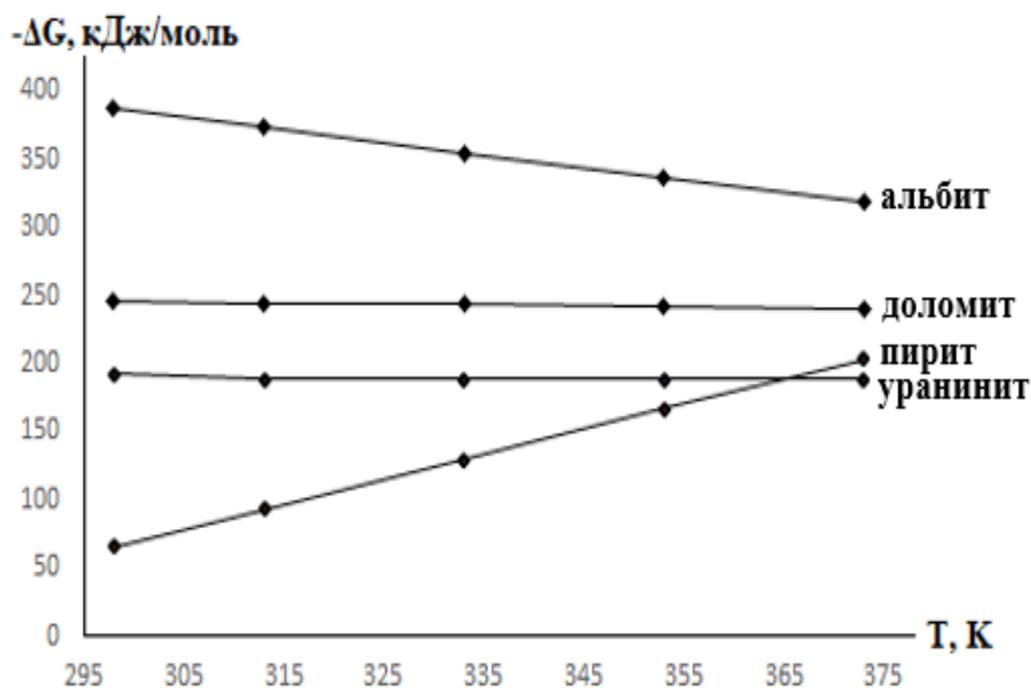


Рисунок 2.22 – Влияние температуры разложения минералов руды месторождения "Восточный Памир" на энергию Гиббса процессов

2.6. Материальный баланс переработки урановых руд

2.6.1. Расчёт материального баланса сернокислотного разложения руды месторождения "Северный Таджикистан - 2"

Одним из важнейших этапов проведённого исследования стало составление материального баланса, описывающего процессы разрушения минеральной структуры урансодержащих руд. В частности, для руды, добытой на месторождении «Северный Таджикистан – 2», были выполнены расчёты, отражающие количественные аспекты химического взаимодействия с серной кислотой. В рамках моделирования технологического процесса была принята условная масса рудного материала, равная 1 кг. В качестве реагента использовался раствор серной кислоты с массовой концентрацией 30%. Согласно результатам проведённых расчётов, общее количество серной кислоты, необходимое для полного протекания реакций деструкции минеральной матрицы, составило 1209,6 г, что в пересчёте на 100%-ное содержание кислоты эквивалентно 644 г (таблица 2.34).

Таблица 2.34 – Количественные показатели сернокислотного разложения урановой руды месторождения «Северный Таджикистан – 2» (на 1 кг образца)

Приход	%	В г	Расход	%	В г
SrO	0.007	0.13	SrSO ₄	0.01	0.23
MnO ₂	0.005	0.11	Mn(SO ₄) ₂	0.014	0.31
ZnO	0.006	0.13	ZnSO ₄	0.012	0.26
Co ₂ O ₃	0.0086	0.19	Co ₂ (SO ₄) ₃	0.02	0.45
SiO ₂	39.02	862.32	SiO ₂ , включая элементы, не участвующие в реакции	58.92	1301.81
Fe ₂ O ₃	4.07	90.00	Fe ₂ (SO ₄) ₃	10.18	225
PbO ₂	0.014	0.30	Pb(SO ₄) ₂	0.023	0.51
UO ₂	0.001	0.02	UO ₂ SO ₄	0.001	0.03
Кристаллизационная вода	2.1284	46.80	H ₂ O	13.82	304.5
H ₂ SO ₄ , 30%	54.74	1209.60	H ₂ SO ₄ , избыток	17.0	376.5
<i>Итого:</i>	100	2209.60	<i>Итого:</i>	100	2209.6

Анализ расчётов показал, что при использовании 644 г H₂SO₄ извлечение оксида урана (UO₂) достигло 75,7 процентов, что свидетельствует о высокой эффективности разложения. По итогам эксперимента было получено 0,22 г уранилсульфата UO₂SO₄, однако порядка 24,3% урансодержащей руды остались не задействованными в химической реакции, что говорит о наличии остаточного неразложенного вещества. Расходная часть материального баланса представляла собой значительный избыток серной кислоты, численное значение которой составило 376,5 г, что может указывать на необходимость корректировки параметров процесса для оптимизации расхода реагента.

2.6.2. Расчёт материального баланса сернокислотного разложения руды месторождения "Танзим"

Для количественной оценки эффективности разложения урансодержащей руды месторождения «Танзим» был выполнен расчёт материального баланса, методически аналогичный представленному в подразделе 2.6.1. В рамках расчётов использовали навеску массой 1 кг, которая подвергалась обработке водным раствором серной кислоты с концентрацией 30 %. В результате химического взаимодействия общее потребление серной кислоты составило 1224,4 г. Для унификации расчётов и сопоставления с другими условиями был осуществлён пересчёт на абсолютное содержание 100 %-ной серной кислоты. Согласно полученным данным, разложение 1 кг урановой руды требует 651,9 г безводной H_2SO_4 , что представлено в обобщённой форме в таблице 2.35.

Таблица 2.35 – Материальный баланс разложения урановой руды месторождения "Танзим" сернокислотным методом (расчёт на 1 кг руды)

Приход	%	В г	Расход	%	В г
Al_2O_3	7.6	169	$Al_2(SO_4)_3$	20.65	459.35
TiO_2	0.8	17.6	$Ti(SO_4)_2$	0.795	15.9
Fe_2O_3	8.56	190.4	$Fe_2(SO_4)_3$	9.14	203.25
PbO	0.06	1.3	$PbSO_4$	0.195	2.27
SiO_2	22.42	498.19	SiO_2 , включая элементы, не участвующие в реакции	40.91	911.95
CaO	1.4	31	$CaSO_4$	2.4	53.43
UO_2	0.11	2.41	UO_2SO_4	0.07	1.49
Кристаллизационная вода	4.05	90.1	H_2O	8.8	195.7
H_2SO_4 , 30%	55	1224.4	H_2SO_4 , избыток	17.04	381.06
<i>Итого:</i>	100	2224.4	<i>Итого:</i>	100	2224.4

После применения указанного количества кислоты извлечение оксида урана (UO_2) из руды достигло 93,13 процента. В ходе эксперимента было получено 2,24 г уранилсульфата, при этом 6,87% руды не вступило в реакцию с кислотой. Материальный баланс также в расходной части показал наличие избытка серной кислоты в количестве 381,06 г, которая оказалась не задействованной в химической реакции, что может потребовать дальнейшего анализа для оптимизации расхода реагента.

2.7. Химический и минералогический состав радиоактивных отходов Таджикистана

2.7.1. Хвостохранилище «Карты 1-9»

Хвостохранилище «Карты 1-9» расположено на расстоянии около 6 км от территории гидрометаллургического завода, которую связывают с данной площадкой несколько ниток пульпопровода, покрытых ржавчиной, однако ещё пригодных к использованию. Поверхность хвостохранилища расположена на 100 м выше, чем промплощадка.

Для хвостов в [68] авторами определены содержания следующих химических элементов: уран-238 - 0.01-0.030%; железо – 4-8%; кальций - 10-15%; кварц и другие - 84-95.5%.

Также для отходов, образовавшихся в результате гидрометаллургического цикла, были определены гранулометрические характеристики, и полученные данные обобщены в таблице 2.36.

Одновременно изучены для указанных отходов их механико-физические и ситовые характеристики, и полученные данные также обобщены в таблице 2.37.

Оценка потенциала вторичного применения ураносодержащих отходов связана с проведением дополнительных геологоразведочных исследований на предмет концентрации урана.

Образцы материалов из отвальных массивов были взяты для лабораторных анализов с различных уровней высоты и участков захоронения отходов

Чкаловского хвостохранилища. Данные о базовых характеристиках проб (уровень содержания урана, размерный состав частиц) представлены в таблице 2.38.

Таблица 2.36 – Анализ гранулометрического состава отходов, хранящихся в хвостохранилище «Карты 1-9» (г. Чкаловск)

Размер фракций	Процент
< 0.074 мм	Илы, 50
+0.074 мм	до 20
+0.1 мм	до 15
+0.314 мм	до 10
+1 мм	до 1.0

Таблица 2.37 – Механико-физические характеристики ураносодержащих отходов хвостохранилища «Карты 1-9» (г. Чкаловск)

Фракция	Плотность, г/см ³	Влажность	Плотность минеральн. части, г/см ³	Угол внутреннего трения, φ ⁰	Пористость, %	Сцепление, МПа	Коефф. сжимаемости, МПа ⁻¹
Песчаная	1,45-1,72	11-12.5	-	≈20-20.5	31-41	0,011-0,042	0,4-0,06 (ρ=0.05-0.07 МПа)
Суглинистая (центр.слой)	-	4-6	2,6-2,7	-	-	-	-
Тонкодисперсная (глинистая)	1,84-1,90	15-20	2,6-2,7	0,003-0,002 (общее сопрот. сдвигу, МПа)	≈50	1,0-6,0 (ρ=0.01-0,15 МПа)	

Исследование данных табличного формата демонстрирует, что среднее арифметическое значение концентрации урана в отходах достигает 0,018 процентов.

Минералогические характеристики хвостов изложены на рисунке 2.23. Отличительной чертой урановых минералов является наличие в их структуре урана в форме кислородных соединений - оксидов урана.

Таблица 2.38 – Гранулометрическая характеристика песков (исходных) хвостохранилища «Карты 1-9» (г. Чкаловск)

Пробы	Содержание U в песках, %	Классы на выходе (в процентах)					
		Крупность классов, меш					
		–200	–150 + 200	–100 + 150	–80 + 100	–48 + 80	–30 + 48
1	0,016	44.8	25.8	18.2	6.8	3.5	0.9
2	0,027	42.0	19.2	25.5	9.6	2.4	1.3
3	0,018	36.2	21.0	26.0	8.5	6.6	1.7
4	0,031	36.4	23.1	25.5	6.8	6.8	1.4
5	0,013	34.5	28.9	24.3	5.6	5.8	0.9
6	0,027	39.6	26.7	23.0	4.3	5.7	0.7
7	0,011	35.1	32.1	22.1	6.6	3.8	0.3
8	0,008	38.3	32.3	18.2	6.8	3.5	0.9
9	0,016	40.7	26.4	18.8	7.2	5.6	1.3
10	0,012	35.9	38.1	13.2	8.1	3.6	1.1



Рисунок 2.23 – Концентрации оксидов и урана в составе отходов хвостохранилища «Карты 1-9» (г. Чкаловск)

2.7.2. Хвостохранилище Гафуров

Исследование [67] содержит результаты лабораторного анализа проб песчаных остатков, взятых из Гафуровского хвостохранилища.

Минералогическая структура отходов характеризуется следующими показателями (в процентах): концентрация урана-238 колеблется в диапазоне 0,008–0,518%, содержание железа составляет 3–5%, кальция - 5–10%, а основную массу (85–95%) составляют кварц и другие элементы.

Природные урановые минералы обладают отличительной особенностью - уран в них присутствует преимущественно в форме кислородсодержащих соединений — главным образом в виде оксидов различных степеней окисления. Урановые минералы, обнаруживаемые в естественных геологических условиях, практически не формируют стабильных соединений с серой, галогенами (фтор, хлор, бром, иод), азотом, а также с такими элементами, как вольфрам, олово, селен, теллур и представители платиновой группы. Кроме того, следует подчеркнуть, что металлический (самородный) уран в природе не встречается.

Образование природного урана осуществляется как в первичных, так и во вторичных геологических формациях. В первичных залежах этот элемент

преимущественно присутствует в восстановленной четырёхвалентной форме, в то время как лишь малая его часть проявляется в окисленном состоянии с валентностью (+6). В Гафуровском хвостохранилище уран главным образом встречается в шестивалентном виде, что делает процесс выщелачивания песчаных отложений более экономически выгодным, поскольку отпадает необходимость использования дорогостоящих реагентов, таких как диоксид марганца или азотная кислота. Дополнительно следует отметить, что хвостовые руды уже прошли значительную стадию измельчения, исключая потребность в дополнительном механическом дроблении. Концентрация урана в хвостах обеспечивает достаточные условия для рентабельной вторичной переработки.

Архивные сведения ГП "Востокредмет" указывают, что общий объём переработанной руды в пределах Гафуровского хвостохранилища достигает 400 тыс. тонн.

Исходя из этого, при 100% уровне извлечения, содержание закиси-окиси урана в отходах составило бы 1120 тонн ($400 \text{ тыс. тонн} \times 0,28\%$).

Однако лабораторные анализы демонстрируют, что фактическое извлечение урана достигает 90%, следовательно, итоговый объём извлечённого урана составляет 1008 тонн ($1120 \text{ тонн} \times 0,90$) в виде U_3O_8 .

Таким образом, в хвостохранилище накоплено около 1008 тонн уранового остатка в форме закиси-окиси (U_3O_8), образовавшегося в результате переработки руд. Подробные сведения о химическом составе, а также о гранулометрических характеристиках исходных проб, задействованных в анализе, приведены в таблице 2.39. Результаты обобщённой оценки полученных данных свидетельствуют о значительной вариабельности содержания урана в хвостах. В частности, для проб под номерами 1–19 средняя концентрация урана достигает 0,28%. Напротив, в пробах с номерами 20–29 наблюдается снижение среднего содержания урана до уровня 0,025%.

Таблица 2.39 - Гранулометрическая характеристика песков (исходных) Гафуровского хвостохранилища

Пробы	Содержание U в песках, %	Классы на выходе, в процентах					
		Крупность классов, меш					
		-200	-150+200	-100+150	-80+100	-48+80	-30+48
1	0.016	41,0	29,6	18,2	6,8	3,5	0,9
2	0.012	5,9	6,9	5,5	19,6	2,4	15,3
3	0.014	19,1	44,0	26,0	0,5	6,6	3,7
4	0.010	6,8	8,7	25,5	6,8	6,8	37,4
5	0.0135	65,0	24,7	-	3,6	5,8	0,9
6	0.012	52,5	37,1	-	4,3	5,7	0,7
7	0.014	67,8	25,5	-	2,6	3,8	0,3
8	0.518	60,3	6,9	5,5	9,6	2,4	15,3
9	0.492	36,0	31,9	-	7,2	20,6	4,3
10	0.238	34,3	15,0	13,2	8,1	18,6	9,1
11	0.168	49,1	20,0	16,0	0,5	6,6	3,7
12	0.328	67,8	25,5	-	2,6	3,8	0,3
13	0.312	65,0	24,7	-	3,6	5,8	0,9
14	0.015	65,0	24,7	-	3,6	5,8	0,9
15	0.346	44,8	8,7	25,5	6,8	6,8	7,4
16	0.014	5,9	6,9	5,5	19,6	2,4	15,3
17	0.176	32,3	15,0	13,2	8,1	28,6	1,1
18	0.011	36,0	31,9	-	7,2	20,6	4,3
19	0.100	41,0	29,6	18,2	6,8	3,5	0,9

Химико-минералогический состав вмещающей породы играет важную роль в выборе оптимальной технологии извлечения урана. Так, урановые руды с высоким содержанием силикатов подвергаются обработке серноокислотными

растворами, которые обеспечивают растворение полезных компонентов. В то же время карбонатные породы требуют применения щелочных реагентов, таких как содовые растворы, что обусловлено их химической стабильностью и специфической реакционной способностью.

2.7.3. Хвостохранилище Истиклол (Табошар)

Вторичная переработка отходов горнорудной деятельности становится всё более актуальной, поскольку в таких отходах содержатся полезные ископаемые, не извлечённые в ходе первичной переработки. К этой категории относятся и отходы уранового производства Таджикистана, образовавшиеся в 40-х годах XX века, когда технологии извлечения урана были недостаточно эффективными, и значительное количество урана оставалось в хвостах. Отходы хвостохранилища Табошар, расположенного в г. Истиклол, являются примером таких материалов. Формирование рассматриваемых хвостохранилищ происходило с 1945 по 1965 годы в результате активной деятельности двух гидрометаллургических производств и двух обогатительных комплексов, осуществлявших переработку ураносодержащего сырья. Главным источником минерально-сырьевой базы для производственного объединения «Востокредмет» выступал рудник Табошар, обеспечивавший стабильную поставку урановой руды на перерабатывающие предприятия. Добычные работы на указанном руднике осуществлялись комбинированным методом, включающим как вскрышные (открытые) разработки - в частности, на участке Карьер № 1, - так и подземную выемку залежей. Местом размещения накопленных отходов переработки, а также низкосортных руд, является территория, прилегающая к Кураминскому хребту, где была сформирована специальная промышленная зона для хранения данных материалов. На текущий момент все хвостохранилища, за исключением площадок, предназначенных для хранения обеднённой руды, имеют официальный статус законсервированных объектов [226].

При выборе метода переработки необходимо учитывать состав отходов и способы их первичной обработки. В случае руд с высоким содержанием

кальцита, ранее подвергшихся карбонатному выщелачиванию, логичным решением будет использование аналогичного метода, поскольку применение кислотного выщелачивания приведёт к значительному увеличению расхода реагентов [227]. В то же время, для переработки руд и концентратов с повышенным содержанием кремнезёма одним из наиболее эффективных и широко применяемых подходов остаётся метод кислотного выщелачивания. Этот способ сохраняет свою актуальность и при обращении с техногенными материалами, имеющими схожую минеральную природу. В качестве кислотных реагентов теоретически могут применяться различные минеральные кислоты, в том числе азотная и соляная, однако наиболее экономическим вариантом остаётся серная кислота [69].

Для выбора оптимального метода переработки были определены характеристики проб, отобранных из хвостохранилища. Результаты анализа гранулометрического состава хвостов, хранящихся в хвостохранилище Истиклол (Табошар) приводятся в таблице 2.40.

Таблица 2.40 – Анализ гранулометрического состава хвостов, хранящихся в хвостохранилище Истиклол (Табошар)

Размер фракций	Процент
< 0.074 мм	до 65
+0.074 мм	до 15
+0.1 мм	до 10
+0.314 мм	до 8
+1 мм	до 1.0

Определение химического состава хвостов показало следующее (в процентах): содержание урана – 0,009–0,025; железо – 3.5–5.5; кальций – 8.5–10.5; кварц и другие химические элементы – 81–95.5.

Радиационные параметры: гамма-излучение на поверхности хвостохранилища – 0,40–1,00 мкЗв/час; содержание долгоживущих радионуклидов: Ra-226 – 12,1–180 кБк/кг, Th-232 – 0,43–0,75 кБк/кг, K-40 – 1,1–1,4 кБк/кг.

Так как отходы хвостохранилища Табошар содержат значительное количество двуокиси кремния, для их переработки был выбран кислотный метод с применением серной кислоты.

Успешные испытания технологии кучного выщелачивания послужили основой для разработки и возведения специализированной перколяционной фабрики, известной как ФБР - Фабрика бедных руд. ФБР располагалась в городе Табошар, в настоящее время носящем название город Истиклол. Фабрика бедных руд перерабатывала малосортные и забалансовые руды, добыча которых осуществлялась открытым способом [69]. Со временем вокруг фабрики скопилось значительное количество отходов, содержащих уран и другие радиоактивные элементы. В связи с перспективой извлечения урана из этих отходов были проведены опыты по их выщелачиванию с применением серной кислоты.

Экономическая целесообразность использования высоких концентраций серной кислоты для переработки отходов ФБР оказалась низкой, поэтому процесс выщелачивания проводился с варьируемыми параметрами кислотного реагента (H_2SO_4) при массе навески 50 г. Детализированные результаты проведённых испытаний представлены в таблице 2.41.

Оптимизация технологии переработки отвалов ФБР показывает, что потребление кислоты может быть значительно снижено без ущерба для уровня извлечения урана. Однако эффективность извлечения урана из отвалов карьера №1 остаётся низкой из-за недостаточной окисленности материала. Чтобы устранить данную проблему, была разработана лабораторная установка, оснащённая механизированной системой перемешивания пульпы и подачей воздуха, что позволило значительно повысить результативность процесса выщелачивания.

Таблица 2.41 – Характеристики выщелачивания и извлечения урана из образцов, взятых из ФБР

Содержание в пробе химических соединений (%)				Концентрация H_2SO_4 (г/л)	Концент-рация урана (мг/л)	Извлечение (%)
Fe_2O_3	U	Ca	MnO			
5.49	$5.7 \cdot 10^{-3}$	0.52	0.12	20	17,0	59,7
-«-	-«-	-«-	-«-	50	18,2	63,9
-«-	-«-	-«-	-«-	75	18,2	63,9

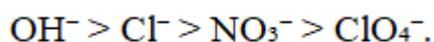
Эксперимент по извлечению урана из образцов, взятых из ФБР, проводился в следующих условиях: концентрация серной кислоты (H_2SO_4) составляла 100 г/л, а в качестве окислителя применялся атмосферный кислород. Процесс барботирования длился 3 часа, в течение которых проводился периодический отбор проб с интервалом в один час. По завершении активной фазы смесь оставлялась на естественное отстаивание на протяжении 24 часов, что способствовало стабилизации системы. Детализированные результаты данных опытов обобщаются в таблице 2.42.

Таблица 2.42 – Динамика извлечения урана из объединённого образца (ТО), отобранного в Карьере № 1

№	Содержание в пробе химических соединений (%)				Концентрация урана (мг/л)				Процент извлечения урана
	Fe_2O_3	U	Ca	MnO	15 мин	30 мин	45 мин	24 часа	
ТО	3.49	0.011	0.44	0.1	13.8	13.6	14.0	18.4	25%

Применение атмосферного кислорода в роли окислителя снижает эффективность извлечения урана, поскольку способствует окислению Fe^{2+} до Fe^{3+} , изменению рН среды, образованию гидрооксида железа и совместному

осаждению полиуранатов. Предполагается, что реакция проходит через стадию активированного комплекса, структура и состав которого не поддаются точному анализу стандартными методами. Этот комплекс представляет собой временную комбинацию ионов реагентов, соединённых связующей группой, выполняющей функцию «мостика». Каталитическая активность данного образования определяется его способностью удерживать реагенты и эффективно передавать электроны. Окислительно-восстановительные процессы наиболее сильно зависят от ионов, минимизирующих заряд активированного комплекса и обладающих низкой энтропией. В результате каталитическая активность ослабевает в следующем порядке:



Сульфатные ионы являются важными катализаторами, поскольку снижают заряд активированного комплекса на две единицы, одновременно повышая энтропию системы. Однако его способность служить связующим «мостиком» зависит от конкретных условий реакции, особенно от сочетания параметров (U, Fe₂O₃, MnO, Ca). В ситуациях, когда его активность недостаточна, необходимо введение NO₃⁻-ионов для поддержания требуемых реакционных характеристик. Хотя хлор-ион обладает высокой электронной активностью, его применение в данном процессе не является экономически оправданным.

Для повышения эффективности извлечения урана необходима комплексная оптимизация технологии выщелачивания, включающая внедрение стратегических решений, направленных на снижение затрат и улучшение каталитической активности системы, среди которых основными выделяются:

- разработка математической модели, описывающей пространственное распределение урана, что позволяет выявить зоны с аналогичными характеристиками и адаптировать процесс извлечения под их индивидуальные свойства;
- оптимизация концентраций выщелачивающих реагентов с учётом особенностей каждой зоны.

На основе проведённых исследований определены параметры базового режима выщелачивания, рекомендованного для опытно-промышленных испытаний по переработке отходов фабрики бедных руд. Установлено, что при концентрации H_2SO_4 в 20 г/л и продолжительности процесса 2 часа максимальное извлечение урана при выщелачивании серной кислотой составляет 63%.

2.8. Термодинамическая оценка радиоактивных отходов

2.8.1. Термодинамическая оценка сернокислотного выщелачивания отходов хвостохранилища "Карты 1-9"

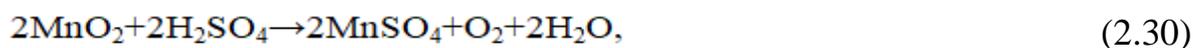
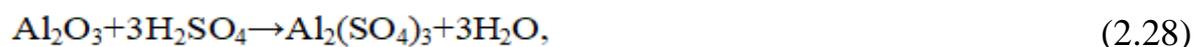
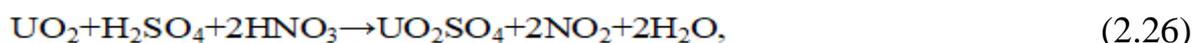
Авторами [228] подробно описывается разложение и переработка урановых отходов, хранящихся в хвостохранилище «Карты 1-9». Для разложения и переработки авторы рекомендуют метод сернокислотного выщелачивания, который ими подробно детализирован. Также указывается на сложную минералогическую структуру ураносодержащих отходов данного хвостохранилища. Исходя из этого, для указанных отходов идентифицирован их минералогический состав (рисунок 2.23) и рассмотрены кинетические аспекты разложения соединений, которые были идентифицированы в составе минералов отходов указанного хвостохранилища (таблица 2.43).

Таблица 2.43 – Расчёт термодинамических характеристик минералов, входящих в состав отходов хвостохранилища «Карты 1–9»

Соединения	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К	ΔH_{298}^0 , кДж/моль
UO_2 (тв.)	0.08	$-1.08 \cdot 10^3$
$Al_2(SO_4)_3$ (р-р)	-0.055	$-3.79 \cdot 10^3$
ThO_2 (т)	0.065	$-1.23 \cdot 10^3$
$MgSO_4$ (р-р)	-0.116	$-1.38 \cdot 10^3$
Na_2SO_4 (р-р)	0.136	$-1.40 \cdot 10^3$
$MnSO_4$ (р-р)	-0.044	$-1.13 \cdot 10^3$

HNO ₃ (ж)	0.155	-1.74·10 ²
Fe ₂ O ₃ (т)	0.0875	-8.22·10 ²
H ₂ SO ₄ (р-р)	0.018	-7.46·10 ²
CaSO ₄ (р-р)	-0.04	-1.45·10 ³
Th(SO ₄) ₂ (р-р)	-0.382	-2.60·10 ³
O ₂ (г)	0.205	0
H ₂ O ж	0.07	-2.86·10 ²
Mg(OH) ₂ (т)	0.0632	-9.25·10 ²
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (р-р)	-0.564	-2.83·10 ³
UO ₂ SO ₄ (р-р)	0.0812	-1.93·10 ³
NO ₂ (г)	0.24	33.5
Al ₂ O ₃ (т)	0.051	-1.68·10 ³
MnO ₂ (т)	0.053	-5.21·10 ²

Для понимания механизмов, по которым осуществляется разложение минералов состава отходов хвостохранилища "Карты 1-9" при воздействии на них серной кислоты, составлены вероятные теоретические химреакции этих процессов:



Для каждой химической реакции (2.26)-(2.31) по стандартным формулам вычислений термодинамических параметров процессов были вычислены изменения энтальпии (ΔH) и энтропии (ΔS) (таблица 2.44).

Полученные числовые параметры термодинамических свойств предполагаемых химических процессов (2.26)-(2.31), происходящих при распаде хвостового материала хранилища "Карты 1-9" (таблица 2.44), подтверждают возможность протекания данных реакций в стандартных условиях.

Таблица 2.44 – Изменение энтальпии, энтропии и энергии Гиббса при действии серной кислоты на минералы хвостового материала хранилища "Карты 1-9"

Реакции	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔS_{298}^0 , Дж/моль · К	ΔG_{298}^0 , кДж/моль
(2.26)	-190.6	$0.6 \cdot 10^{-2}$	-192.4
(2.27)	-457.9	$-34.1 \cdot 10^{-2}$	-356.3
(2.28)	-737.1	$5.0 \cdot 10^{-2}$	-752.0
(2.29)	-280.4	$2.4 \cdot 10^{-2}$	-287.5
(2.30)	-299.6	$11.5 \cdot 10^{-2}$	-333.9
(2.31)	-624.0	$-49.5 \cdot 10^{-2}$	-476.5

В рамках исследования ставилась задача изучения воздействия температурного режима на уровень энергии Гиббса в анализируемых процессах (2.26)-(2.31). Результаты отражены соответственно в таблице 2.45 и на рисунке 2.24. Как следует из графика 2.24, увеличение температуры создаёт благоприятные условия для протекания большинства реакций с участием серной кислоты.

Таблица 2.45 – Значения ΔG для реакций, протекающих при сернокислотной переработке минералов хвостов из хранилища "Карты 1–9" в температурном диапазоне 298–373 К

Реакции	ΔG_{373}^0	ΔG_{353}^0	ΔG_{333}^0	ΔG_{313}^0	ΔG_{298}^0
	ΔG , кДж/моль				
(2.26)	-188.41	-188.53	-188.64	-188.76	-192.41
(2.27)	-330.73	-337.5	-344.4	-351.2	-356.3
(2.28)	-755.75	-754.75	-753.75	-752.75	-752
(2.29)	-289.34	-288.9	-288.4	-287.9	-287.542

(2.30)	-342.5	-340.2	-337.9	-335.6	-333.87
(2.31)	-439.36	-449.25	-459.16	-469.06	-476.48

$-\Delta G$, кДж/моль

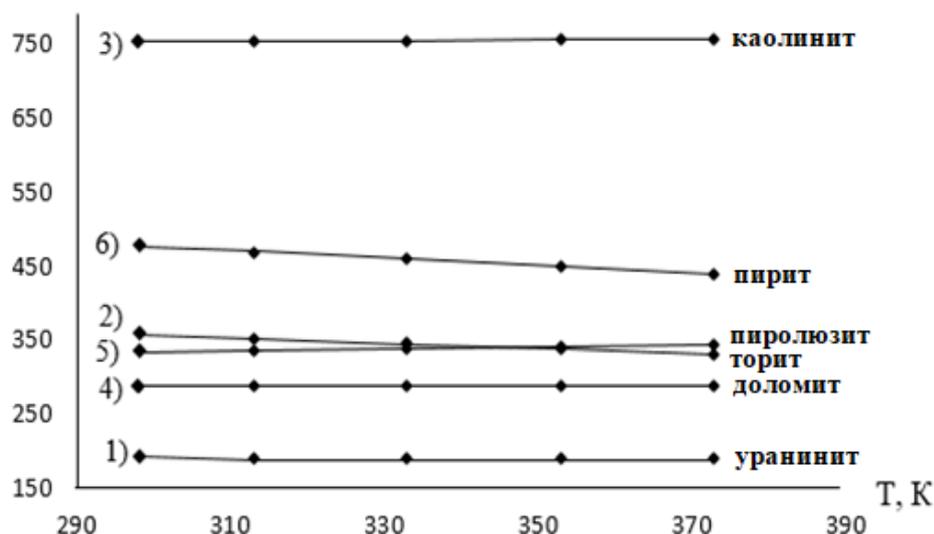


Рисунок 2.23 – Влияние температуры разложения минералов хвостового материала хранилища "Карты 1-9"

2.9. Материальный баланс переработки ураносодержащих отходов

2.9.1. Расчёт материального баланса разложения отходов

хвостохранилища "Карты 1-9" сернокислотным методом

В работе [68] были проведены расчёты материального баланса для хвостовых остатков, размещённых в хвостохранилище «Карты 1–9». Анализ осуществлялся на примере 1 кг хвостового материала, подвергнутого обработке серной кислотой с концентрацией 50 %. В процессе выщелачивания общее количество израсходованного реагента составило 700 г, после чего был выполнен пересчёт на эквивалентное содержание 100 %-ной H_2SO_4 . Согласно полученным данным, для полного разложения 1 кг хвостов требуется 463 г безводной серной кислоты (таблица 2.46).

В результате воздействия реагента было достигнуто извлечение 61 % диоксида урана (UO_2), с образованием уранилсульфата (UO_2SO_4) в количестве 0,66 г. Это указывает на то, что в химическое взаимодействие вступила лишь часть исходного ураносодержащего материала, тогда как 39 % остались инертными и не подверглись превращению. Анализ расходной части материального

баланса показал, что из общего количества введённой серной кислоты 217,35 г не были использованы в ходе реакций и остались в избыточном состоянии, что следует учитывать при оптимизации расхода реагентов.

Таблица 2.46 – Материальный баланс для вторичной переработки отходов хвостохранилища "Карты 1-9" сернокислотным методом (расчёт на 1 кг отходов)

Приход	%	в кг	Расход	%	в кг
Al ₂ O ₃	6.3	0.107	Al ₂ (SO ₄) ₃	21.12	0.359
Mg(OH) ₂	3.24	0.055	MgSO ₄	6.7	0.114
Fe ₂ O ₃	2.41	0.041	Fe ₂ (SO ₄) ₃	6.06	0.103
MnO ₂	0.3	0.0051	Mn(SO ₄) ₂	0.12	0.002
SiO ₂	40.8	0.694	SiO ₂ , включая элементы, не участвующие в реакции	41.77	0.71
UO ₂	0.01	0.00018	UO ₂ SO ₄	0,12	0.002
Кристаллизационная вода	5.74	0.097	H ₂ O	11,17	0.19
H ₂ SO ₄ , 50%	41.2	0.700	H ₂ SO ₄ , избыток	12.94	0.22
Итого:	100	1.70	Итого:	100	1.70

Из тела хвостохранилища «Карты 1–9» были отобраны объединённые представительные пробы двух типов песчаных фракций: богатые пески, включающие кеки, маточные растворы, а также твёрдые и жидкие технологические отходы, и бедные пески (включающие регенерат в товарном продукте, твёрдые и жидкие отходы), в которых был определён баланс урана. Распределение урана в совокупных образцах высоко- и низкосортных песков приводится в таблице 2.47.

Таблица 2.47 - Распределение урана в совокупных образцах высоко- и низкосортных песков

Приход				Расход			
Название	Количество	Содержание U	U (г)	Название	Количество	Содержание U	U (г)
"Богатые" высоко- сортные пески	1.0 кг	0.3%	300	1. Кеки и маточники в со- ставе хранилища	-	-	-
				а) твёрдые	300 г	0.010%	30.0
				б) жидкие	-	0.006 г/л	0.4
"Бедные" низко- сортные пески	1.0 кг	0.020%	20	а) твёрдые	20 г	0.012 %	0.0024
				б) жидкие	-	0.006 г/л	0.04
				Регенерат в товарном про- дукте	-	-	269.5
Итого:					—	—	300.0

2.9.2. Экономический расчёт переработки отвалов урановой промышленности

В [67] авторами выполнен комплексный технико-экономический анализ, который посвящён вопросам переработки отвалов, скопившихся во время функционирования в прошлые годы Гидрометаллургического завода ГП "Востокредмет", отвалы были классифицированы на богатые (высокосортные) пески и на бедные (низкосортные) пески, и исследованы следующие характеристики:

1. Богатые (высокосортные) пески - объём составляет 400 тысяч тонн:
 - средняя концентрация урана – 0,28% (на одну тонну песков ~2.8 кг урана);
 - расстояние между ГМЗ и Гафуровским хвостохранилищем – 2.5-3.0 км;
 - транспортировка осуществлялась железнодорожными вагонами-самосвалами (думпкарами) при расстоянии 3 км, с грузоподъёмностью вагона 60 тонн. Влажность песков – 12-15%.
 2. Бедные (низкосортные) пески - оцениваются в 800 тысяч тонн:
 - средняя концентрация урана – 0,02-0,03% (на одну тонну песков ~200-300 г урана);
 - расстояние между ГМЗ и Чкаловским хвостохранилищем – 200-300 м;
 - транспортировка осуществляется автомобильным транспортом (КрАЗ) с грузоподъёмностью 12 тонн. Влажность песков – 12-15%.
- Расчёт транспортных затрат представлен в таблице 2.48, а баланс урана в песках приводится в таблице 2.49.

Таблица 2.48 - Транспортные расходы

Вид транспорта	Расстояние, км	Грузоподъёмность, тонн / в пересчёте на 1 кг урана	Стоимость 1 единицы/час, \$ США
Вагон-самосвал	3 км	60/16,8	50
Автомашина КрАЗ-256 Б	0,2 км	12/0,36	10
Экскаватор ЭО-41-24	-	-	8
ИТОГО:		72,0/17,26	68,0

Таблица 2.49 - Баланс урана в песках

	Единица измерения	"Богатые" хвосты	"Бедные" хвосты	Всего
Объём переработки хвостов в год	тонн	100	200	300
Среднее содержание	%	0,28	0,025	-
Урана в них	тонн	280	50,0	330
Извлечение	%	90,0	80,0	-
Выпуск урана в год	тонн	252	40,0	292

Расход химикатов и материалов приводится в таблице 2.50.

Стоимость логистики и обработки 1 кг урана составляет:

- Погрузка и перевозка: 3,94 \$ США (68:17,26).
- Затраты на химические реагенты и материалы:
 - Общий расход: 5 136 000 \$.
 - Количество обработанного материала: 292 000 кг.
 - Затраты на 1 кг урана: 17,6 \$ США.

Энергетические расходы:

- Электроэнергия:

- Потребление: 180 кВт·ч.
- Тариф: 0,03 \$ за кВт·ч.
- Итоговая стоимость: 5,4 \$ США.
- Расход газа для подогрева пульпы:
 - Объём газа: 100 м³.
 - Итоговая стоимость: 4,2 \$ США.

Таблица 2.50 - Расход химикатов и материалов

Наименование	Ед. изм.	Норма на 1 тонну		Цена за 1 т	Σ затрат на год при получении 292 т U
		богатых отвалов	бедных отвалов		
Купоросное масло	кг	70	30	70\$ США	400 000 x 0,1 т = 40 000 т 40 000 x 70 \$ = 2 800 000 \$
Фильтр-белтинг	м ²	0,5	0,5	2\$ США	292 000 x 0,5 = 146 000 м ² 146 000 x 2\$ = 292 000 \$
Аммиачная вода	кг.	0,07 кг/кг З.-О.		100 \$ США	292 000 x 0,07 = 20 440 т 20 440 x 100\$ = 2 044 000 \$
Итого:					\$ 5 136 000

Финансовый анализ добычи урана включает следующие показатели:

- **Трудовые затраты:**
 - Количество сотрудников, занятых в добыче урана – 200 человек.
 - Средний месячный оклад одного работника – 500 \$ США.
- **Доходы:**
 - Годовой объём добытого урана (таблица 2.49) – 292 000 кг.
 - Рыночная стоимость 1 кг урана в форме U_3O_8 – 50 \$ США.

- Итоговая стоимость полученного урана за год:

$$292\,000 \times 50 \$ = 14\,600\,000 \$ \text{ США.}$$

Ниже приводим общие затраты в таблице 2.51.

- **Затраты на добычу:**

- Общие расходы на процесс добычи, включая оплату труда, материалы и технологии, составляют 11 822 680 \$ США (таблицу 2.51).

- **Прибыль и рентабельность:**

- Чистая прибыль за год:

$$14\,600\,000 - 11\,822\,680 = 2\,777\,320 \$ \text{ США.}$$

- Годовая рентабельность производства:

$$\frac{2777320}{14600000} \cdot 100\% = 19\%.$$

Таблица 2.51 – Расшифровка показателей затрат в течение 1 года (\$ США)

Химикаты и материалы в год	$292\,000 \times 17 = \$ 5\,136\,000$
Погрузка и перевозка в год	$292\,000 \times 3.94 = \$ 1\,150\,480$
Энергозатраты	$292\,000 \times 5.4 = \$ 1\,576\,800$
Затраты на выработку пара	$292\,000 \times 4.2 = \$ 1\,226\,400$
Амортизация оборудования	3.8%, \$ 554 800
Общезаводские расходы	3.7 %, \$ 540 200
Внепроизводственные расходы	3.0%, \$ 438 000
З/плата работников составляет	$200 \text{ человек} \times 500 \times 12 \text{ месяцев} =$ $= \$ 1\,200\,000$

2.10. Заключение по главе 2

В главе 2 приведены результаты комплексного исследования методик переработки урансодержащих руд, химического и минералогического состава урановых месторождений Таджикистана, а также анализа физических и химических свойств данных руд. Приведены методики отбора и подготовки проб, включая рентгенофазовый анализ, гамма-спектрометрию, рентгеноспектральный и химический анализы, а также дифференциально-термический анализ руд. Исследования проводились с применением современного аналитического оборудования, что позволило получить достоверные данные о составе и свойствах урансодержащих минералов.

Исследование урановых месторождений, расположенных на территории Таджикистана ("Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан - 2", "Восточный Памир") позволило выявить основные минералы, содержащие уран, а также определить химические составы их руд и минералогические характеристики. В большинстве руд указанных месторождений установлено наличие минералов, среди которых коффинит, уранинит, настуран, уранофан, а также значительное содержание кварца, карбонатов и силикатов. На основании полученных данных были предложены оптимальные методы переработки руд, в зависимости от их химико-минералогического состава. Так, для силикатных руд целесообразно использовать сернокислотное выщелачивание, тогда как для карбонатных руд рекомендован карбонатный метод переработки.

Кроме того, проведённый термодинамический анализ процессов сернокислотного выщелачивания позволил оценить эффективность различных реакций взаимодействия урана с серной кислотой, определить основные факторы, влияющие на процесс извлечения урана, а также выявить возможные пути оптимизации данного процесса. Экспериментальные данные подтвердили, что для переработки урановых руд, содержащих значительные примеси кальция, магния и железа, необходимы дополнительные стадии очистки и сепарации.

Особое внимание в работе уделено экологическим аспектам переработки урансодержащих руд, в том числе вопросам обращения с радиоактивными отходами и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Рассмотрены современные методы утилизации хвостохранилищ и переработки отходов уранового производства, что имеет важное значение для минимизации экологического ущерба при добыче и обогащении уранового сырья.

Таким образом, результаты проведённого исследования позволили не только углубить понимание физических и химических характеристик урановых руд, но и дать объективную оценку существующим проблемам их переработки. Выявлены ключевые трудности, связанные с извлечением урана, распределением примесей, а также влияние примесей и технологических операций на окружающую среду. Проведённый анализ послужил основой для дальнейшего совершенствования методов переработки урановых руд, повышения их экономической целесообразности и разработки инновационных технологий. Эти технологии направлены на более эффективное и экологически безопасное извлечение урана из природных источников, минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и оптимизацию производственных процессов.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНОВЫХ РУД И УРАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ТАДЖИКИСТАНА

3.1. Особенности выщелачивания урановых руд месторождения

"Танзим"

3.1.1. Сернокислотное выщелачивание урановой руды месторождения

"Танзим"

В главе 2 были рассмотрены характеристики проб урановых руд месторождения "Танзим". На основе полученных данных для разложения руд был выбран метод выщелачивания. Так как данный материал относится к карбонатному типу, перед основным этапом обработки была выполнена предварительная водная промывка при температуре 20 °С. При этом соблюдалось массовое соотношение твёрдой и жидкой фаз 1:10, что способствовало удалению легкорастворимых примесей и обеспечивало снижение кислотности среды на последующих этапах выщелачивания. Для оценки влияния предварительной промывки на извлечение урана были проведены сравнительные испытания с контрольными образцами, не подвергавшимися водной обработке. Исследование подтвердило, что предварительная промывка способствует более эффективному извлечению ценных элементов [68].

На следующем этапе проводился процесс выщелачивания, в котором использовалась серная кислота в дозировке 100-600 кг/т, а также добавлялись окислители HNO_3 и MnO_2 . Переработка суспензии осуществлялась при температуре 60-75°C и пропорции Т:Ж=1:2, продолжительностью 6 часов. По завершении обработки оставшийся твёрдый осадок дважды промывали водой при пропорции Т:Ж=1:1. Результаты исследования обобщены в таблице 3.1.

Уран, содержащийся в полученном растворе, может быть выделен посредством осаждения, сорбции или экстрагированием. В процессе добычи руд в промышленных условиях для уменьшения запылённости материал подвергается орошению водой, что приводит к растворению карбонатных соединений урана.

Таблица 3.1 – Переработка урановой руды месторождения "Танзим" методом выщелачивания серной кислотой

Тонкость помола руды, мм	Навеска образца, г	Расход, кг/т			Предварит. Отмывка при (Т:Ж)= 1:10		Отфильтрованный раствор после вы- щелачивания				Промывание водой при (Т:Ж)=1:1		Извлечение U, в процен- тах	Остаток U в твёрдой фазе в процен- тах
		HNO ₃	MnO ₂	H ₂ SO ₄	к- ть	Fe ⁺³	Fe ⁺²	U	I	II				
											мг/л	рН		
+0,1	24	13	-	150	18,0	8,49	-	0,97/0,14	18,13/8,58	0,387/0,034	0,0915/0,01	0,0085/0,0045	71,31/17,41	0,071/0,2044
+0,1	27	13	-	200	18,0	8,2	-	0,07/0,97	13,95/12,27	0,53/0,213	0,222/0,029	0,023/0,0135	67,92/26,26	0,0794/0,1825
+0,1	29	13	-	250	25,0	8,1	-	Нет	11,58/13,95	0,57/0,565	0,245/0,295	0,045/0,032	59,59/58,46	0,100/0,0814
+0,1	27	13	-	280	18,5	8,0	-	0,98	9,47	0,465	0,20	0,015	80,54	0,048
+0,1	30	13	-	300	18,0	8,4	0,6	1,53	5,37	0,44	0,24	0,016	76,36	0,0585
+0,1	31	30	-	350	20,5	8,0	13,4	3,63	22,6	0,46	0,23	0,068	93,13	0,017
-0,1	27	20	-	500	31,5	8,0	-	0,07	23,16	0,76	0,42	0,016	93,13	0,017
-0,1	27	26	-	600	33,0	8,0	5,4	0,6	14,8	0,61	0,17	0,087	93,27	0,016
+0,2	30	30	-	300	29,0	8,0	3,6	3,3	15,1	0,64	0,265	0,022	76,46	0,069
+0,2	31	30	-	350	32,5	8,5	8,5	6,98	11,16	0,65	0,21	0,118	84,58	0,037
(+0,1)+(0,2)	30	50	-	360	35,0	8,0	3,7	13,4	6,1	0,54	0,20	0,027	87,45	0,031
(+0,1)+(0,2)	32	40	-	350	39,0	8,0	4,9	13,1	9,5	0,63	0,22	0,012	88,33	0,028
+0,1	31	13	15	350	26,5	8,6	2,5	0,42	8,37	0,43	0,21	0,024	81,01	0,047
-0,1	27	13	15	400	18,0	7,5	3,7	0,49	11,37	0,235	0,184	0,0095	85,63	0,040
-0,1	28	13	15	450	30,0	8,5	7,4	0,6	20,1	0,32	0,108	0,008	78,98	0,052
без отсева	50	-	-	100	24,0	7,7	4,5	-	-	0,05/0,003	0,01/0,003	0,003/0,004	22,22/6,34	0,1925/0,231

Примечание: знаменатель – с предварительной отмывкой водой; числитель – без отмывки; выделенная строка – оптимальный вариант.

По данным таблицы 3.1, содержание этих соединений варьируется от 0,018 до 0,025 г/л. Это создаёт возможность для предварительного извлечения части урана путём сорбции на ионнообменном материале - анионите АМ(п), непосредственно в зоне рудника. Этот метод обеспечивает частичное отделение урана из продуктивных растворов ещё до включения руды в основную технологическую схему, что позволяет существенно снизить объёмы реагентов и общие эксплуатационные расходы.

Установлено, что эффективность извлечения урана непосредственно зависит от дозировки серной кислоты, используемой в процессе выщелачивания. В ходе экспериментальных исследований рассматривался диапазон подачи H_2SO_4 от 100 до 600 кг/т руды. Максимальная степень извлечения урана, составившая 93,27%, была достигнута при использовании 600 кг/т серной кислоты в сочетании с дополнительным введением 26 кг/т азотной кислоты, что согласуется с данными, представленными на рисунке 3.1.

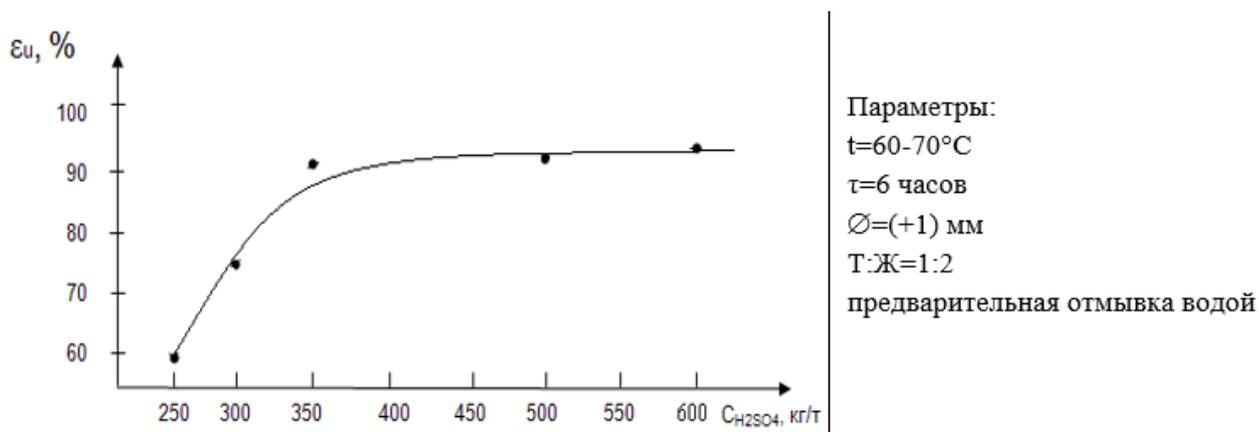


Рисунок 3.1 – Исследование влияния содержания H_2SO_4 на эффективность извлечения урана из руды

Оптимальным режимом выщелачивания урана установлена комбинация расхода серной кислоты в количестве 350 кг/т и азотной кислоты - 30 кг/т. При данных параметрах достигается максимальная эффективность извлечения урана, составляющая 93,13%, при этом обеспечивается рациональный баланс между технологической результативностью и экономическими затратами на реагенты.

Кинетические зависимости извлечения урана в зависимости от температуры и длительности обработки представлены на рисунке 3.2.

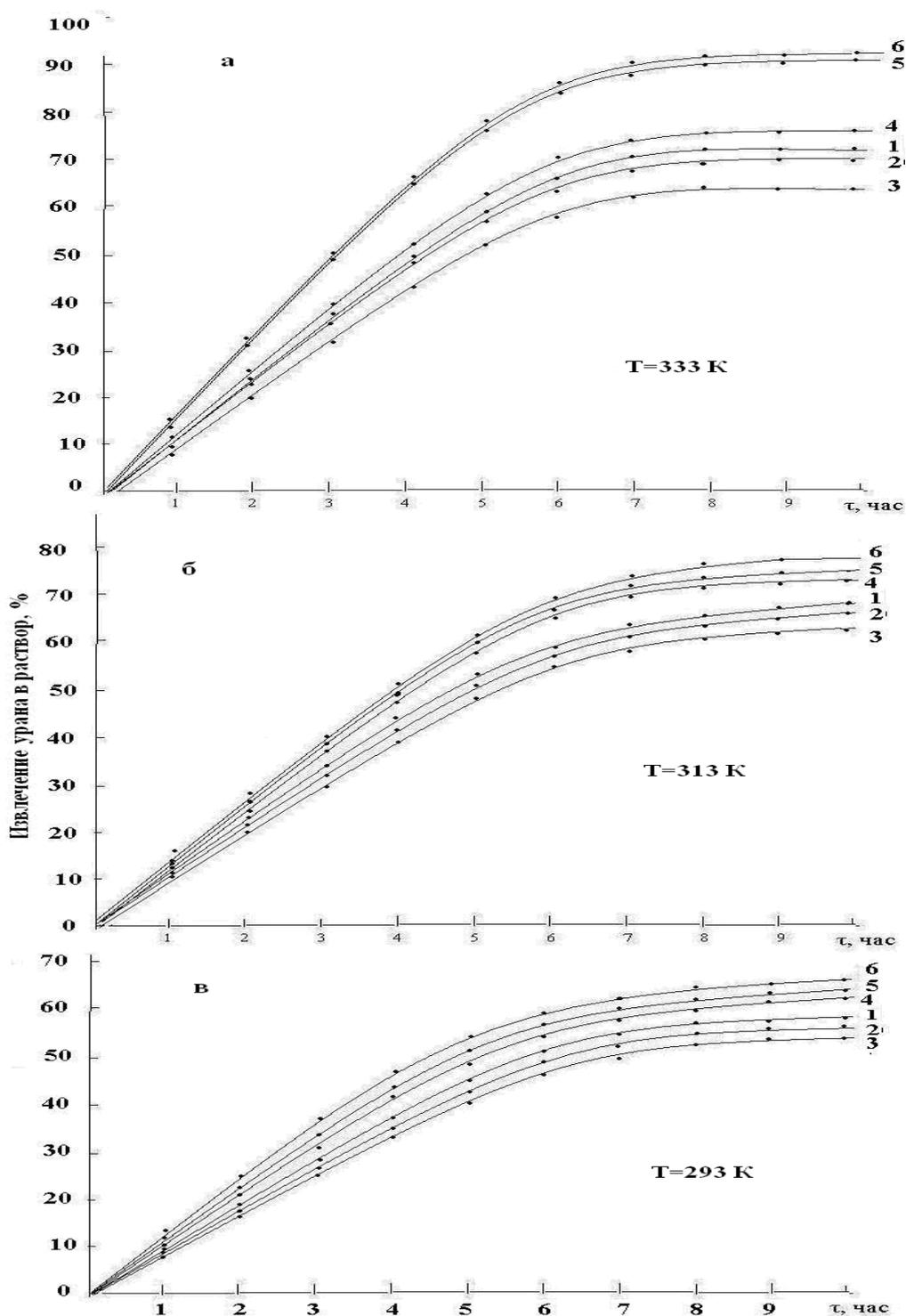


Рисунок 3.2 – Динамика извлечения урана во времени при различных расходах серной кислоты (1 – при расходе 150 кг/т, 2 – при расходе 200 кг/т, 3 – при расходе 250 кг/т, 4 – при расходе 300 кг/т, 5 – при расходе 350 кг/т, 6 – при расходе 400 кг/т)

Анализ графиков демонстрирует явную корреляцию между температурой среды и скоростью выщелачивания: с увеличением температуры реакционная способность системы возрастает, что приводит к ускорению процессов растворения урана. Экспериментальные кривые хорошо аппроксимируются уравнением кинетики первого порядка, что позволяет описывать поведение системы с использованием следующей зависимости:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = K(1-\varepsilon),$$

в котором: ε – степень извлечения урана в раствор, в процентах;

τ – время процесса, в минутах;

K – константа скорости выщелачивания, мин^{-1} .

При анализе зависимости логарифма усреднённых значений констант скорости от обратной температуры можно увидеть, что точки на графике образуют линейное распределение. Этот закономерный характер данных отчётливо прослеживается на рисунке 3.3.

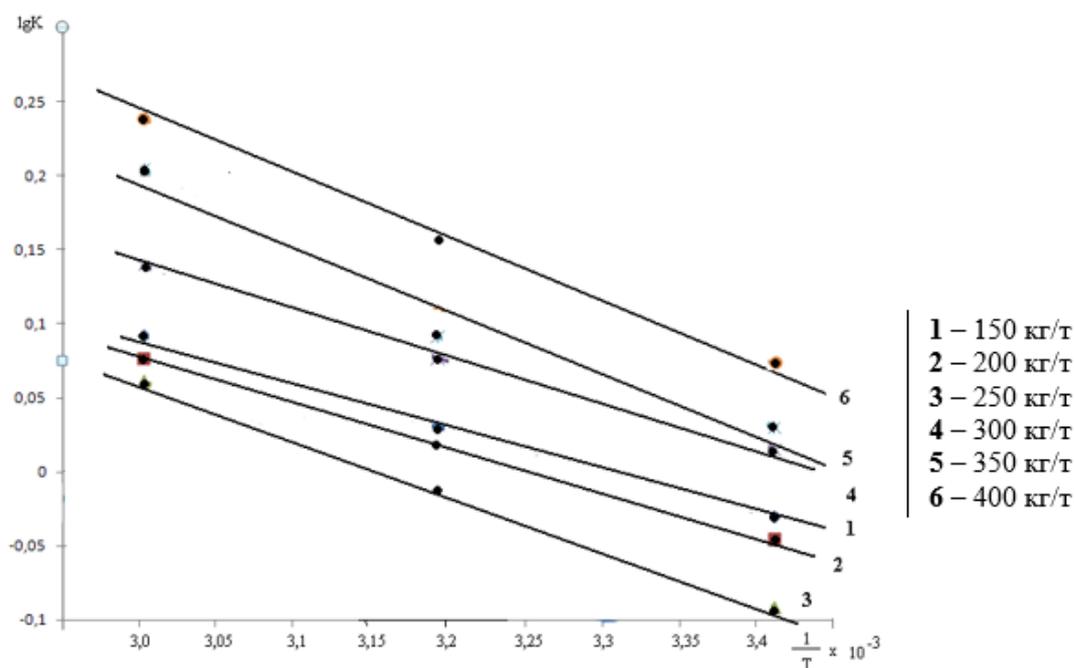


Рисунок 3.3 - График Аррениуса для динамики выщелачивания руды при различных дозировках H_2SO_4

Определённые на основе угла наклона прямой значения энергии активации (таблица 3.2) подтверждают, что процесс выщелачивания протекает в условиях, подчиняющихся кинетическим закономерностям.

Таблица 3.2 – Анализ изменений скорости и энергетических характеристик выщелачивания руды при варьировании концентрации H_2SO_4

Расход кислоты (кг/тонну)	Температура (К)	Истинная скорость при выщелачива- нии (%/ч)	Энергия активации, кДж/моль
150	293	1,15	5,6
	313	1,19	
	333	1,23	
200	293	1,38	4,6
	313	1,60	
	333	1,73	
250	293	0,97	4,4
	313	1,00	
	333	1,07	
300	293	1,19	4,0
	313	1,23	
	333	1,27	
350	293	0,81	3,8
	313	0,90	
	333	0,93	
400	293	1,04	3,4
	313	1,07	
	333	1,23	

Изучение процессов сернокислотного выщелачивания урановых руд месторождения "Танзим", а также механизмов выщелачивания позволило детально исследовать динамику этих процессов, определить ключевые факторы, влияющие на эффективность извлечения, выявить оптимальные условия для максимального выделения урановых соединений.

Осаждение диураната аммония из десорбата

После насыщения ионообменной смолы АМ(п), когда концентрация

урана достигает 180-200 кг/т, проводится десорбция, обеспечивающая эффективное выделение урана из смолы.

Перед проведением десорбции ионообменная смола проходит тщательную очистку в специальной колонне, где устраняются загрязнения и твёрдые примеси. Затем в реакторе из нержавеющей стали готовят десорбционный раствор, в состав которого входит 100–120 г/л серной кислоты и 2–3 г/л азотной кислоты. Присутствие азотной кислоты критически важно, так как оно предотвращает коррозию внутренней поверхности реактора, вызванную воздействием разбавленной серной кислоты.

На схематическом изображении, представленном на рисунке 3.4, подробно отображён процесс десорбции урана с ионообменной смолы АМ(п), включая основные этапы технологического цикла.

После завершения десорбции полученный раствор сохраняет остаточную кислотность в пределах 80-100 г/л, при этом концентрация урана варьируется от 20 до 30 г/л. Кроме того, в растворе присутствуют примеси железа, содержание которых достигает 1%, что может оказывать негативное влияние на дальнейшую обработку и требует дополнительного этапа очистки.

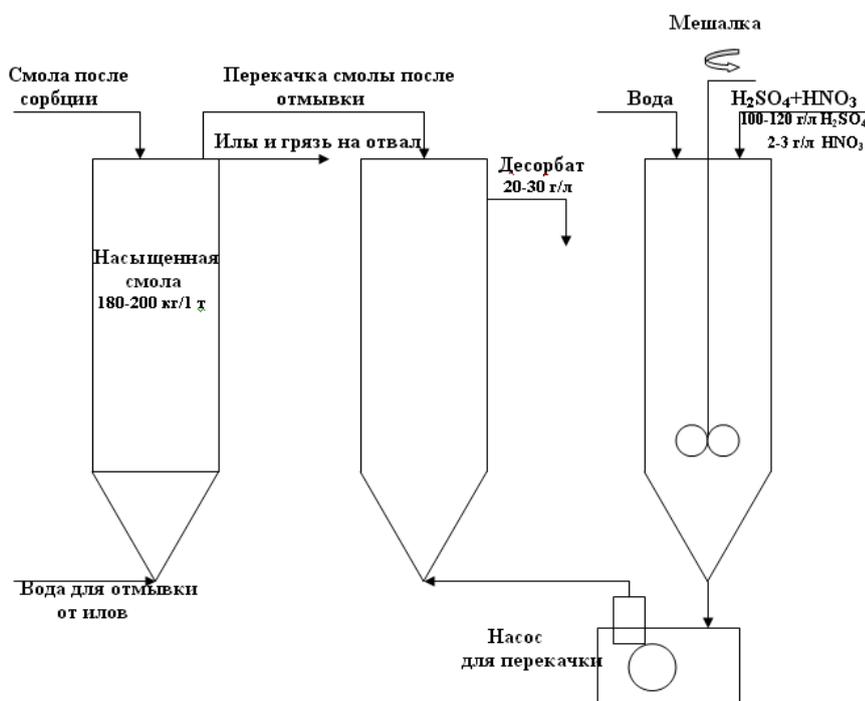


Рисунок 3.4 – Основные стадии десорбции урана из ионообменной смолы АМ(п) в технологическом процессе

На завершающем этапе технологического цикла извлечения урана из десорбата осуществляется его осаждение с использованием 25%-ного раствора аммиачной воды. В результате взаимодействия уранил-иона (UO_2^{2+}) с аммиаком происходит образование характерного осадка – жёлтого кека. Процесс осаждения протекает поэтапно и включает четыре основные стадии, каждая из которых характеризуется определёнными химическими взаимодействиями:

- нейтрализация остаточной кислоты – при снижении рН с исходного уровня до 3.0 аммиачная вода связывает свободные кислотные остатки, устраняя их влияние на дальнейшую реакцию;

- реакция с примесями – в диапазоне рН 3.0-3.8 аммиак вступает во взаимодействие с нежелательными компонентами раствора, что может привести к появлению белого осадка. При отсутствии этого осадка реакция проходит более благоприятно;

- формирование устойчивой структуры – когда рН достигает уровня 3.8–4.5, начинается активное выделение диурата аммония. В этот период частицы осадка стабилизируются, приобретая необходимую форму для дальнейшей обработки;

- завершение осаждения – при повышении рН до 4.5–8.5 весь уран переходит в осадочную фазу. Появление свободного аммиака является признаком окончания химического процесса, подтверждая завершение выделения урана из раствора.

Для формирования устойчивого осадка диурата аммония оптимальным считается диапазон рН 4.0–5.0, поскольку он способствует стабилизации структуры частиц. Процесс осаждения уранил-содержащих соединений протекает в условиях динамического химического равновесия, что обеспечивает возможность регулирования его параметров на каждом этапе. Несмотря на то, что первичное выпадение осадка происходит практически мгновенно после введения аммиачного раствора, завершение структурного формирования осадочной фазы требует определённого времени для стабилизации системы. В связи с этим после каждого этапа дозирования аммиачной воды целесообразно

выдерживать технологическую паузу, продолжительность которой определяется объёмом внесённого реагента и степенью насыщенности раствора уранил-ионами.

Особенность системы заключается в том, что значение pH в процессе осаждения полиуранатов практически не зависит от исходного состава уранил-солей и самого осадителя, а определяется в первую очередь равновесной концентрацией урана в растворе. Анализ экспериментальных данных, представленных на рисунке 3.5, свидетельствует о том, что эффективного извлечения урана необходимо достичь высоких значений pH на финальной стадии процесса, что обеспечивает максимальное осаждение и выделение урана из раствора.

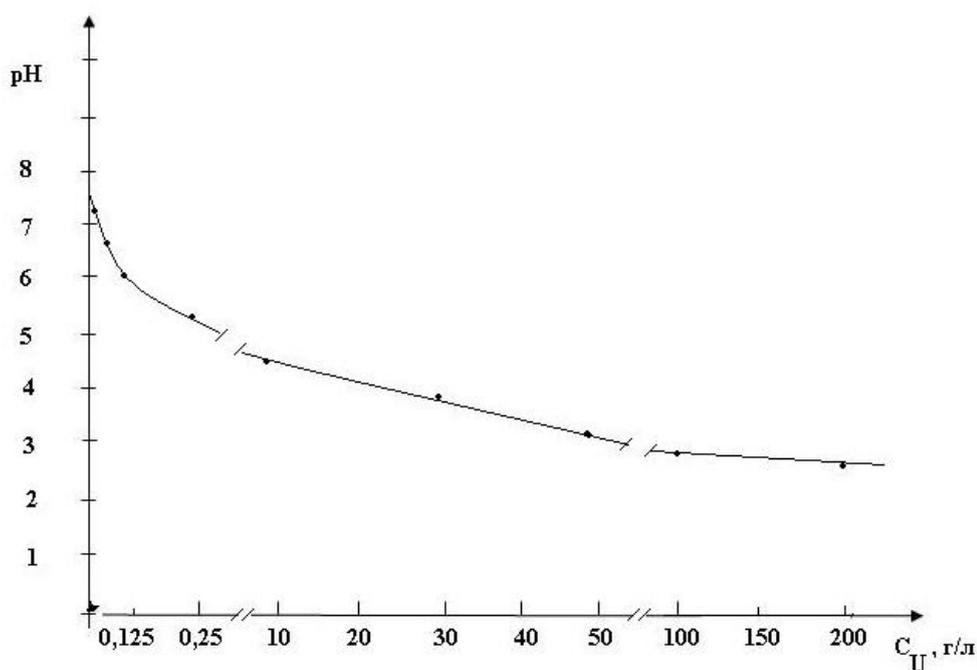


Рисунок 3.5 – Исследование влияния содержания урана на кислотность раствора при осаждении диуранатов

В эксперименте в сульфатном растворе концентрация урана находилась в пределах 5-6 г/л, а его полное осаждение наблюдалось при pH 5.0-6.2. Для проведения осаждения применялась аммиачная вода, расход которой составлял 0,7 кг на каждый килограмм урана.

После завершения процесса осажденный диуранат отделялся от жидкой фазы посредством фильтрации с рамными фильтр-прессами, что позволяло эффективно извлекать твёрдую фазу. Оставшиеся маточные растворы, содержащие 0,005-0,024 г/л урана, направлялись в хвостохранилище для последующего хранения.

Выделение диураната обладает существенным технологическим преимуществом, поскольку в процессе прокаливания он сравнительно легко трансформируется в чистую закись-окись урана (U_3O_8), значительно упрощая дальнейшие этапы переработки.

Дифференциально-термические исследования урановых соединений проводились на дериватографе, разработанном Ф. Пауликом и произведённом Венгерским оптическим заводом. В ходе эксперимента применялись платиновые тигли, обеспечивающие точность измерений и минимальное влияние посторонних факторов на результаты. Дериватограмма показала наличие следующих термических эффектов (рисунок 3.6): первый эндотермический эффект ($206^\circ\text{C} = 479\text{ K}$) – характеризует удаление воды, входящей в состав соединения. В ходе термического анализа диуранатных соединений наблюдаются характерные экзотермические реакции, сопровождающиеся их разложением. Эти процессы включают выделение аммиака и воды, что указывает на деструкцию аммонийных и гидроксильных групп в структуре соединения. Одновременно происходит кристаллизация триоксида урана (UO_3), свидетельствующая о переходе вещества в более устойчивое фазовое состояние при повышенной температуре. Второй эндотермический эффект ($656^\circ\text{C} = 929\text{ K}$) указывает на дальнейшие структурные преобразования вещества при повышении температуры.

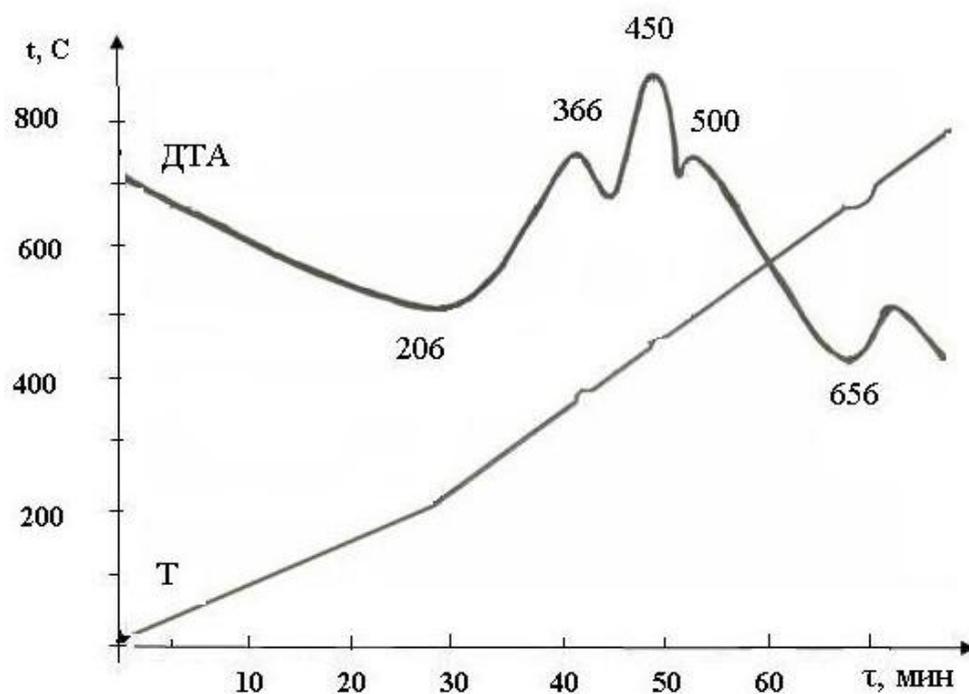


Рисунок 3.6 – Исследование термических эффектов диураната аммония методом дифференциально-термического анализа

При достижении $T=638^{\circ}\text{C} = 911 \text{ K}$ завершается заключительный этап трансформации триоксида урана (UO_3). В этот момент происходит окончательное превращение соединения в U_3O_8 , сопровождающееся изменениями в его кристаллической структуре. Данный процесс играет ключевую роль в формировании устойчивой модификации урана.

В процессе осаждения урана из кислого десорбата присутствующие примеси, такие как алюминийсодержащие, железосодержащие элементы и другие, осаждаются с ураном одновременно, в связи с чем жёлтый кек загрязняется, качество его ухудшается и усложняется его дальнейшая переработка. Кроме того, приходится расходовать аммиачную воду (NH_4OH) не только для образования уранил-содержащего осадка, но и для нейтрализации остаточных количеств серной кислоты, сохраняющейся в десорбате после предшествующих стадий переработки. Это увеличивает общее потребление реагента и приводит к возможному загрязнению конечного продукта (жёлтого кека) посторонними соединениями, образующимися при взаимодействии NH_4OH с примесями.

В связи с этим, с целью снижения расхода аммиачной воды и улучшения качества осадка, предлагается внедрение предварительного этапа нейтрализации серной кислоты в десорбате с использованием природного карбоната кальция (CaCO_3). Проведение такой нейтрализации позволяет эффективно снизить кислотность среды, способствует удалению вторичных ионов (например, сульфатов и магния), а также осаждению сопутствующих примесей в виде гипса и других малорастворимых соединений.

В Таджикистане на севере страны широко распространён природный карбонат кальция (CaCO_3), где его месторождения позволяют организовать добычу с минимальными затратами. Для подготовки сырья используется сухое измельчение в мельницах. Мельницы изготовлены из стальных труб (диаметр трубы 1 метр), а внутри них установлены стальные стержни (диаметр стержней 10 см). Принцип работы стержневой мельницы представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Схематическое изображение стержневой мельницы

Для эффективного удаления примесей из десорбата и сокращения расхода аммиачной воды предлагается использовать природный карбонат кальция (CaCO_3), содержащий 72-75% CaCO_3 . Данный материал измельчается в шаровой мельнице до фракции 0,074 мм (200 меш).

Соответственно, применение природного CaCO_3 позволяет предварительно нейтрализовать серную кислоту и устранить нежелательные примеси, снижая их влияние на осаждение урана. Технологическая схема процесса (рисунок 3.8) включает следующие стадии: заполнение колонны № 1: исходный десорбат подаётся в первую реакционную колонну, где объём заполняется приблизительно на $\frac{2}{3}$ общей вместимости; введение измельчённого карбоната

кальция (CaCO_3): нейтрализующее вещество в виде порошкообразного карбоната кальция добавляется порционно, при постоянном интенсивном перемешивании; регулирование pH среды: постепенное увеличение pH до значений 2,5–3,0, что обеспечивает осаждение сернокислого железа и прочих примесей в виде гипса.

После завершения реакции суспензия поступает в колонну № 2, где проходит механическую очистку с использованием фильтр-пресса для удаления осадочных примесей, включая гипс и соединения железа. Промывка твёрдого остатка – накопленный гипсовый осадок и другие твёрдые фракции промываются чистой водой для удаления влаги, содержащей следовые количества урана; перекачивание очищенного десорбата – обработанный раствор направляется во вторую колонку, освобождённую от примесей; добавление аммиачной воды – в колонку вводится аммиачная вода, при интенсивном перемешивании раствор достигает pH 7-8, что способствует полному осаждению урана в виде диурата аммония. Конечная стадия - извлечение урана, где эффективность осаждения достигает 99%, обеспечивая максимальную селективность процесса.

Процесс осаждения железа определяется комплексом параметров, включая время реакции, температуру и концентрацию используемых реагентов. Оптимальный диапазон pH 2.7-3.2 способствует формированию осадка гидратов железа, при этом уран остаётся преимущественно в растворе и лишь частично адсорбируется на осадочных частицах. Для эффективного удаления железа из десорбата рекомендуется применять известь (CaO) или природный карбонат кальция (CaCO_3). Эти соединения не только обеспечивают экономичность процесса, но и способствуют укрупнению осадка, так как их нерастворённые остатки формируют центры коагуляции гидратов железа, облегчая последующую фильтрацию и механическую обработку пульпы.

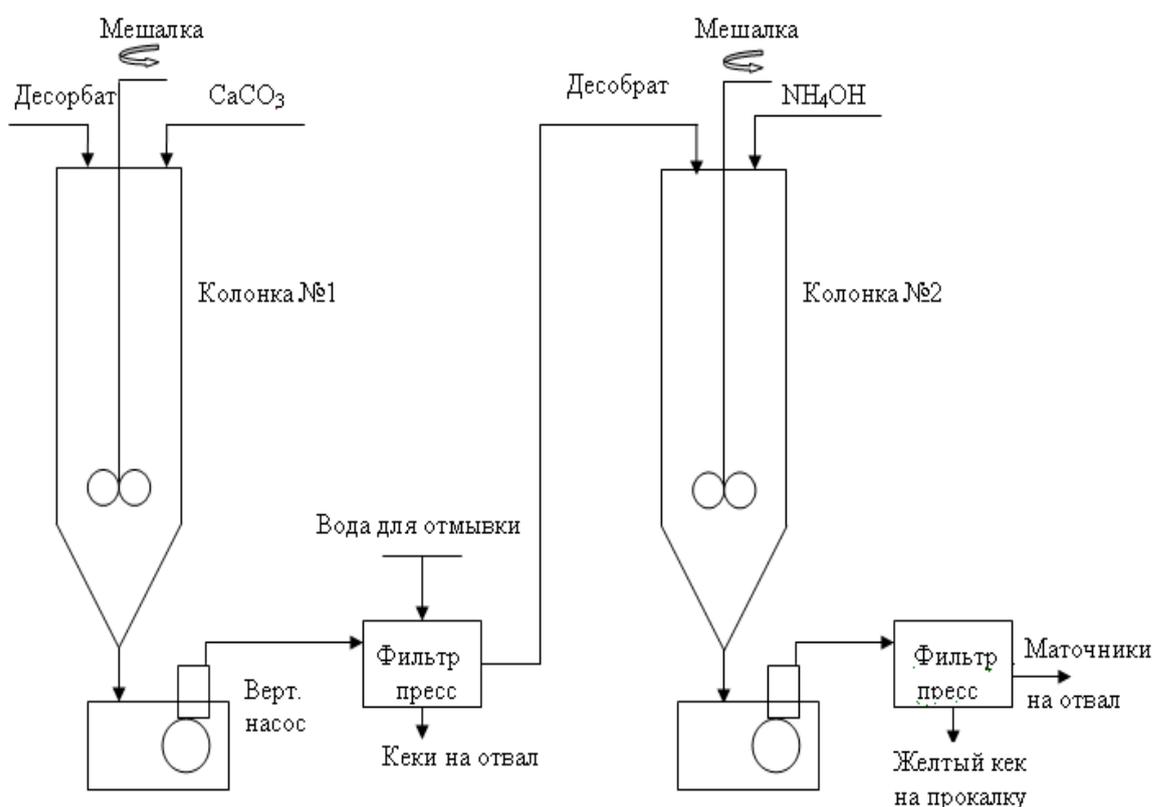


Рисунок 3.8 – Усовершенствованный процесс получения жёлтого кека на основе карбоната кальция

В рамках эксперимента для анализа использовался десорбат (в количестве 200 мл), имеющий следующий химический состав: pH раствора 0.25; серная кислота (H_2SO_4): 29,4%; концентрация металлов (Me): 32.0 г/л; железо (Fe^{3+}): 2.23 г/л; железо (Fe^{2+}): нет.

В процессе осаждения из десорбата диураната аммония в раствор постепенно добавляли аммиачную воду в количестве 186 мл, что приводило к достижению pH 4.0. После формирования осадка гидратов железа он был отфильтрован, а в фильтрате осталось 19,9 г/л металла (Me).

Осаждение с применением карбоната кальция ($CaCO_3$) выполнялось следующим образом: в 200 мл цехового десорбата порционно добавлено 50 г $CaCO_3$, что позволило снизить pH до 0.25 (таблица 3.3). Затем введено 14% аммиака до pH 3.5, что привело к осаждению урана. Здесь использовано свой-

ство CaCO_3 к поглощению воды, что в свою очередь увеличивает концентрацию металла в растворе, и позволяет использовать образовавшийся осадок в дальнейшей переработке.

После обработки во второй колонке, весь её объём проходит фильтрацию через фильтр-пресс, обеспечивая отделение осадка от жидкой фазы. Маточные растворы, содержащие минимальное количество урана, направляются в хвостохранилище, а полученный жёлтый кек поступает в отделение сушки для последующей обработки.

Отличительными особенностями схемы осаждения с применением известняка можно назвать следующие: на этапе предварительной обработки десорбат проходит частичную нейтрализацию с применением известняка. Этот процесс способствует снижению избыточной кислотности среды, приводя уровень pH от 0 до 1.5–2.0. Затем десорбционный раствор проходит фильтрацию посредством фильтр-пресса, где эффективно удаляются примесные соединения. Далее полученный фильтрат подвергается дополнительной обработке аммиачной водой, что приводит к увеличению pH до 3.0–3.5. В результате этого этапа происходит осаждение гидратов железа, что способствует дальнейшей очистке раствора.

Таблица 3.3 – Процесс осаждения из состава десорбата диураната аммония

№ ОПЫТ	Десорбат						Расход CaCO ₃ (71,16%)	Расход NH ₄ OH (21%, хч)	Объем раствора	рН раствора	Металл в растворе		Осадок диураната аммония	
	объем	рН	H ₂ SO ₄	U	Fe ⁺³	Fe ⁺²					U	Fe	U	Fe
а	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	200	-0,25	294	32,0	2,23	нет	50			0,25				
									250	3,25	28,0	0,53		
2	200	-0,1	165,4	20,5	2,37	нет	20			0,22				
							20			0,89	25,3			
3	200	0,38	83,3	11,7	1,67	нет	24		166	1,15	11,9			
							2		157	1,94	12,1			
4	200	0,4	90,7	10,6	1,6	нет	24		154	0,87	10,9			
									206	0,84	10,0			
							4		198	2,41	9,9	1,4		
							0,5		195	3,94	9,65	0,12		
	200	0,67	90,7	10,6	1,6	нет		58		3,35				
5	200	0,48	83,3	11,2	1,67	нет	2,6		164	1,28	12,4			
							2,0		204	3,18	10,6	0,25		

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	200	-0,25	294	32,0	2,23	нет		185		3,26				
7	200	1,02	134,8	13,1				80		3,45				
								20		8,5			33,3	9,76
8	200	-0,46	154,4	18,4	1,62	нет	10			-0,34	18,75			
							6		198	-0,07	17,5			
							8		195	0,18	17			
								34		3,05				

После предварительной обработки раствор подвергается фильтрации, что позволяет удалить остаточные примеси и подготовить среду для эффективного осаждения урана. Осаждение диураната аммония проводится в две ключевые стадии, каждая из которых играет важную роль в кристаллизации уранилсодержащих соединений и глубоком осаждении урана из раствора: 1 стадия - формирование кристаллов диураната аммония. На первом этапе раствор уранилсодержащего десорбата доводится до pH 4,0–5,0, после чего проводится выдержка в течение 30 минут. Эти условия способствуют образованию центров кристаллизации и зародышей крупных кристаллов диураната аммония. 2 стадия - дополнительная нейтрализация и максимальное извлечение урана. Во второй фазе обработку раствора продолжают: добавляется аммиачная вода (NH_4OH) до достижения pH 8,0–8,5, после чего снова выдерживается 30 минут, обеспечивая максимальное осаждение урана.

Соответственно, экономическая эффективность применения CaCO_3 выражается в следующем: применение карбоната кальция (CaCO_3) в технологическом процессе заключается в значительном сокращении расхода аммиачной воды – практически в 2 раза. При этом затраты на реагенты существенно снижаются, поскольку стоимость 1 тонны CaCO_3 составляет всего 10 долларов США, что гораздо выгоднее по сравнению с 1 тонной аммиачной воды, цена которой достигает 150 долларов США.

Для урановых руд месторождения "Танзим" после их выщелачивания серноокислотным методом, оптимизации основных параметров процесса, была разработана специальная схема, представляющая технологию рассматриваемого процесса (рисунок 3.9).

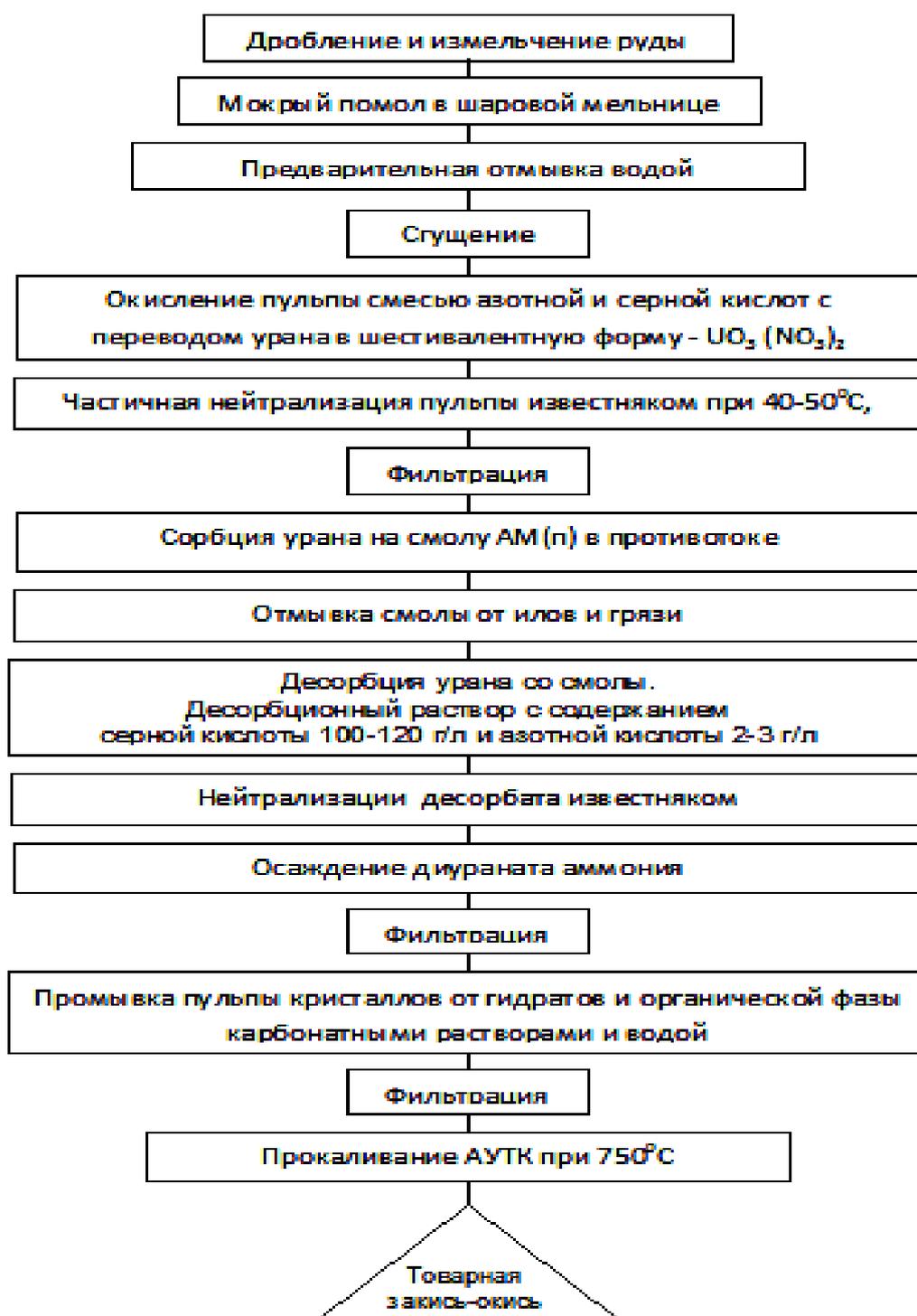


Рисунок 3.9 – Оптимизированный схематический процесс извлечения урана из руды месторождения "Танзим" путём сернокислотного выщелачивания

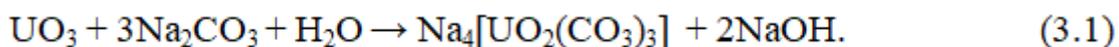
Согласно технологической схеме (рисунок 3.9), процесс обработки руды включает несколько последовательных этапов: подготовка сырья – исходный материал проходит последовательно дробление и измельчение; где происхо-

дит механическое разрушение исходного материала с целью получения фракций оптимального гранулометрического состава; промывка (удаляются мелко-дисперсные и легкорастворимые примеси – пыль, глинистые частицы); сгущение (повышается концентрация твёрдой фазы в суспензии перед стадией выщелачивания); выщелачивание (обработка суспензии серной кислотой, способствующая переводу урана в растворимую форму (UO_2^{2+})); фильтрация (жидкая фаза, содержащая растворённый уран, отделяется от нерастворённого остатка; адсорбция (извлечение уранил-ионов из продуктивного раствора с помощью специализированных ионнообменных сорбентов, например, анионита АМ(п)); десорбция (когда уран переводится из сорбента обратно в жидкую фазу с целью последующего осаждения); осаждение (введение реагентов (аммиачной воды), приводящее к образованию диураната аммония - промежуточного твёрдого продукта); сушка (из полученного осадка удаляется влага); про-калка (термическое разложение осадка с образованием стабильного оксида урана (U_3O_8), пригодного для хранения или дальнейшего использования).

3.1.2. Карбонатное выщелачивание урановых руд месторождения "Танзим"

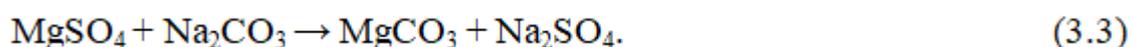
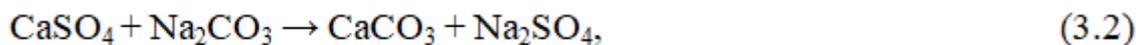
Карбонатное выщелачивание (или содовое выщелачивание, согласно терминологии, принятой в специализированной литературе) представляет собой один из ключевых методов извлечения урана, занимающий второе место по значимости после кислотного способа. Его применение целесообразно в тех случаях, когда использование кислотных реагентов оказывается экономически неэффективным либо приводит к нежелательным побочным эффектам, связанным с агрессивным воздействием на минералогическую матрицу. Наибольшую эффективность данный метод демонстрирует при переработке руд, содержащих значительное количество карбонатов магния и кальция (например, доломит, магнезит, кальцит), которые в условиях кислотного выщелачивания вступают в интенсивные побочные реакции, повышающие расход реагентов. Основной принцип карбонатного выщелачивания заключается в разложении

ураносодержащих минералов под действием растворов карбонатов щелочных металлов. При этом уран переводится в растворимую форму в виде уранилкарбонатных комплексов. Процесс протекает по следующей обобщённой реакции:



При реализации химического взаимодействия, описанного уравнением (3.1), уран переходит в раствор в виде комплексного соединения - трикарбонатуранилата натрия, обладающего высокой растворимостью в щелочной среде. Формирование этого устойчивого анионного комплекса лежит в основе процесса карбонатного (содового) выщелачивания урана, эффективно применяемого при обработке различных осадочных пород. Особенно высокая эффективность достигается при переработке ураносодержащих триоксидов, моноуранатов, а также силикатных и карбонатных минералов, входящих в состав природных руд [232].

В процессе содового выщелачивания наличие примесей, как гипс и магниевый сульфат, нежелательно, поскольку для их химического взаимодействия с содой необходимы дополнительные расходы реагента:



Кремнезём практически не вступает в реакцию с карбонатным раствором, даже если в технологии предусматривается использование высоких температур. Кремнезём в технологических смесях обычно имеет низкое содержание, не превышающее 0.4 г/л. Гематит и глинозём также демонстрируют слабую реакционную способность с содой, их содержание в растворе измеряется в десятых или сотых долях грамма на литр. Кроме того, карбонатные соединения кальция и магния остаются химически стабильными при контакте с содовым раствором, что делает данный метод особенно эффективным при обработке ураносодержащих карбонатных руд.

При этом фосфор и ванадий, находящиеся в руде в форме пятиокисей, способны хорошо растворяться в содовом растворе, образуя растворимые соединения:



Кроме того, если в руде присутствуют молибден и мышьяк в форме оксидов, то они также эффективно извлекаются содовым выщелачиванием.

Экологически более безопасным и рациональным представляется проведение мокрого дробления карбонатных урановых руд непосредственно на месторождении перед транспортировкой на гидрометаллургический завод. Такой подход помогает минимизировать распространение радионуклидов и снизить уровень загрязнения окружающей среды. В ходе дробления происходит частичное растворение в воде урановых карбонатов, если отношение Т:Ж = 1:10, то концентрация урана в растворах составляет до 0.1 г/л, или если отношение Т:Ж = 1:1, то до 0.3 г/л. Полученный раствор можно подвергнуть предварительному извлечению урана посредством сорбции на анионите АМ(п) прямо на месте добычи, что снижает затраты на последующую переработку.

Транспортировка влажной руды после мокрого дробления на гидрометаллургический комплекс позволяет предотвратить образование пыли, что, в свою очередь, минимизирует загрязнение окружающей среды вдоль маршрута перевозки различными радионуклидами, преимущественно за счёт уменьшения альфа-излучения.

Содовое выщелачивание является распространённой технологией в урановой промышленности. В ходе его применения образуются малорастворимые гидроксиды металлов, а шестивалентный уран формирует диуранаты (таблица 3.4).

Помимо кальция, все указанные металлы могут успешно осаждаться при обработке урановых руд с использованием содового раствора. Однако процесс формирования гидратов происходит только при четко определённых значениях рН среды, которые представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.4 - Растворимость в воде гидроксидов отдельных металлов (Т=25°С) (в порядке снижения значений)

Гидроксиды металлов	Растворимость, г/л	Гидроксиды металлов	Растворимость, г/л
$Ca(OH)_2$	1.2	$Na_2U_2O_7$	$5.0 \cdot 10^{-4}$
$UO_2(OH)_2$	$9.0 \cdot 10^{-3}$	$U(OH)_4$	$1.0 \cdot 10^{-7}$
$Fe(OH)_2$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$Fe(OH)_3$	$2.0 \cdot 10^{-7}$
$Mg(OH)_2$	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$Al(OH)_3$	$6.0 \cdot 10^{-7}$
$(NH_4)_2U_2O_7$	$5.0 \cdot 10^{-4}$		

Таблица 3.5 – Величины уровней рН, оптимальных для осаждения гидроксидов отдельных металлов (в порядке снижения рН)

Гидроксиды металлов	рН	Гидроксиды металлов	рН
$Mg(OH)_2$	>10.0	$UO_2(OH)_2$	3.8-6.0
$Ca(OH)_2$	>10.0	$Cr(OH)_3$	5.3
$Mn(OH)_2$	8.6-10.0	$Cu(OH)_2$	5.2-5.8
$Co(OH)_2$	8.0-9.0	$Al(OH)_3$	4.0-6.0
$Ni(OH)_2$	8.0-9.0	$Th(OH)_4$	3.2-3.5
$Fe(OH)_2$	8.0-9.0	$Fe(OH)_3$	2.5-3.5

Для полноценного и максимального осаждения урана требуется строго соблюдать уровень рН около 6, а процесс концентрирования осуществлять при взаимодействии с щелочными компонентами или аммиаком, поддерживая рН в пределах 6-7. В соответствии с этими условиями, карбонатный метод извлечения проводился с применением карбоната натрия (Na_2CO_3) в количестве от 100 до 400 кг на каждую тонну сырья.

Пульпа выщелачивалась при отношении твёрдой и жидкой фаз (Т:Ж)

1:2, при температуре 80°C на протяжении 6 часов. После этого твёрдый остаток промывали водой трижды, поддерживая соотношение Т:Ж 1:1. Анализ результатов показал, что увеличение дозировки соды от 100 до 400 кг/т способствует росту степени извлечения урана, достигая максимального уровня в 82% (рисунок 3.10). Однако наилучший баланс между расходом реагента и эффективностью извлечения достигается при 72%, когда дозировка Na_2CO_3 составляет 200 кг/т. Итоговые данные исследования систематизированы в таблице 3.6.

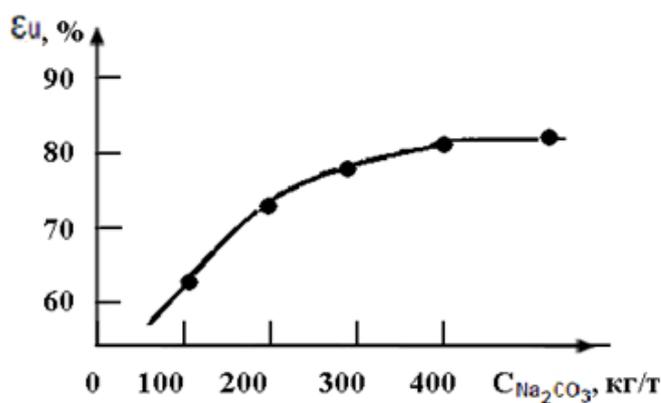


Рисунок 3.10 – Извлечение урана в зависимости от расходов соды (параметры содового выщелачивания: температура 80°C, время 6 ч, Т:Ж=1:2)

Данное исследование демонстрирует следующие важные аспекты:

- при транспортировке руды можно снизить выброс радионуклидов, используя непосредственно в точках её добычи метод влажного дробления. Такой подход позволяет повысить безопасность процесса и снизить нагрузку экологического загрязнения;

- метод мокрого дробления способствует частичному переходу в раствор урана, этот урановый раствор направляется сразу на стадию сорбции, обходя этап выщелачивания. Такой подход способствует оптимизации технологического процесса и снижению затрат на дальнейшую обработку урановых концентратов.

Таблица 3.6 – Переработка урановой руды месторождения "Танзим" методом содового выщелачивания ($\text{CaCO}_3=14,98\%$, концентрация урана в руде 0.55 процентов)

№ опыта	Навеска, г		Расход Na_2CO_3 , кг/т	Температура пульпы, °С	Время выщелачивания, час	Фильтрат после выщелачивания			Отмывка с водой (Т:Ж=1:1)									Остаток U в твёрдом виде, %	Извлечение U, %
	руда	Na_2CO_3				V, мл	U, г/л	pH	I			II			III				
									V, мл	U, г/л	pH	V, мл	U, г/л	pH	V, мл	U, г/л	pH		
1	20	2	100	20	6	22	2,67	9,8	37,5	1,575	10,0	42	0,317	9,8	48	0,0291	9,5	0,213	61
2	20	4	200	80	6	48	2,11	10,5	24	2,311	10,5	24	0,0167	10,0	24	0,0068	9,3	0,154	72
3	20	6	300	80	6	52	1,75	10,3	26	0,589	10,4	26	0,0346	10,2	26	0,0075	9,1	0,120	78
4	20	8	400	80	6	56	1,73	10,5	28	0,5	10,5	28	0,021	10,4	28	0,021	9,7	0,097	82

3.2. Извлечение урана из руд месторождения

"Центральный Таджикистан" методом выщелачивания серной кислотой

В ходе детального анализа литературных источников, использованных в данной диссертационной работе, было выявлено, что выщелачивание играет ключевую роль в технологии извлечения урана в промышленном масштабе. Выбор оптимального растворителя для этого процесса определяется минералогическими и химическими характеристиками руды, а также свойствами окружающих пород.

Минералогический анализ руд месторождения «Центральный Таджикистан» показал, что уран содержится преимущественно в виде экзогенных минералов, таких как коффинит и уранофан, обладающих способностью к миграции. В связи с тем, что уран в указанных минералах встречается в четырёх- и шестивалентных формах, руды пригодны как для кислотного, так и для карбонатного методов выщелачивания. При этом кислотное выщелачивание демонстрирует более высокий коэффициент извлечения урана по сравнению с карбонатным. В качестве доступного и экономически целесообразного растворителя при кислотном методе применяется серная кислота.

Учитывая эти факторы, было проведено исследование сернокислотного разложения урановых руд месторождения «Центральный Таджикистан» с добавлением перекиси водорода, что позволило изучить эффективность данного процесса и его влияние на извлечение целевого компонента [230]. Гранулометрические характеристики исследуемой руды представлены в таблице 3.7, отражая распределение размеров частиц.

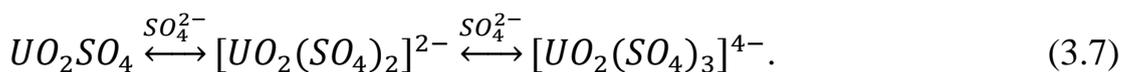
Таблица 3.7 - Гранулометрический состав руды месторождения "Центральный Таджикистан"

Выход классов	Крупность классов, мкм						$\Sigma_{\text{вы-ход}}$ классов
	+300	-300+125	-125+106	-106 +90	-90 +63	-63	
в граммах	63	308	82	37	6	4	500
в %	12.6	61.6	16.4	7.4	1.2	0.8	100

При кислотном выщелачивании окислённых минералов уран переходит в раствор в виде уранил-иона:



Кроме сульфатуранила, в жидкой фазе содержатся комплексные сульфаты уранила:



Концентрационные параметры отдельных сульфатных комплексов в растворе формируются под воздействием сложного равновесного взаимодействия, определяемого содержанием урановых ионов, сульфата, бисульфата и водорода. Оптимальная минимальная концентрация серной кислоты определяется необходимостью поддержания уранил-иона в растворённой форме в ходе выщелачивания. Она зависит от уровня рН, при котором происходит осаждение шестивалентного урана из сульфатных растворов в присутствии анионов, а также от концентрации окислителя, которым в данном случае выступает перекись водорода. Некоторые ключевые показатели процесса выщелачивания урана в сернокислых растворах представлены на рисунке 3.11, отражая влияние химических параметров на эффективность извлечения металла. Кроме того, учитываются факторы стабилизации раствора, влияющие на реакционную способность и конечный выход урана.

Анализ данных, представленных на рисунке 3.11а, показывает, что наиболее эффективный расход окислителя (25% перекиси водорода) при параметрах процесса: температура 60°C, продолжительность 4 часа, концентрация серной кислоты 150 кг/т, соотношение твёрдое-жидкое 1:2-5 составляет 25 мл/л. При этом степень перехода урана в раствор достигает 95,6%, что подтверждает оптимальность таких условий. В дальнейших экспериментах применялся тот же 25%-ный раствор перекиси водорода с идентичным расходом (25 мл/л). Как показано на рисунке 3.11б, максимальная растворимость урана

наблюдается при концентрации серной кислоты 150 кг/т, причём дополнительное её увеличение не приводит к значительному улучшению эффективности выщелачивания. Наибольший выход урана из руды (96%) фиксируется спустя 4 часа выщелачивания в присутствии перекиси водорода. После этого процесс замедляется, а продолжение выщелачивания после 5–6 часов уже не даёт значительных преимуществ, что делает дальнейшее увеличение времени обработки нецелесообразным с точки зрения производительности и затрат.

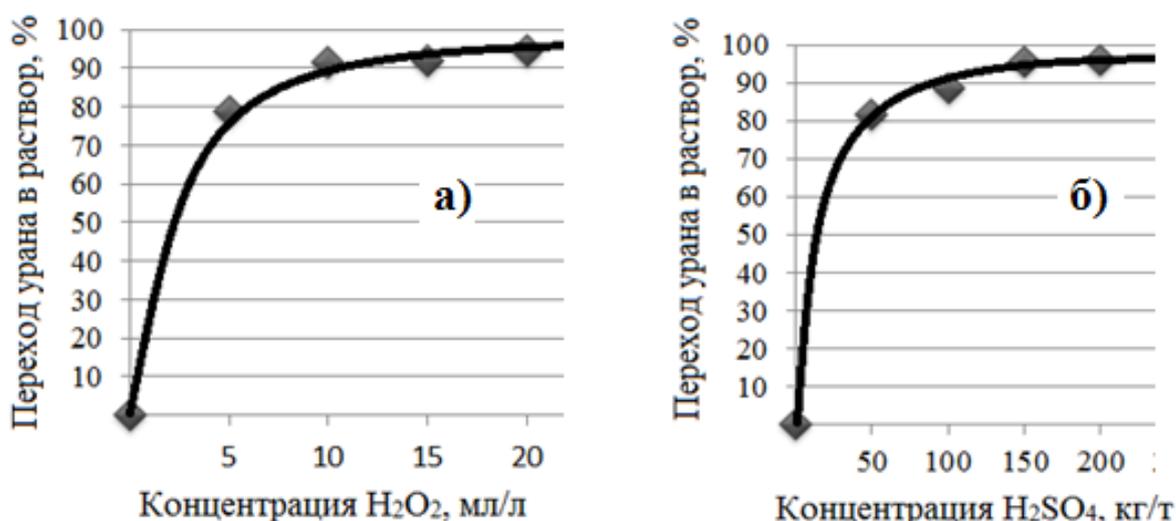


Рисунок 3.11 - Зависимость процесса выщелачивания: а) от расхода окислителя (25% H₂O₂) при условиях: T=60 °C; τ=4 часа; C_{H₂SO₄}=150 кг/т; T:Ж=1:2-5. б) от концентрации серной кислоты при условиях: T=60 °C; C_{H₂O₂}=25 мл/л; τ=4 часа; T:Ж=1:2-5

Таким образом, проведённое исследование подтвердило эффективность сернокислотного метода выщелачивания урана из руд месторождения «Центральный Таджикистан». Благодаря высокому содержанию кварца (34,5%) потребление серной кислоты остаётся относительно низким, что делает процесс экономически оправданным. Оптимальные условия выщелачивания обеспечивают 96% извлечения урана, при этом ключевые параметры реакции включают: температуру 60°C, длительность 4 часа, концентрацию перекиси водорода (25 мл/л), содержание серной кислоты (150 кг/т) и соотношение твёрдое-жидкое (1:2–5).

В целях сравнительного анализа был изучен альтернативный вариант выщелачивания, при котором вместо перекиси водорода использовали 63%-ную азотную кислоту, объём азотной кислоты в растворе меняли в диапазоне от 50 до 250 кг/тонну. В опытах определили оптимальный объём HNO_3 , который оказался равным 25 мл/л. При этом объёме азотной кислоты наблюдается максимальный переход в раствор урана, составляя в процентном соотношении 86,3% (рисунок 3.12а).

Схожие эксперименты, направленные на определение эффективности различных окислителей, проводились в условиях перемешивания в сернокислых растворах с добавлением пиролюзита в количестве 65 процентов. При использовании 50 кг/т пиролюзита удалось достичь максимальной степени растворения урана, равной 91,5 процентов.

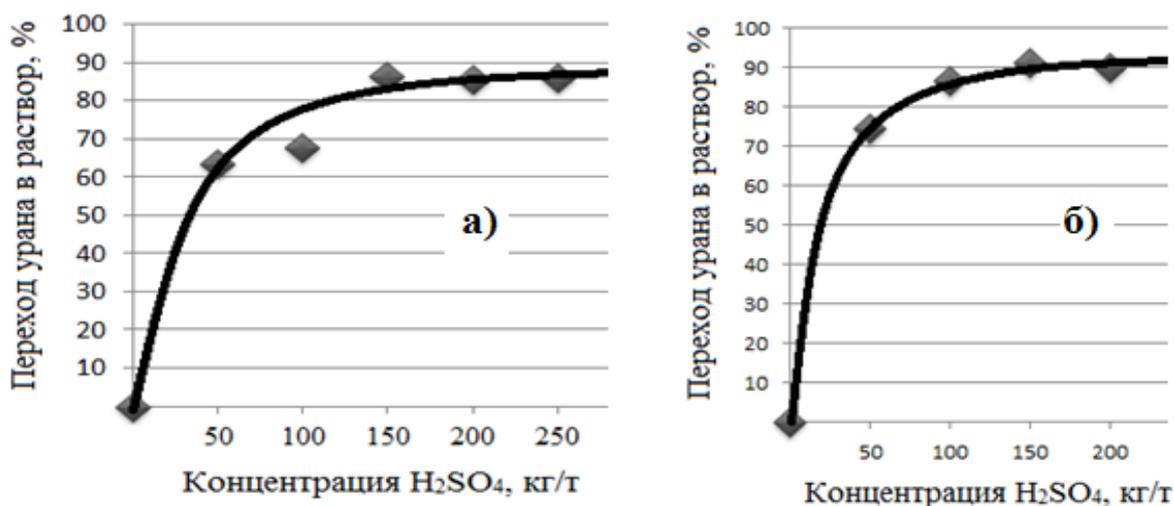


Рисунок 3.12 – Влияние на выщелачивания урана H_2SO_4 и объёмов окислителей: а) HNO_3 , б) MnO_2 (общие параметры процесса - $T=60^\circ\text{C}$, $T:Ж=1:2-5$, $\tau=4$ ч)

На рисунке 3.13 представлена диаграмма, демонстрирующая сравнительный анализ действенности перекиси водорода по отношению к другим окислителям, таким как пиролюзит и азотная кислота, в сернокислом растворе.

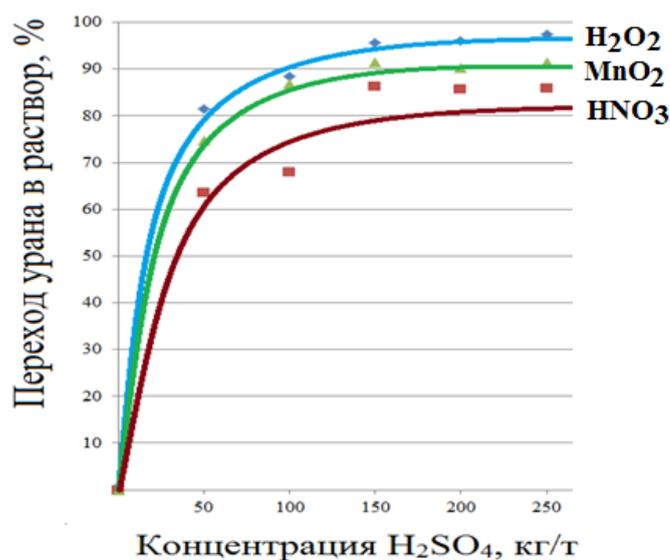


Рисунок 3.13 – Исследование параметров сернокислотного выщелачивания урана: роль объёмов окислителей и концентрации кислоты (H₂O₂ (25 мл/л); MnO₂ (50 кг/тонну); HNO₃ (25 мл/л) (общие параметры процесса - T=60°C, T:Ж=1:2-5, τ=4 ч))

Исходя из проведённых испытаний, можно сделать заключение, что в сернокислых растворах перекись водорода обладает высокой окислительной способностью, обеспечивая результативное извлечение урана из руд месторождения "Центральный Таджикистан".

Ключевым аспектом, влияющим на продуктивность процесса выщелачивания, является его продолжительность. Исследования, охватывающие временной диапазон от 1 до 6 ч, продемонстрировали, что увеличение продолжительности способствует повышению степени растворения урана, достигая оптимального значения при 4 часах обработки (рисунок 3.14).

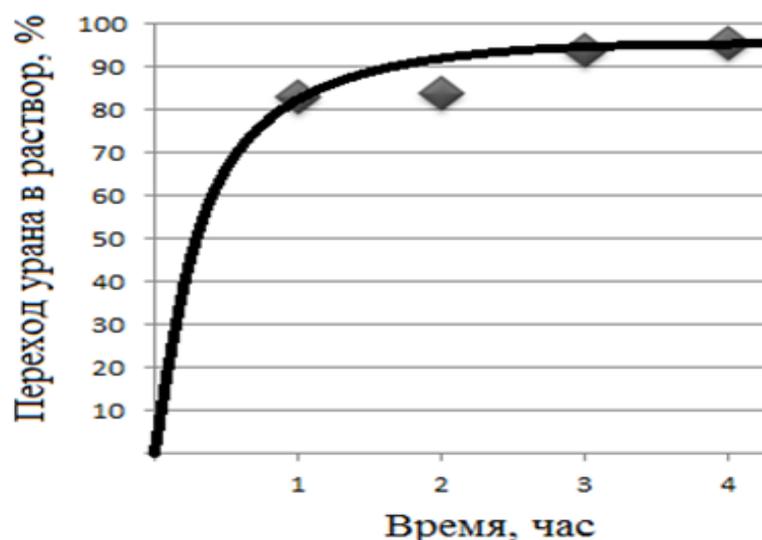


Рисунок 3.14 – Влияние продолжительности процесса (τ) выщелачивания на выход урана (постоянные параметры процесса - $T=60^{\circ}\text{C}$, $T:Ж=1:2-5$, объёмы: $\text{H}_2\text{O}_2 - 25$ мл/л, $\text{H}_2\text{SO}_4 - 150$ кг/тонну)

Проведено исследование влияния рН растворов на степень извлечения урана с применением различных окислителей — пероксида водорода, диоксида марганца и азотной кислоты. В условиях сернокислой среды нужные значения рН достигались путём изменения концентрации серной кислоты: при её начальной концентрации не менее 50 кг/т рН корректировался добавлением небольших объёмов кислоты в течение эксперимента. Опыт длился 4 часа, проводился при температуре 60°C , используя 100 г исходного сырья. В ходе проведённых экспериментов были протестированы три различных окислителя: азотная кислота (25 мл/л), пиролюзит (50 кг/т) и перекись водорода (25 мл/л). Процесс извлечения урана отслеживался с помощью химического анализа полученных растворов, а уровень рН контролировался в режиме реального времени, обеспечивая точность данных.

По результатам исследования установлено, что оптимальная эффективность извлечения урана при всех трёх вариантах достигается в диапазоне рН 0.9–1.2, что свидетельствует о благоприятных условиях для выщелачивания. В ходе экспериментов рассматривались значения рН от 0.6 до 2.25, однако при

увеличении концентрации серной кислоты не отмечено существенного увеличения эффективности процесса выщелачивания. Итоговые данные экспериментов систематизированы в виде рисунка 3.15.

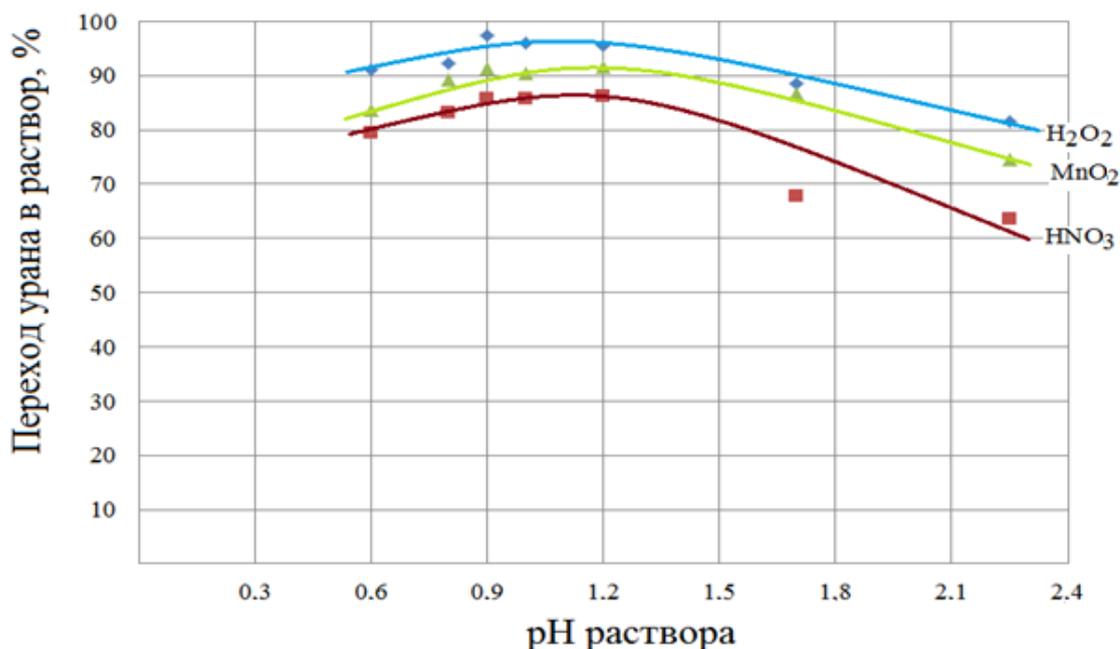


Рисунок 3.15 - Влияние уровней pH растворов ($T=60^{\circ}\text{C}$, время 4 ч, $T:Ж=1:2.5$) и объёмов окислителей (HNO_3 - 25 мл/л, пиролюзит - 50 кг/т, перекись водорода - 25 мл/л) на процесс выщелачивания урана

Экспериментальные данные подтверждают, что в среде сернокислотных растворов пероксид водорода обладает значительно более высокой окислительной активностью по сравнению с такими мощными реагентами, как азотная кислота и пиролюзит. При этом его эффективность не зависит от уровня pH раствора, что подтверждается сведениями, представленными на рисунке 3.15.

Таким образом, исследование процесса разложения урансодержащей руды месторождения "Центральный Таджикистан" позволило определить оптимальные параметры выщелачивания, обеспечивающие максимальную степень извлечения урана (95,6%). Ключевые условия технологического процесса включают: концентрация серной кислоты – 150 кг/т; соотношение твёрдое-жидкое ($T:Ж$) – 1:2–5; температура – 60°C ; окислитель – 25%-ный пероксид

водорода, расход 25 мл/л. Эти параметры обеспечивают стабильное разложение руды и эффективное выделение целевого компонента.

3.2.1. Кинетика процесса выщелачивания ураносодержащих руд месторождения "Центральный Таджикистан"

Исследование кинетических процессов выщелачивания ураносодержащих руд сернокислотным методом [222] было осуществлено с варьированием окислителей. В качестве окислителей процесса были выбраны три окислителя: азотная кислота (50 л/тонну), пиролюзит (50 кг/т), перекись водорода (50 л/тонну). Эксперименты проводились при параметрах - температурный диапазон 293–353 К, длительность 6 часов, соотношение твёрдых и жидких компонентов (Т:Ж) 1:2, количество серной кислоты 150 кг/тонну.

Результаты, полученные в данных экспериментах, обобщены в рисунках 3.16–3.18, согласно которым можно заключить, что по мере увеличения продолжительности выщелачивания и повышения температуры наблюдается рост степени извлечения урана. Наиболее интенсивное извлечение урана происходит в первые 1–2 часа реакции при нагреве реакционной смеси до 60–80°C.

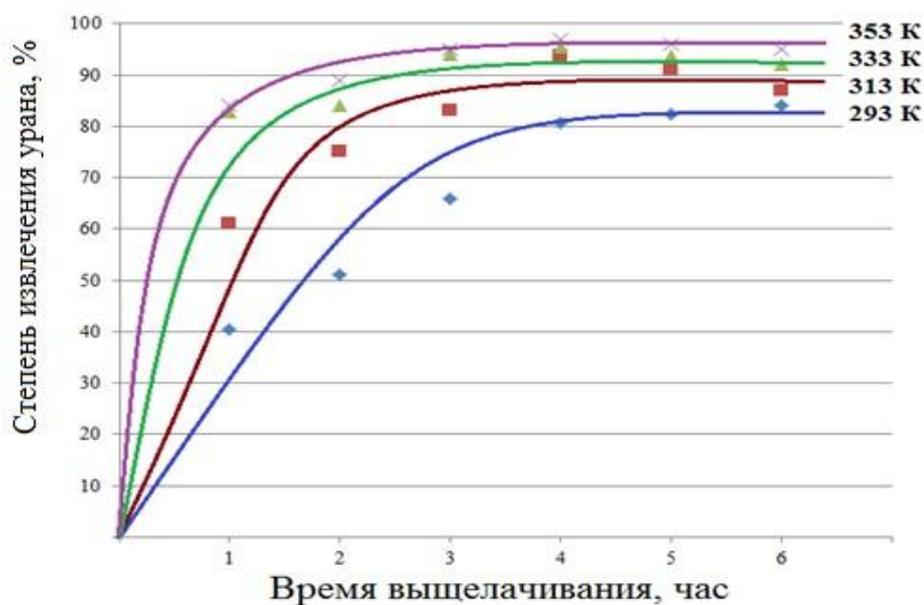


Рисунок 3.16 - Длительность выщелачивания урана в присутствии H_2O_2 : влияние температурного режима

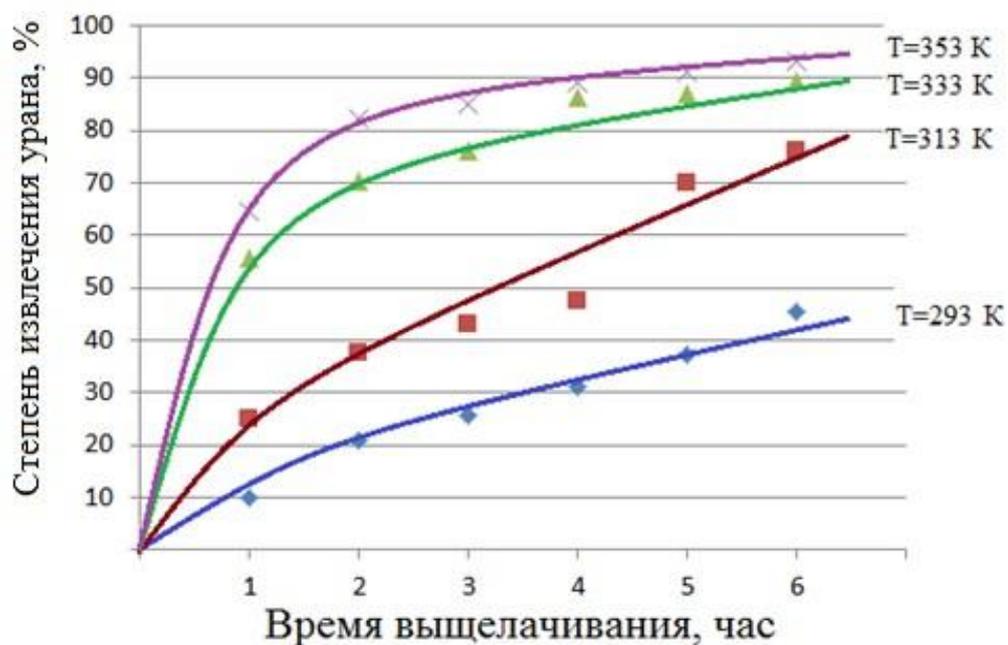


Рисунок 3.17 - Длительность выщелачивания урана в присутствии HNO_3 : влияние температурного режима

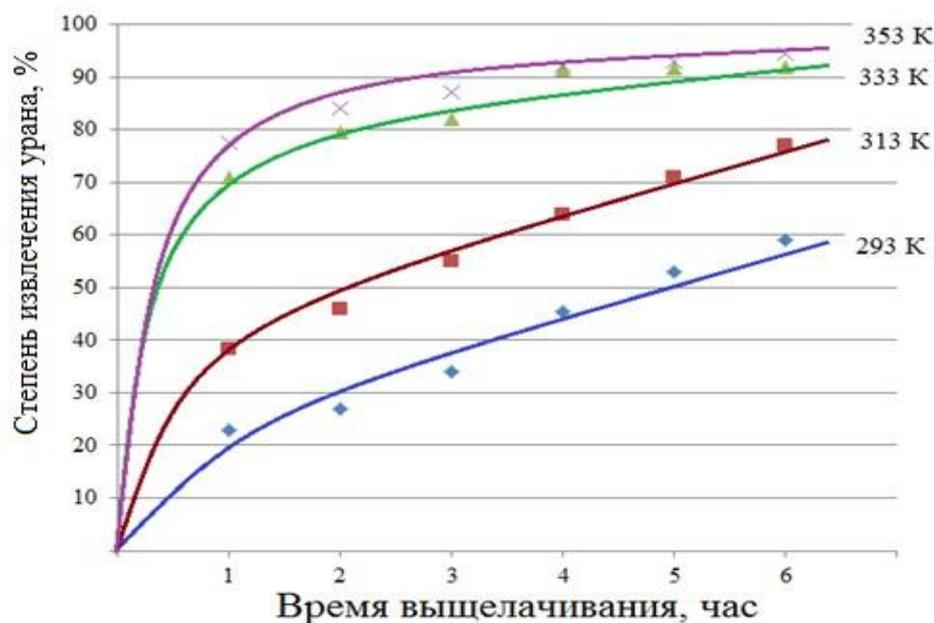


Рисунок 3.18 - Длительность выщелачивания урана в присутствии диоксида марганца (MnO_2): влияние температурного режима

По мере увеличения продолжительности выщелачивания до 4 часов и более степень извлечения урана не изменяется или изменяется в малых пределах, что делает дальнейшее продление времени реакции нецелесообразным.

Были построены графики, которые представляют собой кривые линии с определёнными углами наклона. Динамика изменений описывается уравнением кинетики первого порядка, известным как уравнение Ерофеева-Колмогорова:

$$\frac{da}{d\tau} = k(1 - \alpha).$$

Каждая из переменных в уравнении имеет следующее значение:

α – показатель извлечения урана, в процентном соотношении;

τ – продолжительность выщелачивания, час;

k – коэффициент скорости реакции, являющийся константой, час⁻¹.

Далее это уравнение можно представить в следующей форме:

$$\lg(1 - \alpha) = \frac{k \cdot \tau}{2.303}. \quad (3.8)$$

На основании графической зависимости времени разложения (τ) от $\lg(1/(1-\alpha))$, которая отражена на рисунках 3.19–3.21, выполнялись вычисления по определению значений коэффициентов скоростей реакций.

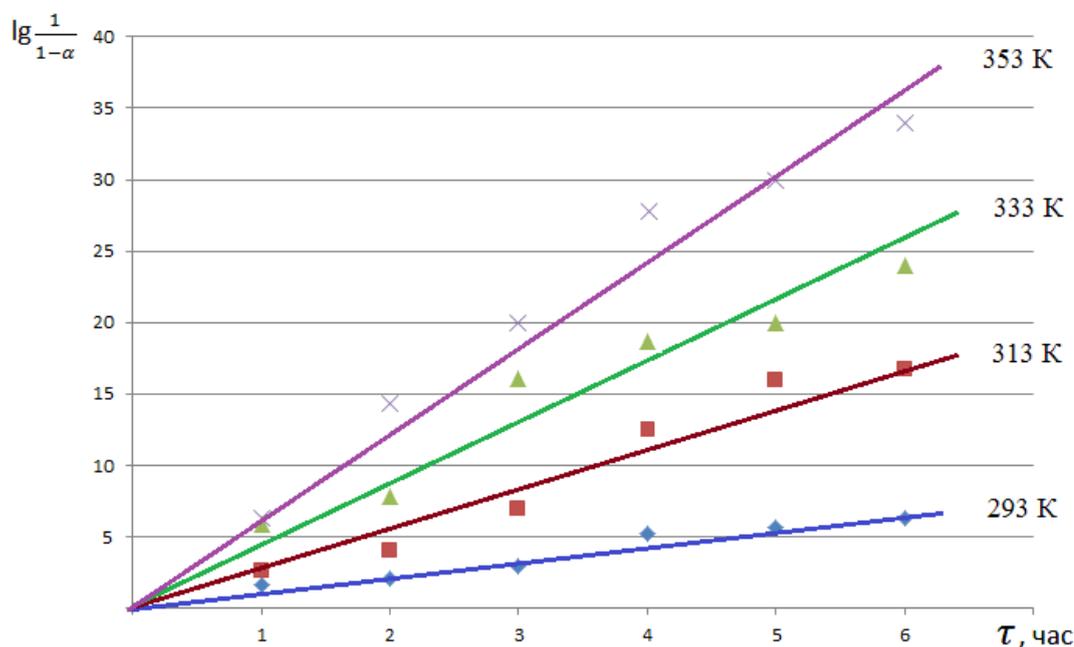


Рисунок 3.19 - Влияние длительности выщелачивания на кинетику извлечения урана: зависимость $\lg(1/(1-\alpha))$ при применении H_2O_2

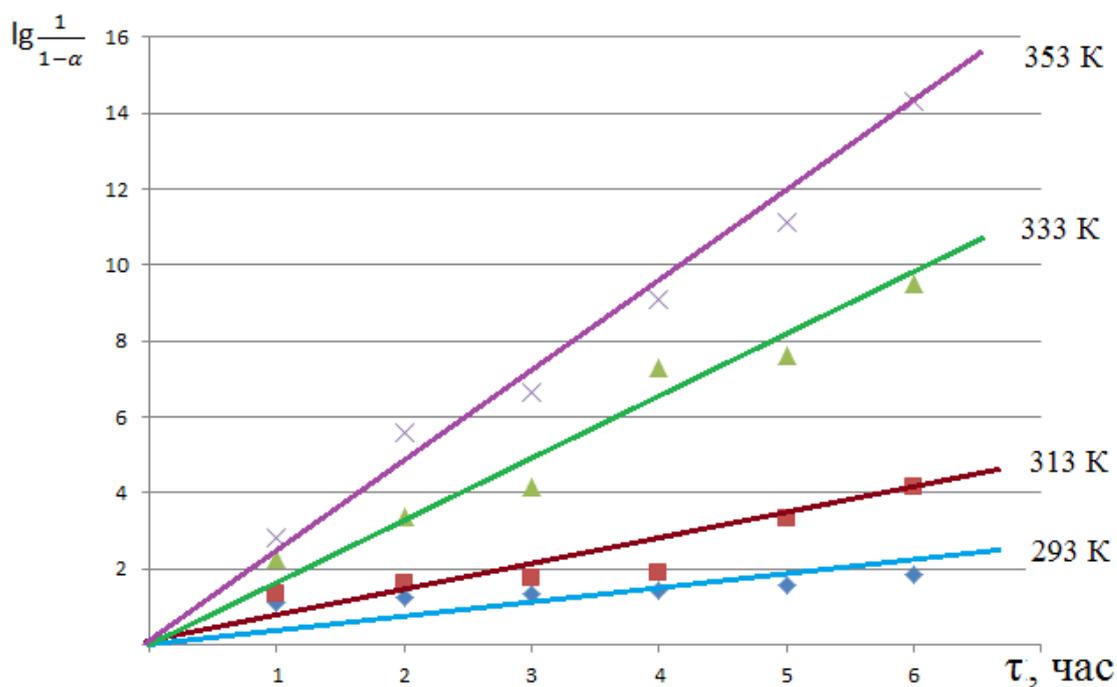


Рисунок 3.20 - Влияние длительности выщелачивания на кинетику извлечения урана: зависимость $\lg(1/(1-\alpha))$ при применении HNO_3

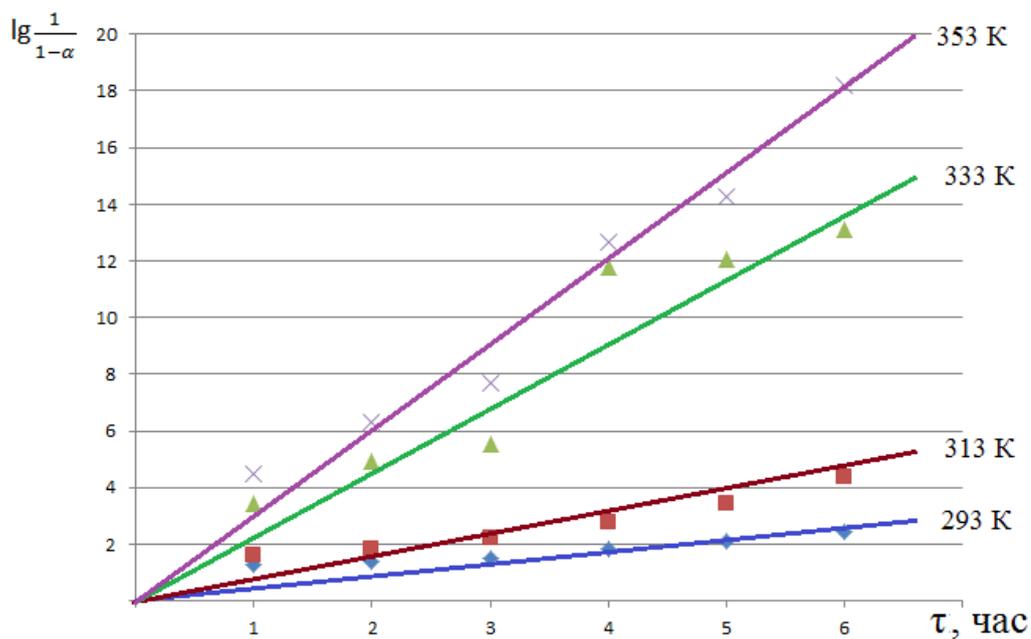


Рисунок 3.21 - - Влияние длительности выщелачивания на кинетику извлечения урана: зависимость $\lg(1/(1-\alpha))$ при применении MnO_2

Взаимную зависимость температуры и коэффициента скорости реакции выражают в виде уравнения Аррениуса:

$$\lg k = \lg k_0 - \frac{E}{2.303 \cdot R \cdot T} \quad (3.9)$$

Графический анализ зависимости $\lg k$ от $1/T$, представленный на рисунках 3.22–3.24, показывает, что все полученные экспериментальные данные следуют прямолинейной закономерности. Это подтверждает правомерность применения модели Аррениуса для описания кинетики рассматриваемых процессов.

На основании тангенсов углов наклона прямых линий для каждого из процессов:

$$E = 2,303 \cdot R \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (3.10)$$

получены значения энергии активации для процессов выщелачивания урана с различными окислителями, что позволяет оценить их эффективность и кинетические характеристики:

- перекись водорода (H_2O_2) – 2.5 кДж/моль;
- азотная кислота (HNO_3) – 5.7 кДж/моль;
- диоксид марганца (MnO_2) – 4.8 кДж/моль.

Эти показатели свидетельствуют о том, что процессы разложения протекают в условиях, соответствующих диффузионным закономерностям. Полученные данные систематизированы в таблице 3.8.

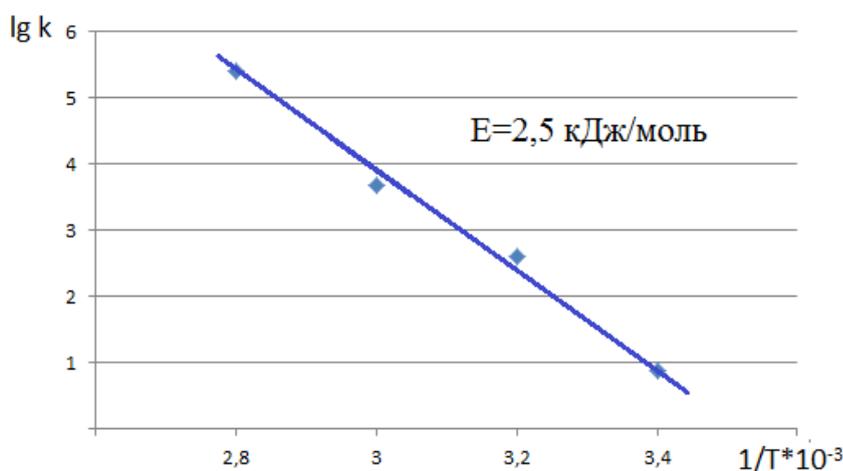


Рисунок 3.22 - Влияние температуры на кинетику выщелачивания урана: зависимость $\lg k$ от $1/T$ при использовании окислителя – перекиси водорода (H_2O_2).

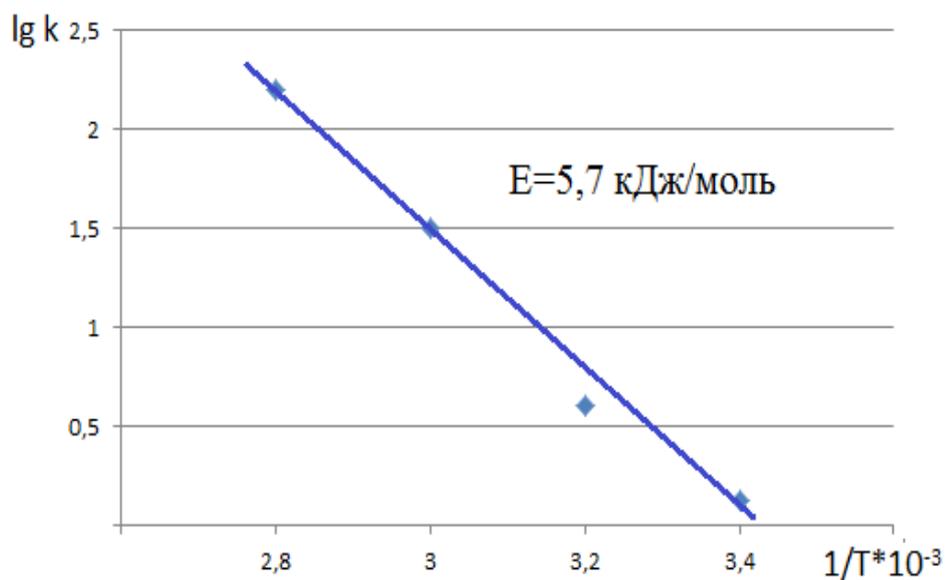


Рисунок 3.23 - Влияние температуры на кинетику выщелачивания урана: зависимость $\lg k$ от $1/T$ при использовании окислителя - HNO_3

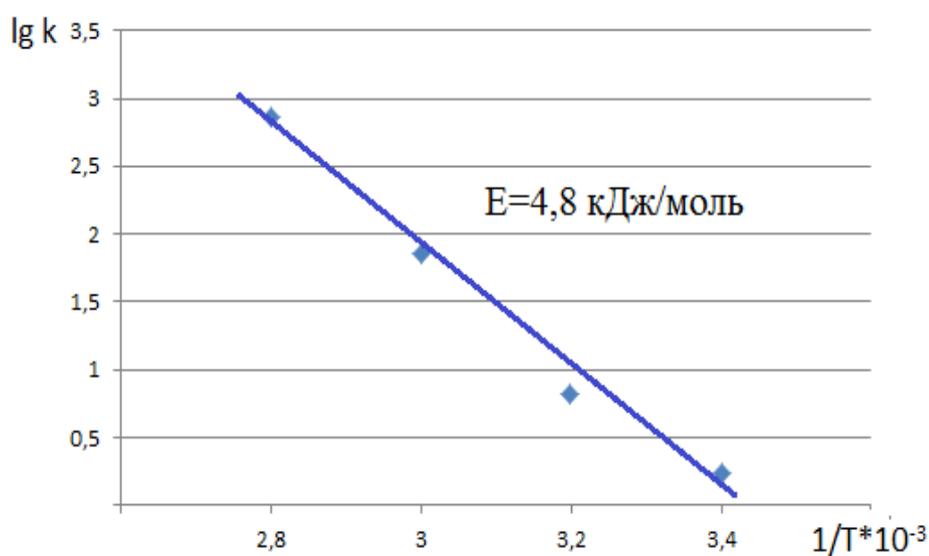


Рисунок 3.24 - Влияние температуры на кинетику выщелачивания урана: зависимость $\lg k$ от $1/T$ при использовании окислителя MnO_2

Таким образом, проведённое исследование предоставило детальный анализ процесса сернокислотного выщелачивания урансодержащих руд месторождения «Центральный Таджикистан», а также механизмов, влияющих на эффективность извлечения урана. Определённые кинетические параметры

позволили оптимизировать технологический процесс, выделив наиболее результативные условия его проведения.

Обобщённые сведения, демонстрирующие взаимосвязь степени извлечения урана и ключевых технологических факторов, представлены в таблицах 3.9 и 3.10, обеспечивая систематизированный подход к анализу процесса.

Таблица 3.8 - Влияние температуры и содержания окислителей на кинетические и энергетические характеристики выщелачивания руды "Центральный Таджикистан" (при постоянных параметрах: $H_2SO_4 = 150$ кг/т, $\tau = 4$ ч, Т: Ж = 1:2)

Температура выщелачивания (К)	Скорость выщелачивания (мг/ч)	Энергия активации (кДж/моль)
Содержание окислителя H_2O_2 – 50 л/тонну		
293	110	2.5
313	160	
333	220	
353	230	
Содержание окислителя HNO_3 – 50 л/тонну		
293	50	5.7
313	100	
333	190	
353	220	
Содержание окислителя MnO_2 – 50 кг/тонну		
293	60	4.8
313	100	
333	190	
353	200	

Таблица 3.9 - Влияние температуры, содержания кислоты, вида и расхода окислителей на извлечение урана (постоянные величины: отношение твёрдых и жидких компонентов равно 1:2, $\tau=4$ ч)

№	Расход окислителя (содержание H_2SO_4) = 150 кг/тонну)		Содержание количества H_2SO_4				Температура (содержание H_2SO_4) = 150 кг/тонну)			
			H_2SO_4 , кг/т	25% H_2O_2 , 50 л/т	63% HNO_3 , 50 л/т	65% MnO_2 , 50 кг/т	Т, °С	25% H_2O_2 , 50 л/т	63% HNO_3 , 50 л/т	65% MnO_2 , 50 кг/т
	25% H_2O_2 , л/т	Извлече- ние U , %	Извлечение U , %				Извлечение U , %			
1	10	78.51	50	81.55	63.45	74.60	20	80.63	36.7	45.5
2	20	91.48	100	88.51	67.83	86.76	30	87.22	43.6	58.4
3	30	92.07	150	95.57	86.30	91.50	40	93.81	47.3	63.8
4	40	94.59	200	95.96	85.70	90.30	50	94.33	55.4	77.9
5	50	95.55	250	97.40	85.8	91.40	60	95.55	86.3	91.5
6	60	93.11	300	92.30	83.25	89.34	70	96.70	87.0	91.7
7			400	91.11	79.34	83.70	80	97.00	87.4	92.0

Таблица 3.10 - Влияние длительности выщелачивания и уровней pH на извлечение урана (постоянные величины: температура 60°C, Т:Ж = 1:2, содержание H_2SO_4) = 150 кг/тонну)

№	Влияние времени (τ)			Влияние pH				
	τ (час)	25% H_2O_2 , 50 л/т	63% HNO_3 , 50 л/т	65% MnO_2 , 50 кг/т	pH	25% H_2O_2 , 50 л/т	63% HNO_3 , 50 л/т	65% MnO_2 , 50 кг/т
		Извлечение U , %				Извлечение U , %		
1	1	82.84	50.2	59.3	2.25	81.55	63.45	74.6
2	2	84.03	77.0	71.0	1.7	88.51	67.83	86.8
3	3	94.07	81.8	84.2	1.2	95.57	86.3	91.5
4	4	95.55	86.3	91.6	1.0	95.96	85.7	90.3
5	5	93.70	87.0	91.9	0.9	97.40	85.8	91.4
6	6	92.00	87.4	92.0	0.8	92.30	83.25	89.4
7					0.6	91.11	79.34	83.7

На основе полученных экспериментальных данных была разработана схема-технология выщелачивания ураносодержащей руды месторождения "Центральный Таджикистан" сернокислотным методом (рисунок 3.25). Данная схема-технология включает ключевые стадии, оптимизированные для эффективного извлечения урана, учитывает кинетические характеристики и параметры, определённые в ходе исследования.

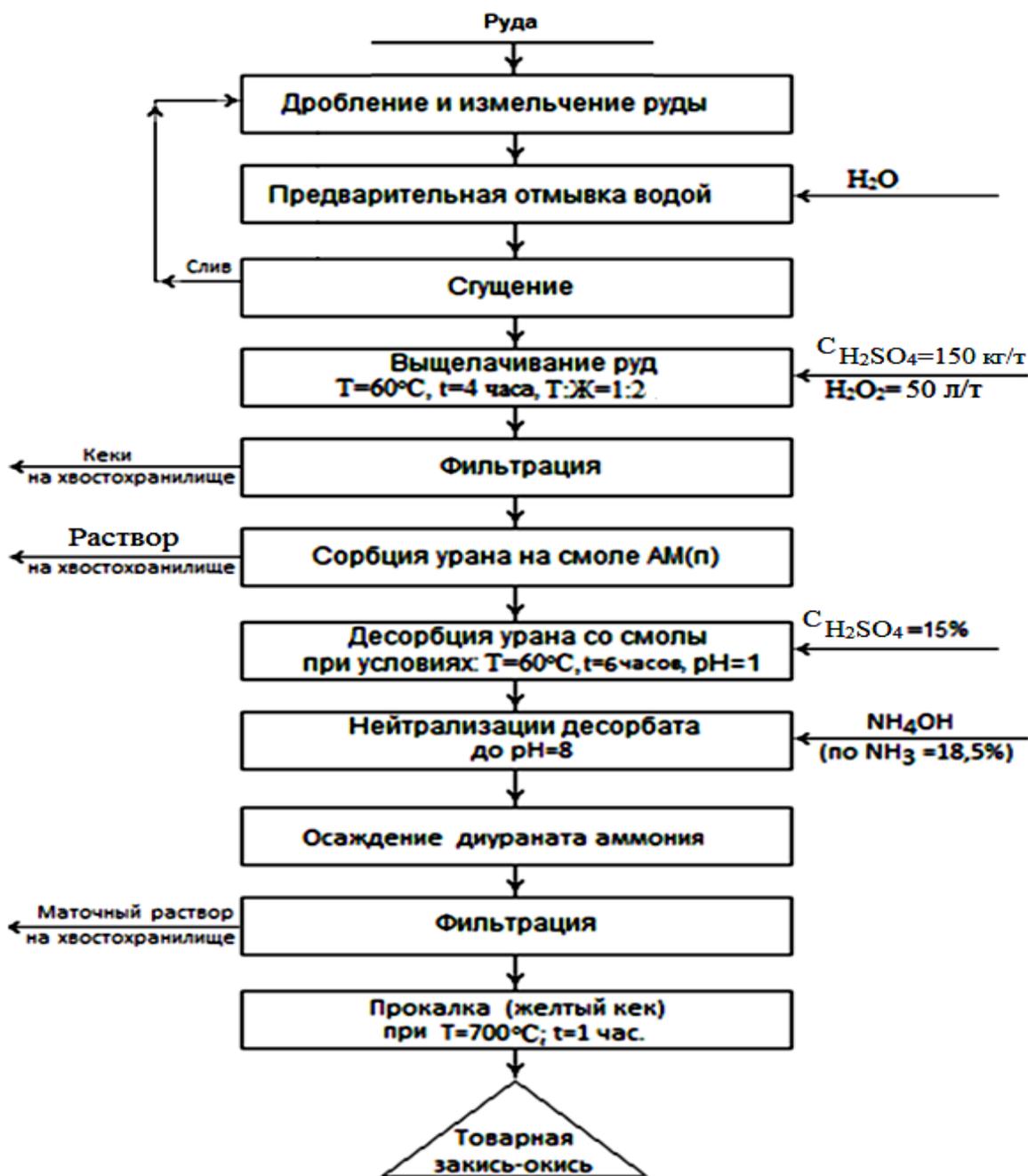


Рисунок 3.25 – Схема-технология выщелачивания ураносодержащей руды месторождения "Центральный Таджикистан" серной кислотой

Процесс обработки урановой руды включает несколько последовательных этапов, обеспечивающих максимальную степень извлечения полезного компонента: подготовка исходного материала – механическое измельчение руды с целью повышения доступности урана и облегчения последующих операций; выщелачивание – разложение рудного вещества с использованием химических реагентов, перевод урана в растворимую форму; концентрирование – связывание урановых соединений с сорбентами для последующего выделения; освобождение сорбированных соединений – процесс десорбции, обеспечивающий дальнейшую очистку урана; финальная обработка – термическое воздействие на материал, завершающее цикл его переработки и повышающее чистоту полученного продукта.

3.3. Физико-химические основы переработки урансодержащей руды месторождения "Западный Таджикистан"

Анализ физико-химических свойств руд, добываемых на различных месторождениях республики, включая месторождение "Западный Таджикистан", имеет значительную научную ценность [211]. Для руды данного месторождения определялся химический состав посредством различных аналитических методов и представлен в таблице 2.12, а радионуклидный профиль отражён в таблице 2.13.

Учитывая силикатную природу руды, для процесса выщелачивания использовали серноокислотный метод с введением в процесс окислителя, окислителем в данном исследовании была использована HNO_3 .

В ходе экспериментов по оценке эффективности извлечения урана методом кислотного выщелачивания образцы предварительно подвергались механическому измельчению в лабораторной шаровой мельнице, достигая размерности частиц 0.1–0.16 мм. На следующем этапе осуществлялась химическая обработка измельчённого материала с применением серной кислоты, позволяя активизировать процесс выщелачивания и обеспечить высокую степень извле-

чения урана. Полученные экспериментальные данные были тщательно проанализированы и систематизированы в таблицах 3.11–3.13, а графическое представление динамики процесса отображено на рисунках 3.26–3.28.

Как следует из рисунка 3.26, при температуре 80°C и продолжительности сернокислотной обработки 1 час при соотношении твёрдого и жидкого компонентов Т:Ж=1:2 оптимальная концентрация H_2SO_4 составляет 30%. В данных условиях процентное извлечение урана достигает 88,2 процента.

Анализ данных, представленных на рисунках 3.27 и 3.28, а также в таблицах 3.12 и 3.13, показал, что оптимальные условия процесса достигаются при 80°C и времени реакции 1 час, что обеспечивает максимальную степень извлечения урана – 88,01%. Соответственно, данные, представленные на рисунках 3.27 и 3.28 и систематизированные в таблицах 3.12 и 3.13, демонстрируют влияние термодинамических параметров на процесс выщелачивания. Было установлено, что дальнейшее увеличение температуры или продолжительности обработки не приводит к существенному росту извлечения, а может лишь увеличить расход реагентов.

Таблица 3.11 – Роль концентрации H_2SO_4 в процессе сернокислотного извлечения урана из рудного сырья

$C_{H_2SO_4}$, %	Т:Ж	V_{HNO_3} , мл	τ , час	Т, °С	Извлечение U, %
10	1:2	1	1	80	70,86
20	1:2	1	1	80	77,24
30	1:2	1	1	80	88,17
40	1:2	1	1	80	81,14
50	1:2	1	1	80	74,10
60	1:2	1	1	80	72,21
70	1:2	1	1	80	70,85
80	1:2	1	1	80	69,25

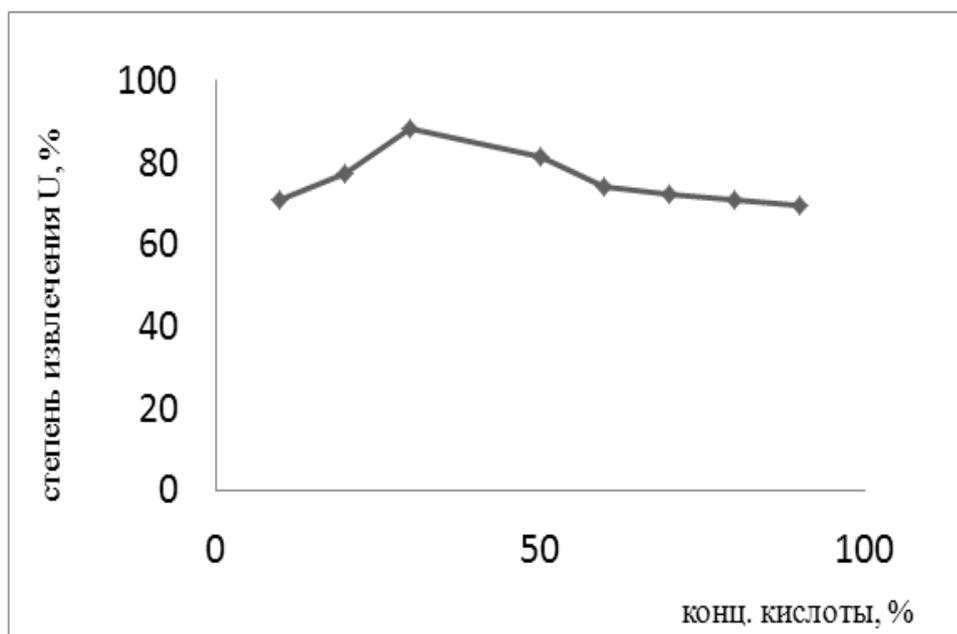


Рисунок 3.26 - Зависимость извлечения урана от расхода H_2SO_4 при $t = 80^\circ C, \tau = 1 \text{ ч}, T:Ж = 1:2$

Таблица 3.12 - Роль температуры в процессе сернокислотного извлечения урана из рудного сырья

$C_{H_2SO_4},$ %	T:Ж	$V_{HNO_3},$ мл	$\tau,$ час	T, °C	Извлечение U, %
30	1:2	1	1	20	54.1
—«—	—«—	—«—	—«—	30	63.8
—«—	—«—	—«—	—«—	40	63.9
—«—	—«—	—«—	—«—	50	68.7
—«—	—«—	—«—	—«—	60	77.9
—«—	—«—	—«—	—«—	70	83.0
—«—	—«—	—«—	—«—	80	88.2
—«—	—«—	—«—	—«—	90	88.1

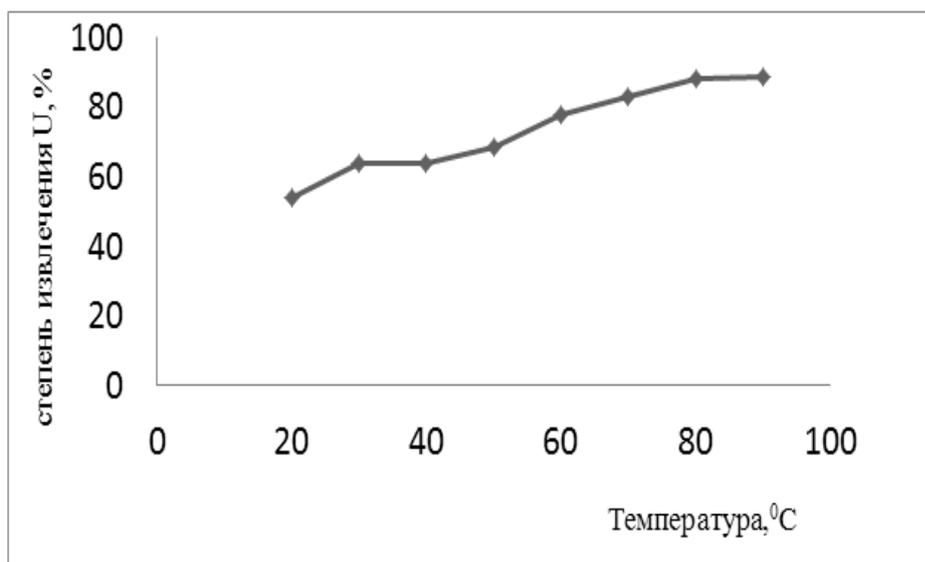


Рисунок 3.27 - Роль температуры в процессе сернокислотного извлечения урана из рудного сырья

Таблица 3.13 - Влияние длительности сернокислотного выщелачивания на извлечение урана из руды

$C_{H_2SO_4}$, %	Т: Ж	V_{HNO_3} , мл	τ , час	Т, °C	Извлечение U, %
30	1:2	1	0,5	80	55.5
—«—	—«—	—«—	1	—«—	88.2
—«—	—«—	—«—	1,5	—«—	88.7
—«—	—«—	—«—	2	—«—	89.3
—«—	—«—	—«—	2,5	—«—	89.9
—«—	—«—	—«—	3	—«—	89.3
—«—	—«—	—«—	3,5	—«—	89.0
—«—	—«—	—«—	4	—«—	89.1

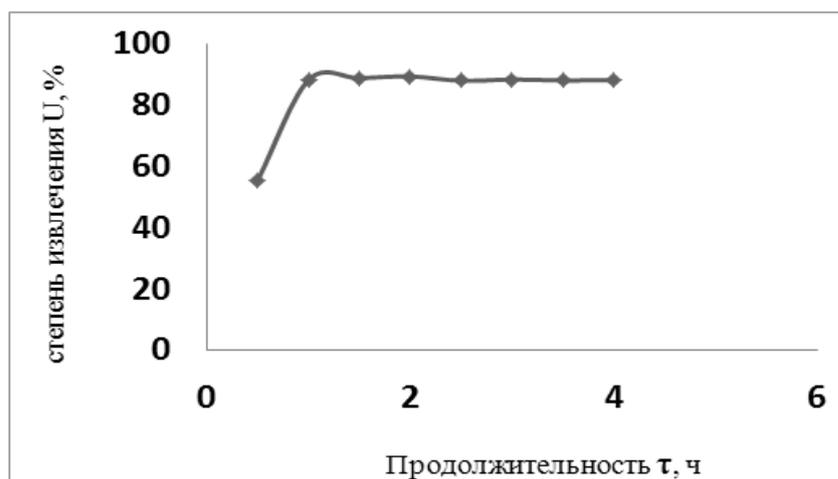


Рисунок 3.28 - Влияние длительности сернокислотного выщелачивания на извлечение урана из руды

Проведённые эксперименты подтвердили, что увеличение концентрации серной кислоты до 30% способствует повышению извлечения урана до 88,2%, благодаря усиленной реакции растворения урановых минералов. Однако дальнейшее увеличение концентрации свыше 30% приводит к снижению эффективности процесса, что связано с дефицитом воды, необходимой для полноценного взаимодействия реагентов. Повышение температуры также способствует росту извлечения урана, максимальное значение достигается при 80°C. Продолжительность процесса играет существенную роль: оптимальное время выщелачивания составляет 60 минут, что обеспечивает наилучшие результаты.

На основании проведённых исследований проведена оптимизация параметров выщелачивания урановой руды сернокислотным методом: $T=80^{\circ}\text{C}$, время взаимодействия с кислотой 1 час, концентрация H_2SO_4 – 30%. Данные условия обеспечивают высокую степень извлечения урана, достигая показателя 88,2%.

Кинетика процесса выщелачивания урановой руды изучалась в интервале температур 293-363 К при продолжительности процесса от 15 до 90 минут.

На основе полученных результатов построили кинетические кривые (рисунок 3.29). С увеличением температуры и продолжительности процесса выщелачивания степень извлечения урана из руды значительно возрастает. Максимальное извлечение наблюдается при продолжительности выщелачивания 60 мин.

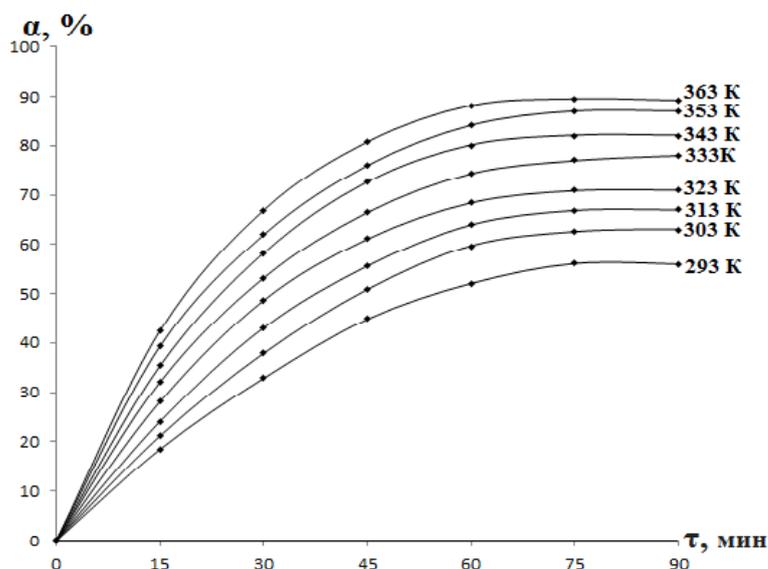


Рисунок 3.29 - Зависимость степени извлечения урана от продолжительности времени выщелачивания при различных температурах

Построен график зависимости степени извлечения урана от $\lg 1/1-\alpha$ и времени (рисунок 3.30).

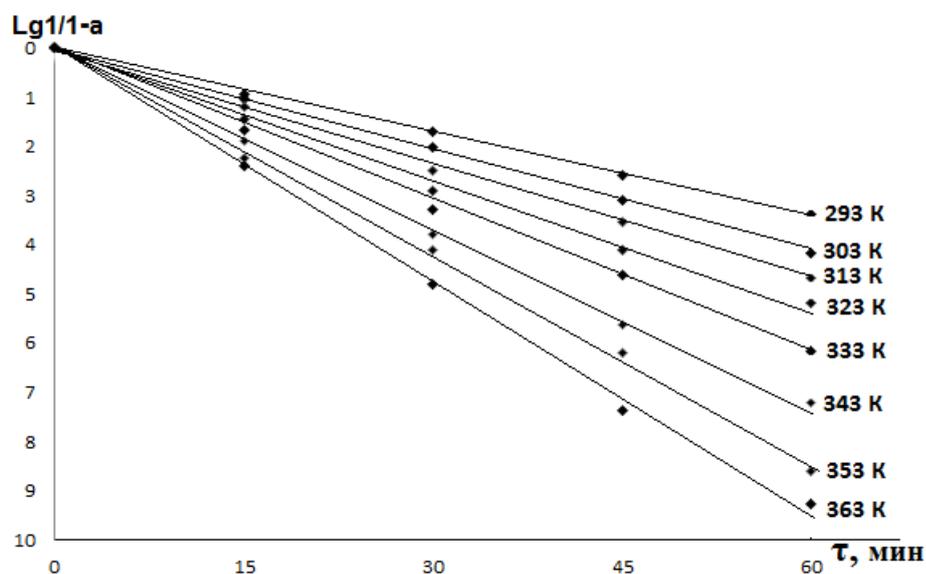


Рисунок 3.30 - Зависимость степени извлечения урана от $\lg 1/1-\alpha$ и времени

На графике зависимости $\lg 1/1-\alpha$ от времени (рисунок 3.30) полученные прямые имеют отрицательный наклон, равный $K/2/303$. Величину кажущейся энергии активации (E) и пред экспоненциальный множитель (K_0) определяли графическим методом с использованием уравнения Аррениуса.

Для нахождения энергии активации и более точного определения области протекания процесса выщелачивания построили график зависимости логарифма средних значений констант скоростей реакции от обратной абсолютной температуры, он даёт прямую линию. По тангенсу угла наклона рассчитали значение энергии активации процесса (рисунок 3.31).

Как видно из рисунка 3.31, точки удовлетворительно укладываются на прямую линию, по наклону которой вычислена величина кажущейся энергии активации, равная 14,11 кДж/моль. Численное значение энергии активации и зависимость скорости реакции от температуры и продолжительности процесса выщелачивания свидетельствуют о его протекании в диффузионной области. Проведённые исследования и вычисленные значения кинетических характеристик дают возможность выбора рационального режима осуществления процесса выщелачивания.

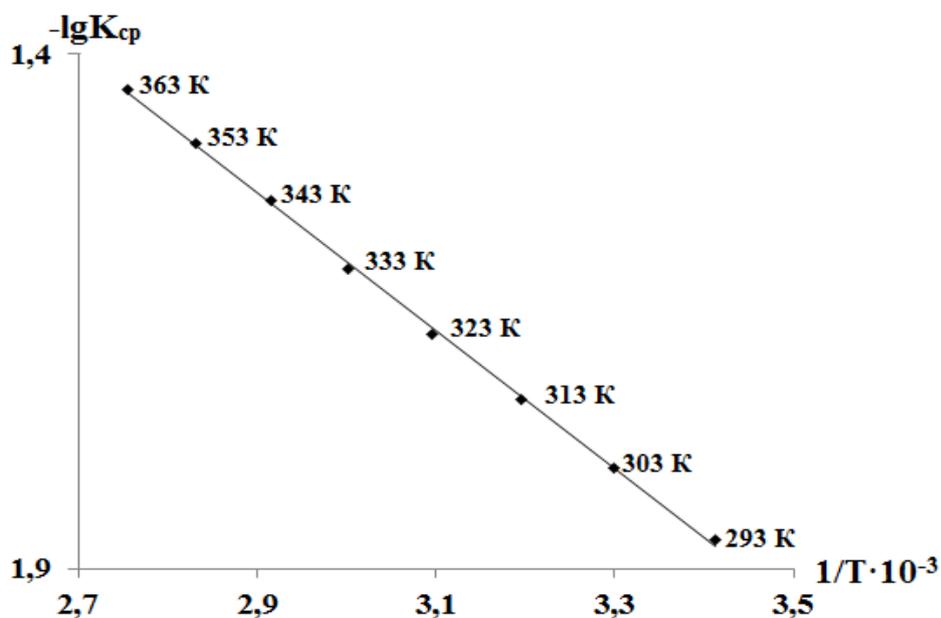


Рисунок 3.31 - Зависимость $\lg K$ от обратной абсолютной температуры

На основе полученных экспериментальных данных была разработана схема-технология выщелачивания ураносодержащей руды месторождения "Западный Таджикистан" сернокислотным методом (рисунок 3.32). Данная схема-технология включает ключевые стадии, оптимизированные для эффективного извлечения урана. В процессе учтены кинетические особенности реакции и оптимизированные параметры, полученные в ходе исследований.

Процесс включает несколько последовательных этапов. Предварительная обработка сырья включает механическое измельчение и подготовку руды к химической обработке. Разложение компонентов осуществляется посредством воздействия химических реагентов, включая серную кислоту, что способствует высвобождению урана. Очистка полученных растворов необходима для удаления примесей и стабилизации состава перед последующей сорбцией. Адсорбция урана проводится с применением модифицированного углеродного сорбента, обеспечивающего эффективное извлечение целевого компонента. Термическая обработка насыщенного сорбента способствует выделению урана, после чего проводится растворение оставшихся веществ для повышения эффективности процесса. Дополнительная фильтрация используется для удаления нежелательных компонентов и подготовки раствора к осаждению. Осаждение целевого соединения обеспечивает формирование конечного продукта с высокой концентрацией урана. Дальнейшая сушка применяется для удаления влаги из осажённого вещества, а заключительная прокалка проводится при высокой температуре для получения стабильного продукта U_3O_8 [222].

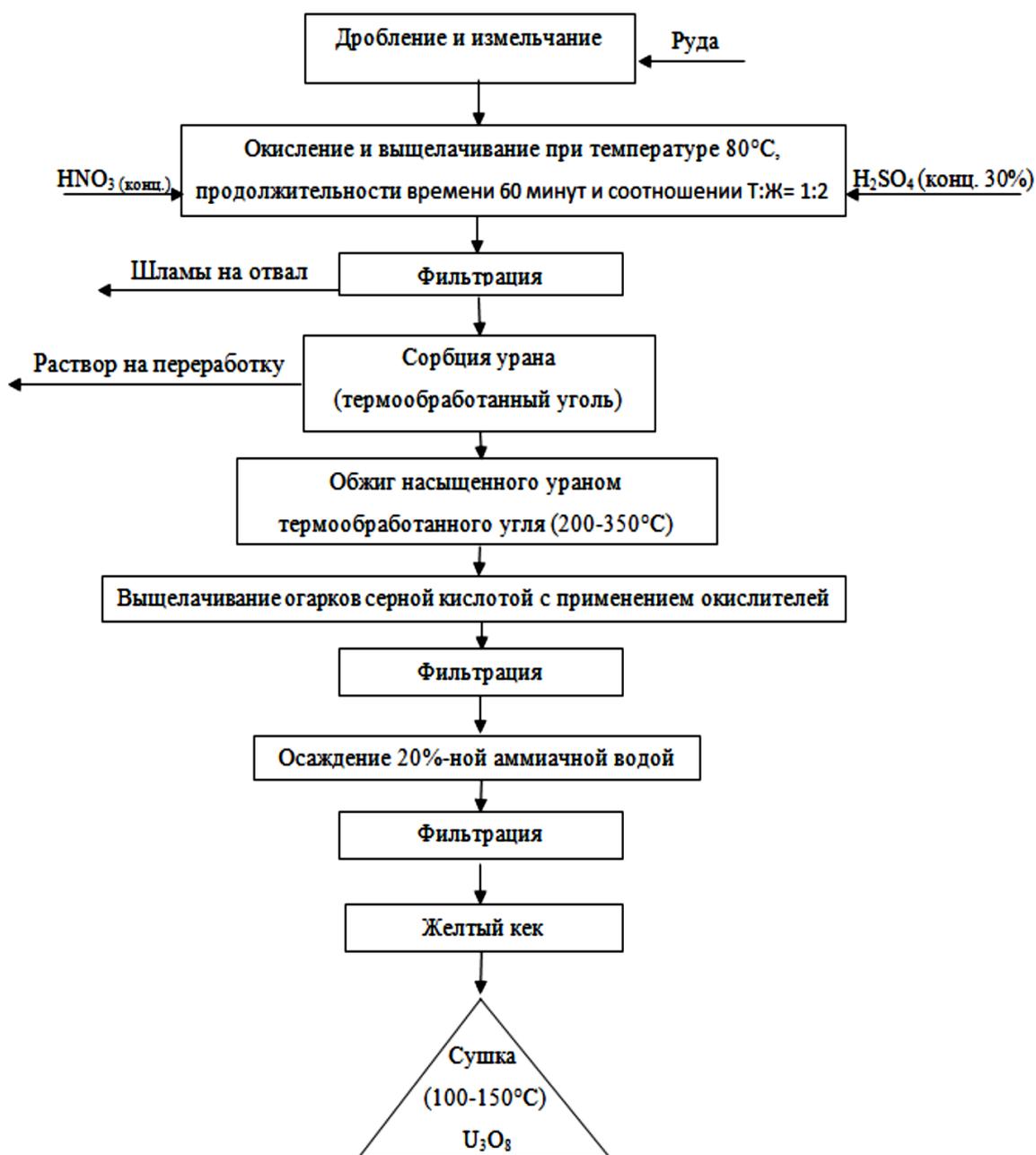


Рисунок 3.32 – Методика гидрометаллургической обработки ураносодержащих руд месторождения "Западный Таджикистан" с использованием сернокислотного реагента [222]

3.4. Физико-химические основы сернокислотного разложения ураносодержащей руды месторождения "Северный Таджикистан - 2"

Урановые рудные месторождения, расположенные на территории бывшей Таджикской ССР, имели стратегическое значение для развития атомной промышленности Советского Союза в послевоенный период. Они стали клю-

чевым источником радиоактивных материалов, необходимых для формирования ядерного потенциала страны. Первые работы по добыче и переработке урановых руд были организованы на промышленном объекте, известном как Комбинат № 6. Со временем он трансформировался в государственное предприятие "Таджикские редкие металлы" (ГП "Таджредмет"), продолжая свою деятельность в области переработки стратегического сырья. Именно из урановой руды, добытой на таджикских месторождениях, был произведён первый советский урановый концентрат. Гидрометаллургический завод, функционировавший в рамках данного предприятия, занимал передовые позиции в отрасли, обеспечивая до 20% всего объёма производства уранового концентрата в СССР.

Методы добычи и переработки урана разнообразны, что объясняется значительными различиями в составе ураносодержащих руд. В современных условиях технологические схемы переработки разрабатываются индивидуально для каждого уранового месторождения, с учётом его минералогических и химических характеристик. Так как состав руды может существенно варьироваться в зависимости от месторождения, при разработке технологического процесса проводится количественная оценка этих различий, что позволяет выбрать наиболее экономически эффективное сочетание технологических операций.

Перспективным направлением развития технологий извлечения уранового концентрата является сорбционная методика, обеспечивающая эффективное разделение урана из продуктивного раствора. Этот процесс включает сорбцию урана на специально разработанных сорбентах, после чего проводится десорбция, позволяющая выделить товарный концентрат с высокой степенью чистоты. Такой метод обладает высокой эффективностью и может оптимизировать процесс переработки урановых руд.

Настоящий раздел посвящён детальному анализу разложения ураносодержащих руд, добытых на месторождении "Северный Таджикистан - 2", ранее известном как "Октябрьское", методом сернокислотного выщелачивания [231].

Для проведения сравнительного анализа представлены данные о химическом составе урановых руд, характерных для различных месторождений страны, включая "Центральный Таджикистан" и "Западный Таджикистан". Их характеристики сопоставляются с аналогичными параметрами руд месторождения "Северный Таджикистан - 2", что визуализировано в диаграмме на рисунке 3.33.

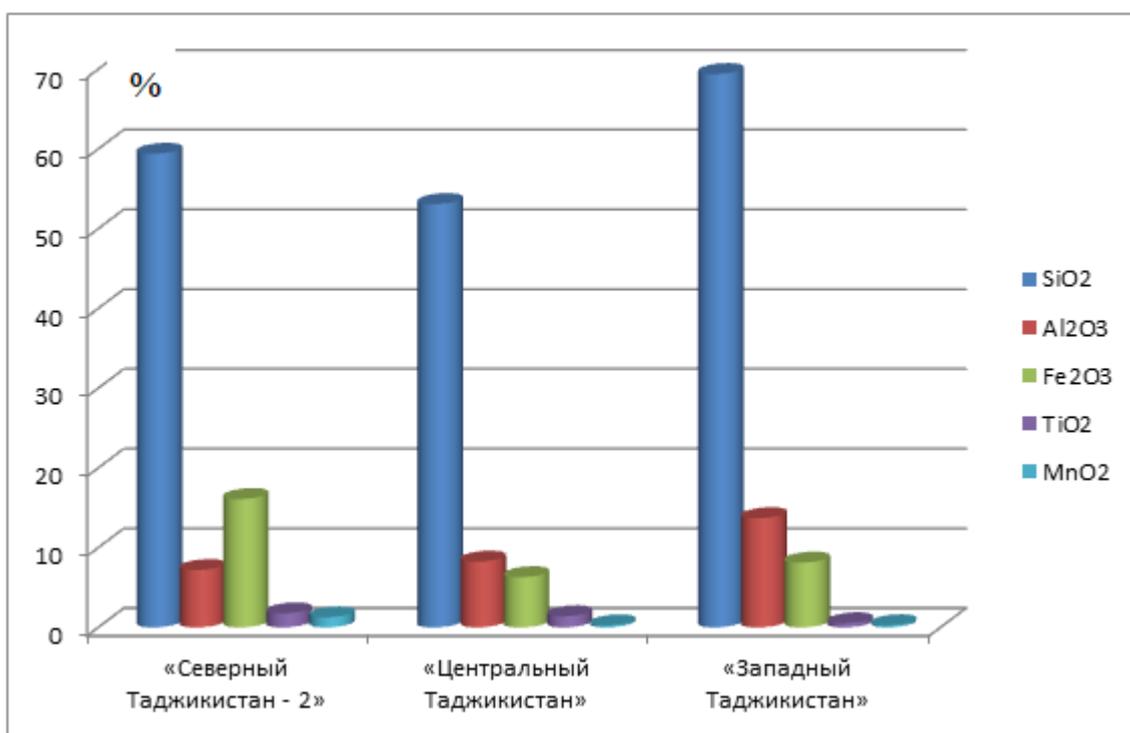


Рисунок 3.33 – Сравнение химического состава урановых руд различных месторождений Таджикистана: основные элементы и их концентрация (%)

Для образца руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" получена дифрактограмма в линейном формате. По сведениям рентгенофазового анализа (РФА), данный образец включает уранинит, ураносиликаты и уранотитанаты, известняковые породы, а также марганец- и титансодержащие со-

единения. Как демонстрируют таблица 2.17 и рисунок 3.34, большинство урановых руд, обнаруженных на территории Таджикистана, обладают силикатным составом, характеризующимся значительным содержанием SiO_2 (в пределах 53,1–69,4%). Вариация концентрации урана в исследуемых образцах, составляющая от 0,11 до 0,24%, требует тщательного подбора оптимального метода переработки.

Учитывая специфику данной руды, наиболее эффективным способом её обработки является кислотное разложение с добавлением окислителей, которые обеспечивают максимальное извлечение урана и других элементов. После завершения процесса выщелачивания рудные остатки могут пройти комплексную переработку, что позволит извлечь дополнительные ценные промышленные материалы, такие как оксиды алюминия и оксиды железа. Это не только повышает экономическую эффективность процесса, но и способствует рациональному использованию сырья, минимизируя отходы и расширяя спектр полезных компонентов, получаемых из ураносодержащих руд.

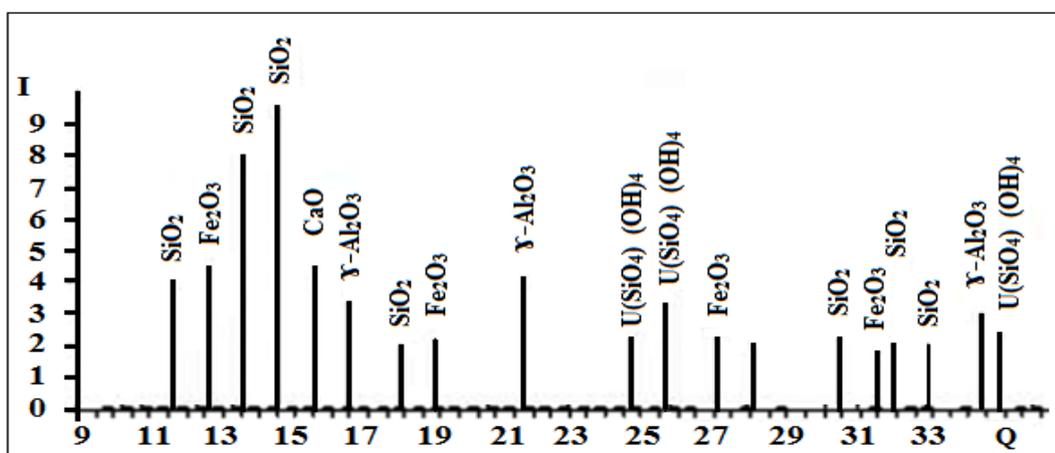


Рисунок 3.34 - Рентгенодифрактометрическое исследование образца руды "Северный Таджикистан-2": структурный анализ и фазовый состав

В данном исследовании проведён детальный анализ различных методов разложения ураносодержащих руд, добытых на территории республики.

с учётом результатов научных трудов других исследователей [230]. В рамках работы анализировался процесс кислотного разложения рудных по-

род с использованием серной кислоты, а также изучались основные технологические переменные, включая размер фрагментов после дробления, концентрацию реагента (H_2SO_4), длительность обработки, применение окислителей и прочие факторы.

На рисунке 3.35 представлены графические зависимости, демонстрирующие процесс выделения урана из руд различных месторождений. Исследования показывают, что уровень извлечения урана варьируется незначительно между месторождениями, в среднем достигая примерно 90 процентов. Тем не менее, образцы из месторождения "Западный Таджикистан" показывают более высокое извлечение, превышающее отметку в 90 процентов.

Рисунки 3.36–3.38 наглядно демонстрируют влияние ключевых технологических параметров – времени разложения, температурного режима и концентрации серной кислоты - на процесс извлечения урана из руд различных месторождений, находящихся на территории республики.

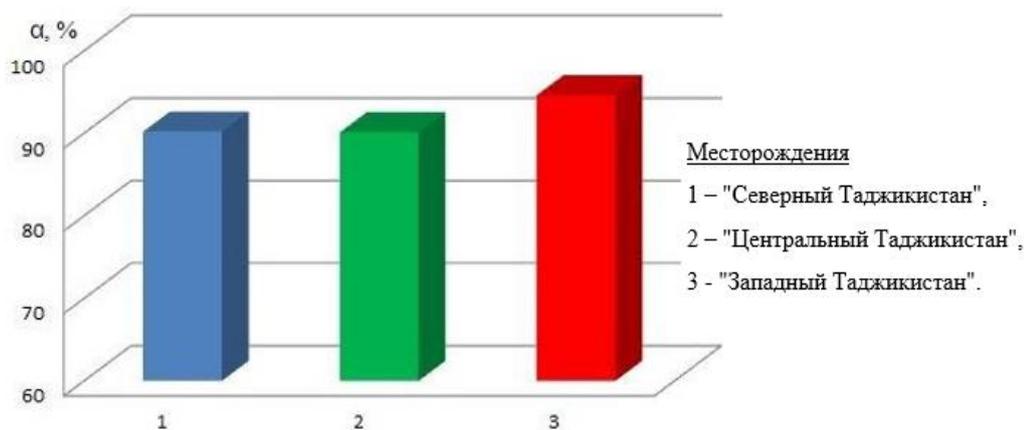


Рисунок 3.35 – Сравнительное исследование технологий извлечения урана из месторождений Таджикистана: анализ эффективности

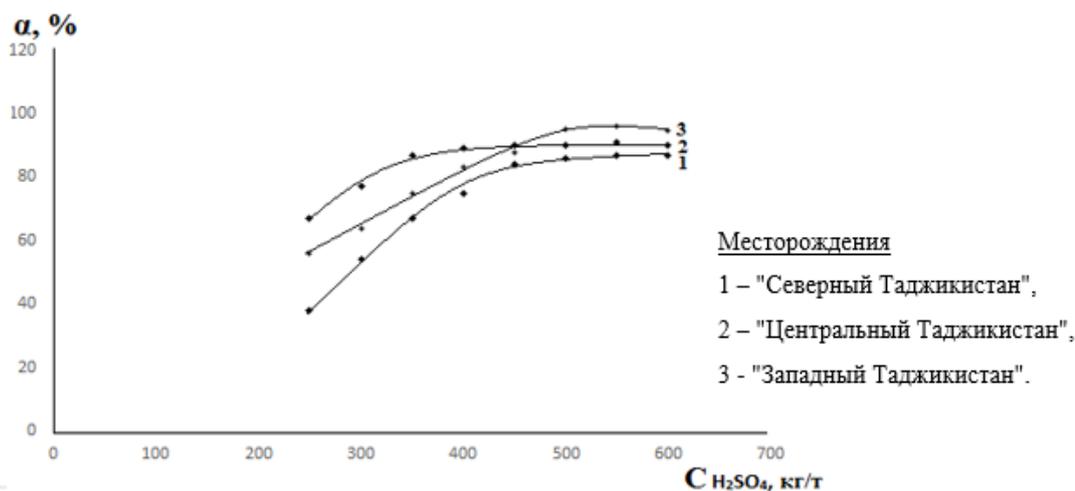


Рисунок 3.36 – Влияние сернокислотного выщелачивания (H₂SO₄) на коэффициент извлечения урана из руд месторождений Таджикистана: сравнительный анализ

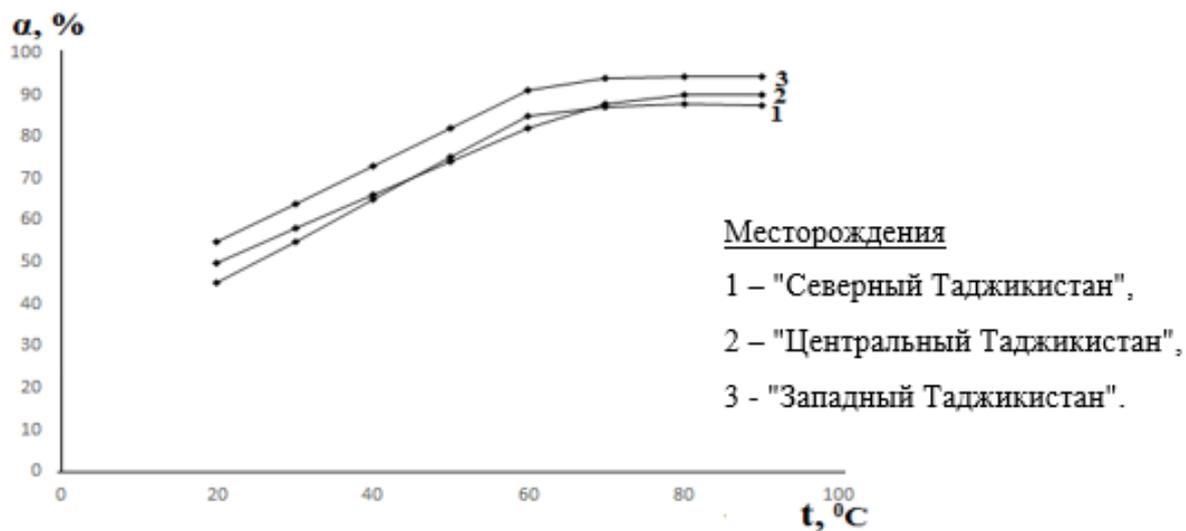


Рисунок 3.37 – Влияние изменения температуры на коэффициент извлечения урана из ураносодержащих руд Таджикистана: сравнительный анализ

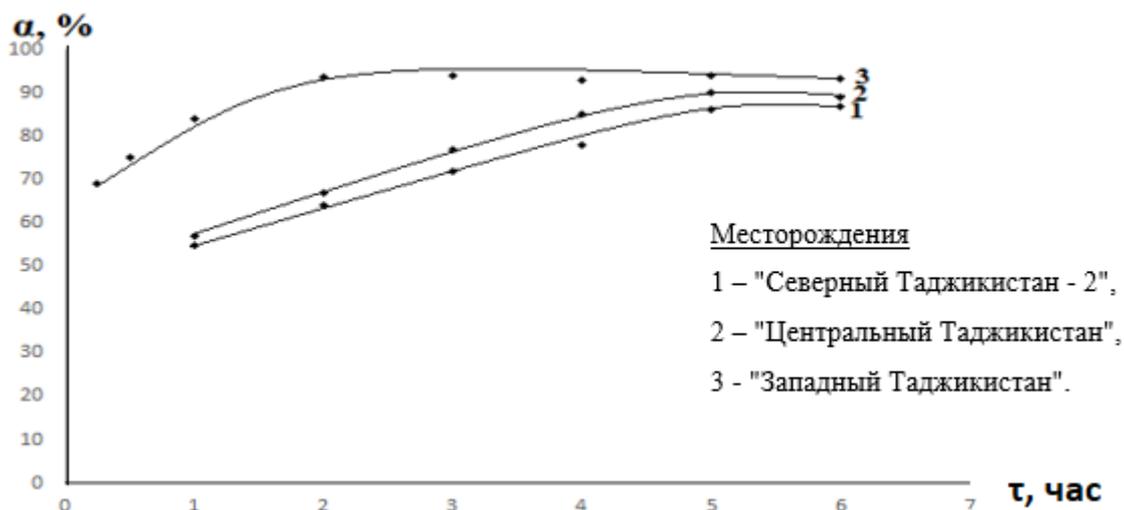


Рисунок 3.38 - Влияние времени сернокислотной обработки на степень извлечения урана из руд месторождений Таджикистана: сравнительный анализ

Анализ графических данных демонстрирует схожесть формы кривых для всех изучаемых месторождений, что указывает на их близкий минералогический состав. Это подтверждает, что урановые руды, добываемые в Таджикистане, обладают аналогичными физико-химическими характеристиками.

В данном разделе проводится детальное исследование физических и химических свойств ураносодержащих руд, добываемых в различных регионах, с учетом ключевых параметров, таких как температурные условия, длительность разложения, концентрация серной кислоты и другие факторы. Проведённый сравнительный анализ подтверждает, что уровень извлечения урана из этих руд достигает 90 процентов, независимо от месторождения.

3.4.1. Кинетика сернокислотного разложения ураносодержащей руды месторождения "Северный Таджикистан - 2"

В рамках исследования разработана усовершенствованная технологическая схема переработки данного вида сырья, основанная на лабораторных испытаниях, что позволило определить оптимальные параметры процесса и повысить его эффективность [231].

Минералогические свойства изученной руды соответствуют характеристикам типичных урановых месторождений республики. Проведённый рентгенофазовый анализ (РФА) выявил присутствие в образцах таких минералов, как кварц, уранофан, каолинит, сфен, альбит, уранинит и пирит.

Минералогический анализ показал, что основными носителями урана в данной руде являются уранофан и уранинит. При этом уран присутствует в минералах в двух различных валентных состояниях - четырёх- и шестивалентном, что открывает возможность применять как кислотное, так и карбонатное выщелачивание для его извлечения. Однако высокое содержание кварца в породе оказывает значительное влияние на выбор технологии, делая кислотное разложение более предпочтительным. Это связано с тем, что при наличии кварца карбонатный метод менее эффективен, а кислотное выщелачивание обеспечивает более высокий коэффициент извлечения. Применение серной кислоты в процессе извлечения урана способствует увеличению его выхода, а также является экономически выгодным, поскольку стоимость серной кислоты ниже по сравнению с карбонатными реагентами. Таким образом, использование кислотного метода не только повышает степень извлечения урана, но и оптимизирует затраты на химическую обработку руды.

Рисунок 3.39 представляет экспериментальные результаты, отражающие зависимость степени извлечения урана от концентрации серной кислоты при обработке руды, добытой на месторождении "Северный Таджикистан - 2". В данном исследовании параметры технологического процесса оставались неизменными: температура реакции поддерживалась на уровне 60°C, продолжительность обработки составляла 60 минут, а соотношение твёрдой и жидкой фаз оставалось стабильным – 1:2.

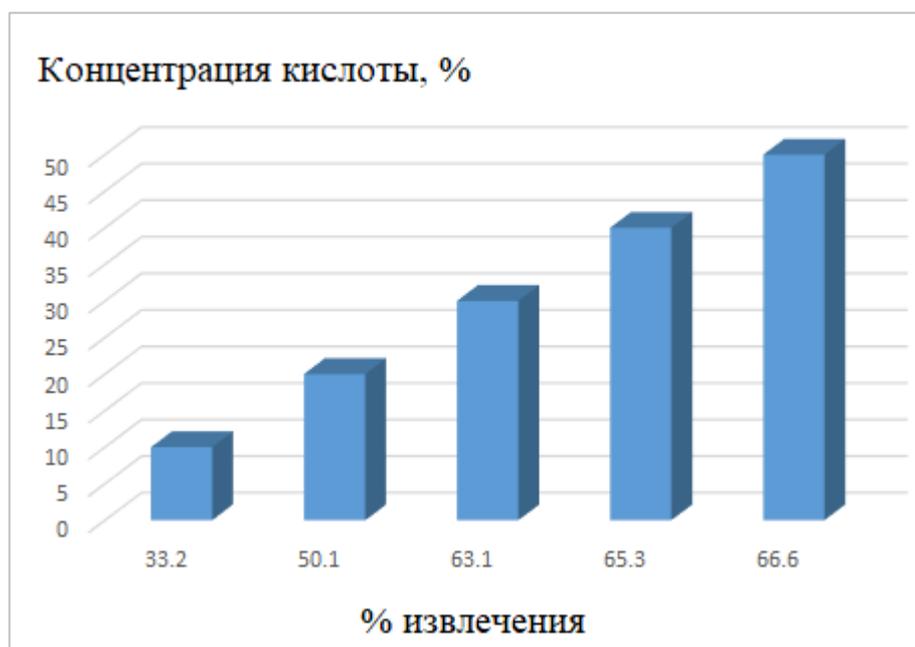


Рисунок 3.39 – Зависимость извлечения урана от концентрации H_2SO_4 при переработке руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" ($t=60^{\circ}C$, $\tau=60$ мин, Т:Ж=1:2)

Анализ процесса кислотного разложения ураносодержащей руды продемонстрировал, что применение 30%-ного раствора H_2SO_4 обеспечивает максимальный уровень извлечения уранового концентрата. При дальнейшем повышении концентрации кислоты выше 30% значительных изменений в эффективности выделения урана не наблюдается, что свидетельствует о достижении предельного значения растворимости.

Таким образом, для обеспечения оптимального извлечения урана рекомендовано использовать 30%-ный раствор серной кислоты с добавлением азотной кислоты в технологический процесс. При этом продолжительность разложения руды составляет 60 минут. Соблюдение данных параметров позволяет достичь коэффициента извлечения урана на уровне 66,6%, что подтверждает эффективность выбранной методики.

Рисунок 3.40 содержит экспериментальные данные, демонстрирующие влияние температурного режима на процесс извлечения урана при фиксированных технологических параметрах: продолжительности разложения 60 минут, концентрации серной кислоты (H_2SO_4) 30% и соотношении твёрдой и

жидкой фаз (Т:Ж) 1:2.

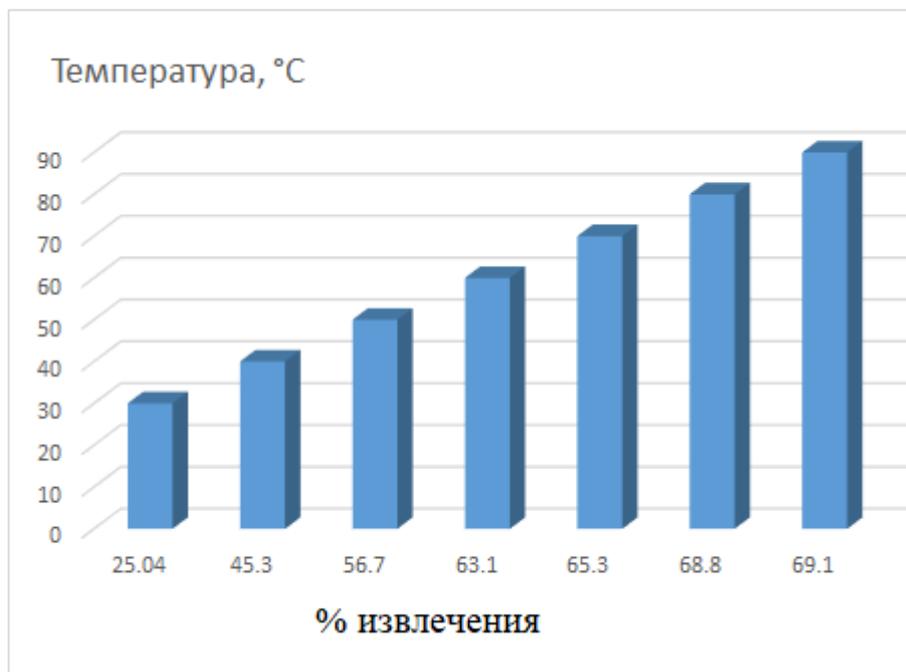


Рисунок 3.40 – Температурный фактор в сернокислотном извлечении урана из руды месторождения "Северный Таджикистан - 2": анализ зависимости ($C_{H_2SO_4} = 30\%$, $\tau=60$ мин, Т:Ж=1:2)

Анализ результатов показывает, что повышение температуры благоприятно сказывается на коэффициенте извлечения урана. В диапазоне 60–80°C наблюдается его рост до значений 63–69%, что свидетельствует о повышенной реакционной способности компонентов при данных условиях. Однако дальнейшее увеличение температуры не приводит к значительным изменениям эффективности процесса, что указывает на достижение предельного уровня растворимости урана в данных условиях обработки.

В данном исследовании была проведена детальная оценка влияния продолжительности разложения на процесс извлечения урана при фиксированных технологических параметрах - температуре 80°C, концентрации H_2SO_4 30% и соотношении Т:Ж=1:2 (рисунок 3.41).

Результаты эксперимента показывают, что при 90-минутной обработке достигается максимальный уровень извлечения урана, составляющий 75,5%.

Однако дальнейшее увеличение времени эксперимента не приводит к существенному росту эффективности процесса, что свидетельствует о достижении предельного уровня растворения урановых соединений.

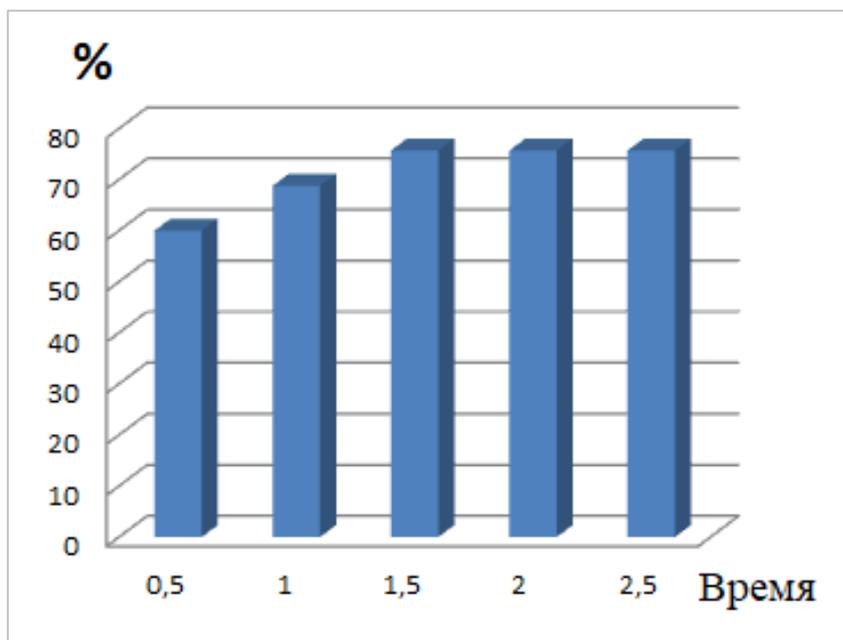


Рисунок 3.41 – Зависимость извлечения урана от длительности разложения при переработке руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" ($C_{H_2SO_4} = 30\%$, $t=80^\circ C$, $T:Ж=1:2$)

Исследование кинетических параметров разложения урановой руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" в изотермических условиях позволило определить наиболее эффективные технологические параметры серно-кислотного выщелачивания: температурный диапазон от 303 до 353 К, оптимальная концентрация H_2SO_4 30%. Согласно данным таблицы 3.14, максимальный коэффициент извлечения урана достигается при температуре $80^\circ C$ и длительности разложения 1,5 часа, составляя 75,7%.

На основе данных таблицы 3.14 был построен график (рисунок 3.42), который отображает динамику извлечения урана в зависимости от температуры и длительности процесса разложения. Анализ графика показывает, что повышение температуры от 303 до 353 К и продлении времени разложения от 30 мин (0.5 ч) до 150 мин (2.5 ч) процент извлечения урана постепенно возрас-

тает. Однако после 150 мин показатель стабилизируется, и дальнейшее увеличение длительности обработки не оказывает значительного влияния на эффективность процесса.

Таблица 3.14 – Кинетические аспекты процесса извлечения урана из руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" при $C_{H_2SO_4} = 30\%$

Температура	Длительность разложения, мин				
	30	60	90	120	150
303 K	18.6	25.4	44.5	44.5	44.5
313 K	25.7	45.3	55.7	55.7	55.7
323 K	37.6	56.7	63.1	63.1	63.1
333 K	44.5	63.1	65.3	65.3	65.3
343 K	55.7	65.3	66.8	66.8	66.8
353 K	60.0	68.8	75.7	75.7	75.7

Графический анализ, представленный на рисунке 3.43, отражает закономерность между логарифмом скорости реакции ($\lg K$) и обратной абсолютной температурой ($1/T$) в процессе разложения руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" сернокислотным методом.

Экспериментальные точки демонстрируют хорошую согласованность с линейной зависимостью, что позволило вычислить энергию активации, составляющую 15,37 кДж/моль. Проведённый анализ влияния температуры и продолжительности разложения на скорость химической реакции подтвердил, что процесс протекает в условиях, подчиняющихся диффузионным закономерностям.

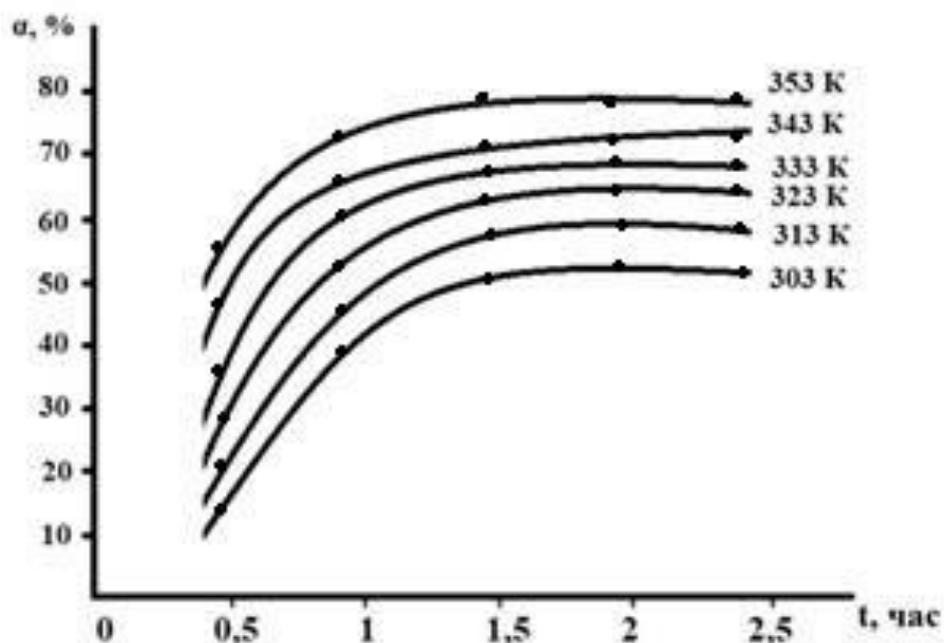


Рисунок 3.42 – Взаимосвязь температуры и продолжительности сернокислотного разложения руды месторождения "Северный Таджикистан-2": анализ кинетических кривых

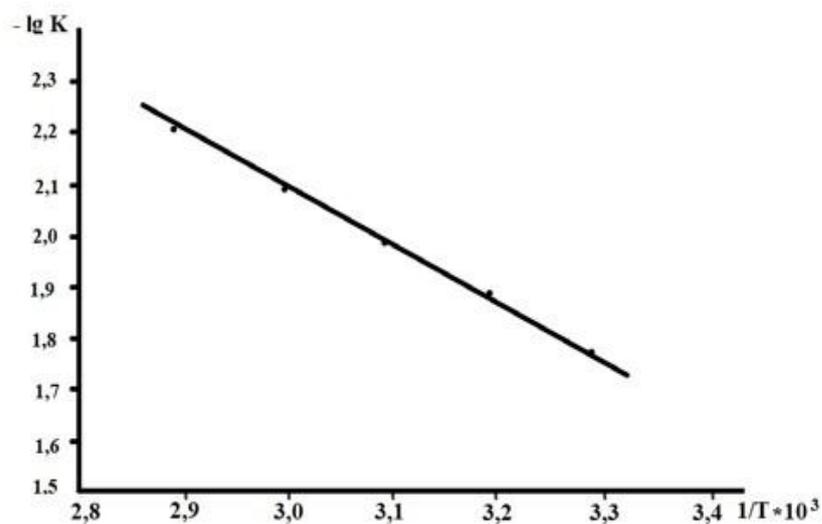


Рисунок 3.43 - Температурная зависимость скорости реакции разложения руды месторождения "Северный Таджикистан-2": логарифмический анализ константы k

В ходе проведённых исследований были подробно рассмотрены механизмы переработки ураносодержащей руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" сернокислотным методом и проведена оптимизация технологического процесса. Комплексный анализ кинетических характеристик позволил выявить ключевые факторы, влияющие на эффективность выделения урана, такие как температурный режим, продолжительность процесса и концентрация серной кислоты. Оптимальные условия извлечения включают: температуру 80°C , длительность обработки 1,5 часа, концентрацию H_2SO_4 равную 30% и соотношение твёрдых и жидких компонентов (Т:Ж) 1:2. Данные параметры обеспечивают максимальный уровень выделения урана, составляющий в процентном соотношении 75,7 процентов.

Исследования подтвердили, что процесс разложения ураносодержащей руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" сернокислотным методом проходит в изотермических условиях. Для детального изучения механизма были построены кинетические кривые, демонстрирующие зависимость параметров процесса разложения от температурного режима, длительности обработки и концентрации кислоты. В ходе экспериментов были исследованы различные технологические условия: температурный диапазон от 303 до 353 К, продолжительность реакции от 30 до 150 мин, концентрация H_2SO_4 варьировалась от 10 до 50%.

Определено значение энергии активации процесса, составляющее 15,37 кДж/моль. Анализ влияния температуры и времени процесса на скорость разложения показал, что процесс протекает в условиях, подчиняющихся кинетическим закономерностям.

По результатам проведённых исследований была разработана схема-технология по извлечению урана из руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" (рисунок 3.44), учитывающая основные принципы сернокислотного разложения.

Полученные кинетические характеристики позволили детально исследовать механизмы протекания процесса и оптимизировать параметры технологического процесса. Анализ этих факторов даёт возможность выбора наиболее эффективного режима обработки.

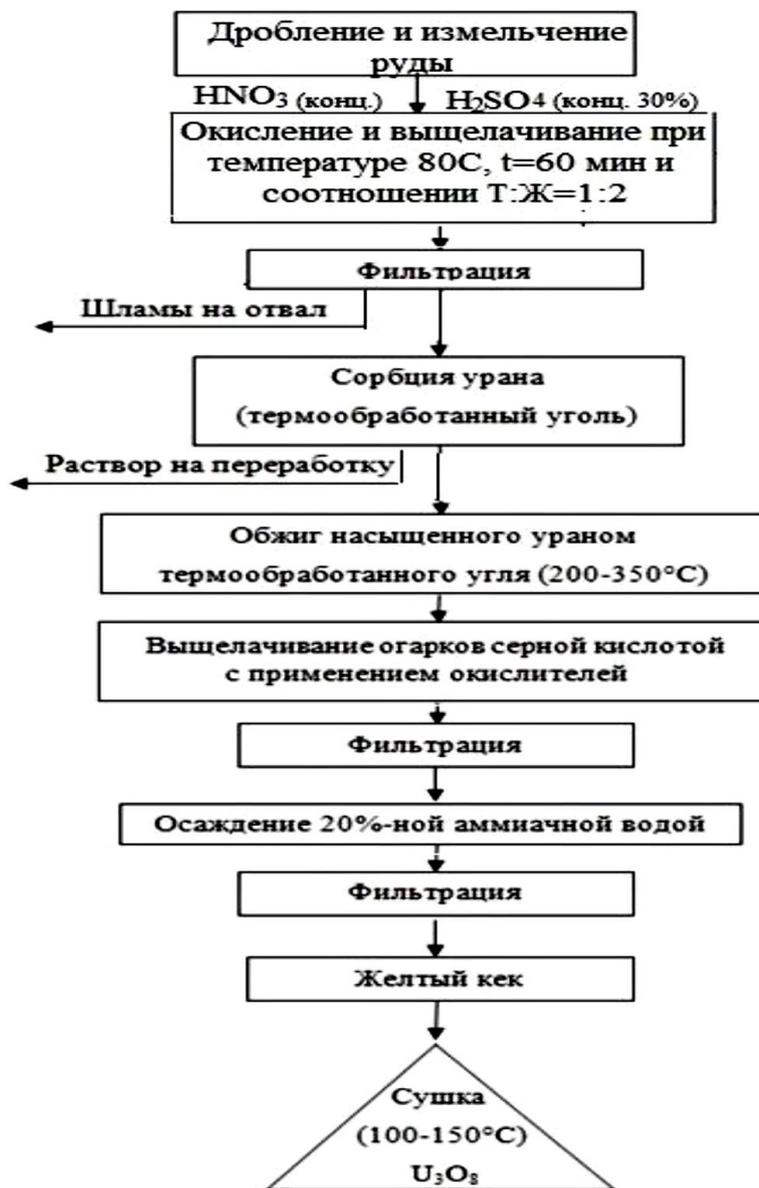


Рисунок 3.44 – Схема-технология получения урана из руды месторождения "Северный Таджикистан - 2" сернокислотным методом

3.5. Технология переработки урансодержащих руд месторождения "Восточный Памир"

Ранее в исследовании [212] проводился анализ химического и минерало-

гического состава ураносодержащей руды месторождения "Восточный Памир", выполнено термодинамическое моделирование процессов, происходящих при карбонатном выщелачивании данной руды.

Нами в рамках данного подраздела проведено углублённое изучение механизма выщелачивания руды месторождения "Восточный Памир" карбонатным методом. Основное внимание уделено анализу кинетических параметров разложения минералов, позволяющему оптимизировать условия извлечения урана [232].

Для оценки эффективности карбонатного разложения руды месторождения образцы предварительно подвергались механическому измельчению в лабораторной шаровой мельнице до крупности 0,1–0,16 мм. После этого проводилась обработка раствором карбоната натрия. В результате исследований были определены оптимальные параметры процесса, когда степень извлечения урана является максимальной. Установлены оптимизированные параметры проведения разложения руды: $T=70^{\circ}\text{C}$, время взаимодействия с карбонатом кальция 90 минут и концентрация $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 5\%$. При соблюдении указанных оптимизированных параметров извлечение урана составляет в процентном отношении 94,14 процентов.

Дополнительно изучалась кинетика разложения урановых минералов методом выщелачивания в температурном режиме 303–343 К с варьированием длительности обработки от 15 до 120 минут. Полученные данные систематизированы в таблицах 3.15 и 3.16.

Таблица 3.15 - Влияние длительности карбонатного выщелачивания на извлечение урана из руды месторождения "Восточный Памир"

$C_{\text{Na}_2\text{CO}_3},$ %	T: Ж	$\tau,$ час	T, K	Извлечение U, %
5	1:2	15	343	32,82
—«—	—«—	30	—«—	51,34

Продолжение таблицы 3.15

—« —	—« —	60	—« —	81,81
—« —	—« —	90	—« —	94,14
—« —	—« —	120	—« —	95,84

Таблица 3.16 – Влияние длительности карбонатного выщелачивания на извлечение урана из руды месторождения "Восточный Памир"

$C_{Na_2CO_3}$, %	Т: Ж	τ , час	Т, К	Извлечение U, %
5	1:2	90	303	55,4
—« —	—« —	—« —	313	63,71
—« —	—« —	—« —	323	74,35
—« —	—« —	—« —	333	85,5
—« —	—« —	—« —	343	94,14

На основе полученных результатов построили кинетические кривые (рисунок 3.45). С увеличением температуры и продолжительности процесса выщелачивания степень извлечения урана из руды значительно возрастает. Кинетические кривые имеют параболический характер. Максимальное извлечение наблюдается при продолжительности выщелачивания 90 мин. Кинетические кривые хорошо описываются уравнением первого порядка:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = K \cdot (1 - \alpha), \quad (3.11)$$

где: α – степень извлечения; τ – время, мин; K – константа скорости разложения, мин^{-1} .

После несложных математических преобразований получим выражение в виде:

$$\lg(1 - \alpha) = -\frac{K \cdot \tau}{2,303}. \quad (3.12)$$

На графике зависимости $\ln(1/1-\alpha)$ от времени (рисунок 3.46) полученные прямые имеют отрицательный наклон, равный $K/2.303$. Величину кажущейся энергии активации (E) и предэкспоненциальный множитель (K_0) определяли графическим методом с использованием уравнения Аррениуса:

$$K = K_0 \cdot e^{-E/RT}, \quad (3.13)$$

или:

$$\lg K = -\lg K_0 - \frac{E}{2,303RT}, \quad (3.14)$$

где: R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·град;

T – абсолютная температура, К.

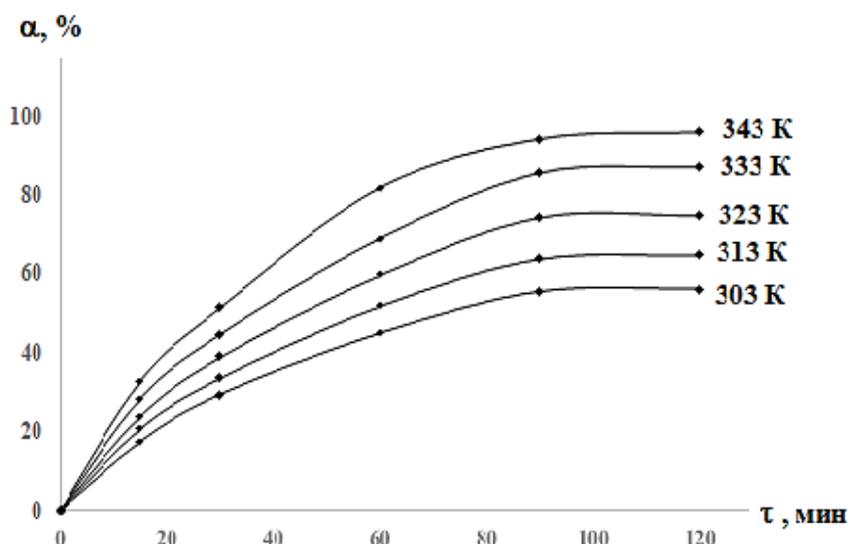


Рисунок 3.45 - Зависимость степени извлечения урана от продолжительности времени выщелачивания при различных температурах

На графике (рисунок 3.45), отражающем зависимость извлечения урана из руды от логарифмического выражения $\ln(1/(1-\alpha))$ и продолжительности разложения, наблюдается характерный нисходящий наклон линий, соответствующий значению $K/2,303$. Графический анализ полученных данных позволил определить ключевые кинетические параметры процесса, включая энергию активации (E) и предэкспоненциальный коэффициент (K_0), значения которых получены на основании уравнения Аррениуса.

Для нахождения энергии активации и более точного определения области протекания процесса выщелачивания построили график зависимости логарифма средних значений констант скоростей реакции от обратной абсолютной температуры, он дает прямую линию. По тангенсу угла наклона рассчитали значение энергии активации процесса (рисунок 3.47).

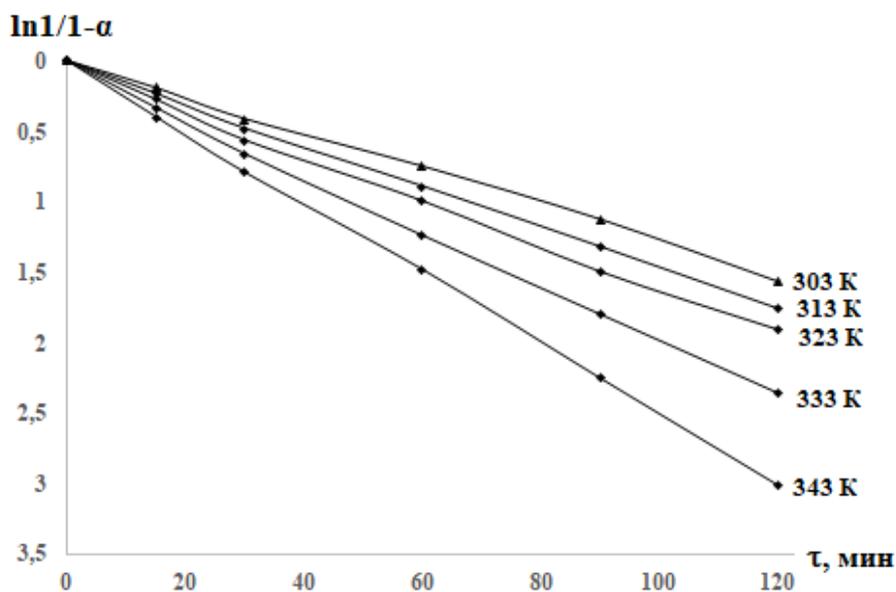


Рисунок 3.46 - Зависимость степени извлечения урана от $\ln(1/1-\alpha)$ и времени

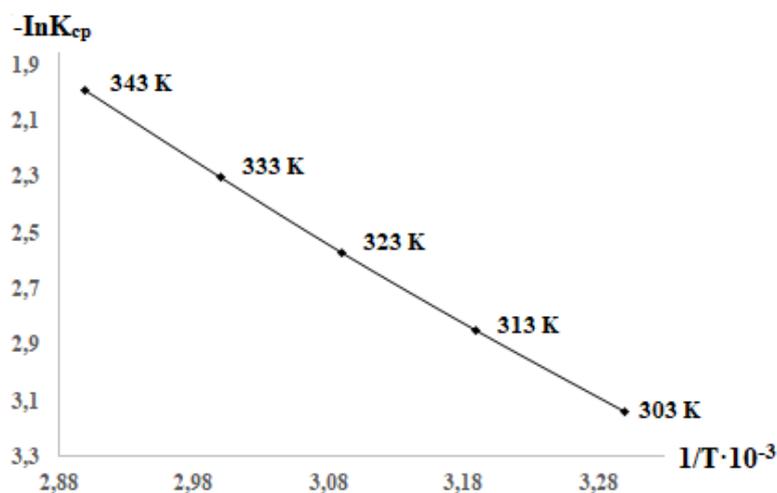


Рисунок 3.47 - Зависимость $\lg K$ от обратной абсолютной температуры

Как видно из рисунка 3.47, точки удовлетворительно укладываются на прямую линию, по наклону которой вычислена величина кажущейся энергии активации, равная 22,04 кДж/моль. Численное значение энергии активации и

зависимость скорости реакции от температуры и продолжительности процесса выщелачивания свидетельствуют о его протекании в диффузионной области.

В результате установления оптимальных условий разложения руды, расчета энергии активации и определения преобладающего механизма процесса (в данном случае подчиняющегося диффузионным закономерностям) удалось выбрать наиболее эффективный режим обработки урансодержащей руды месторождения "Восточный Памир", обеспечивающий максимальное выделение урана.

3.6. Сернокислотное выщелачивание хвостов из техногенного хвостохранилища "Карты 1-9"

Так как хвосты из техногенного хвостохранилища "Карты 1-9" в основном содержат кварц (69,4%), их подвергали кислотному выщелачиванию [68]. Результаты лабораторных исследований по степени вскрытия и переходу урана в раствор обобщены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 - Влияние расхода серной кислоты на извлечение урана при выщелачивании ($U=0,018\%$, $t=20^{\circ}\text{C}$, $\tau=10$ часов)

Соотношение Т:Ж=1:1		Соотношение Т:Ж=1:2	
расход серной кислоты, кг/т хвостов	извлечение урана в раствор, %	расход серной кислоты, кг/т хвостов	извлечение урана в раствор, %
60	3	60	4
90	20	90	25
100	31	100	37
110	37	110	42
120	39	120	43
130	41	130	48
180	53	180	60
350	55	350	61

Анализ сведений из таблицы 3.17 демонстрирует, что обработка хвостов с содержанием урана 0,008 – 0,021% при помощи серной кислоты приводит к его извлечению в раствор с эффективностью 93,85%. Такой высокий показатель объясняется высокой реакционной способностью хвостового материала к серноокислотному воздействию. Дополнительно, благодаря длительному пребыванию материала в щелочной среде, процесс выделения урана упрощается и не требует дополнительного измельчения.

С точки зрения рациональной организации процесса, оптимальным вариантом является проведение выщелачивания при повышенных температурах. Однако в диапазоне 80–90°C наблюдаются значительные тепловые потери, что требует дополнительных мер по теплоизоляции оборудования для минимизации энергозатрат. Соответственно, в ходе эксперимента был выбран температурный режим 65–70°C, при котором достигается оптимальный баланс между уровнем извлечения урана и энергетической эффективностью. Процесс длился 6 часов, а соотношение жидкость-твёрдое (Ж:Т) составляло 1:1, как представлено на рисунке 3.48.

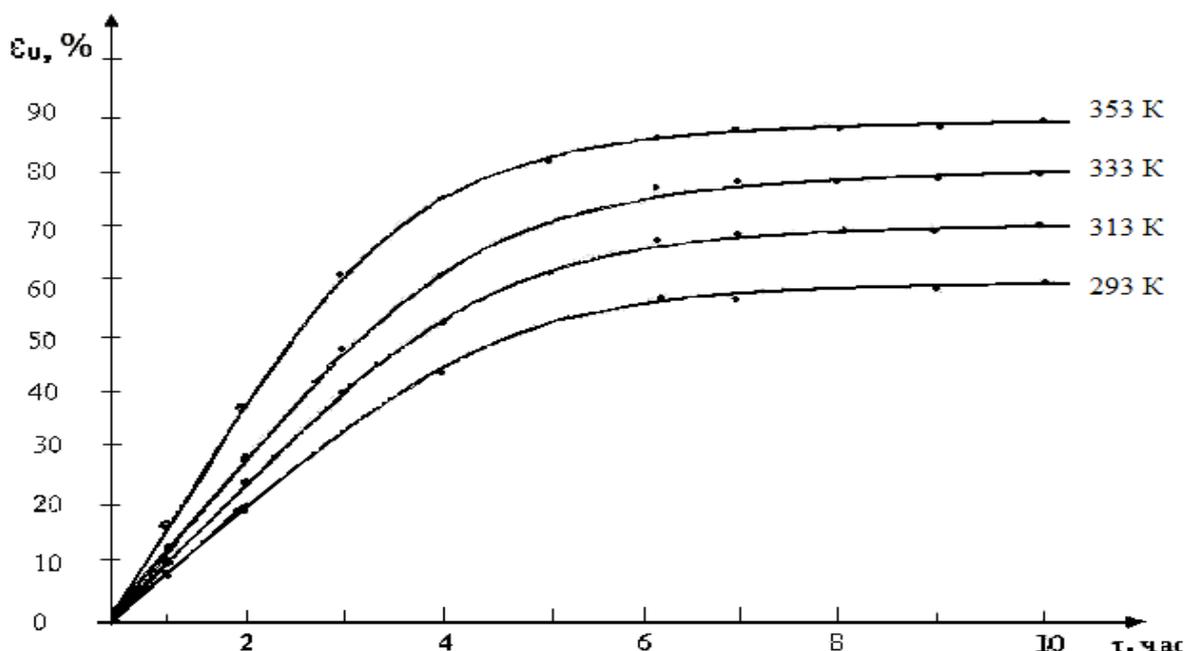


Рисунок 3.48 - Кинетические кривые выщелачивания хвостов (содержание урана 0,018%) при соотношении Т:Ж=1:2

Кинетика процесса при оптимальном расходе серной кислоты 180 кг/т в интервале температур 293-353 К исследовалась в изотермических условиях с выдержкой пульпы в течении 10 часов в термостатированном реакторе.

Как видно из рисунка 3.48, с увеличением температуры и времени сернокислотное выщелачивание хвостов из техногенного хвостохранилища "Карты 1-9" возрастает.

В изученном интервале температур степень извлечения урана увеличивается от 60 до 90%. Кинетические кривые выщелачивания хвостов исследовали при температурах 293, 313, 333 и 353 К. В течение 2,5-3 часов процесс выщелачивания протекает линейно.

Как видно из графика зависимости константы скорости от температуры, в координатах $\lg K - 1/T$ (рисунок 3.49) почти все экспериментальные точки хорошо укладываются на прямую линию, то есть эта зависимость может быть описана уравнением Аррениуса. Из величины тангенса угла наклона прямой можно определить энергию активации.

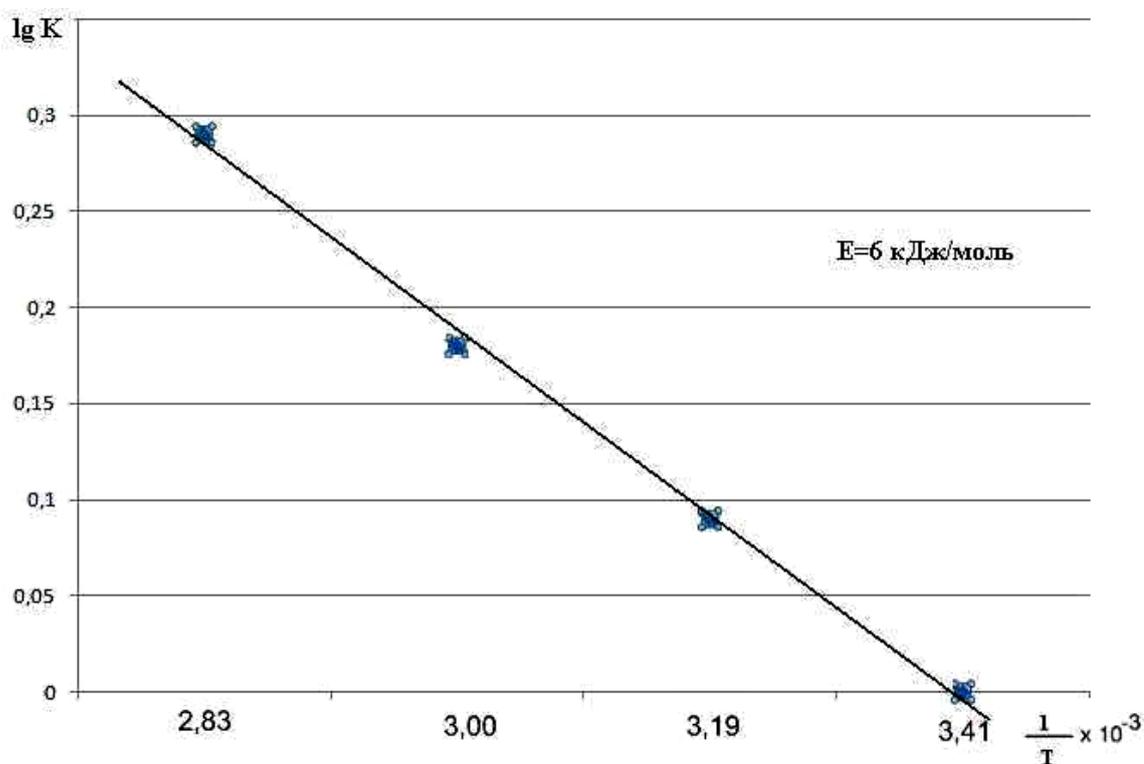


Рисунок 3.49 - Зависимость $\lg K$ от обратной абсолютной температуры

На основе обработки кинетических кривых была определена эмпирическая энергия активации, величина которой ($E=6$ кДж/моль) свидетельствует о протекании процесса выщелачивания в кинетической области (рисунок 3.50).

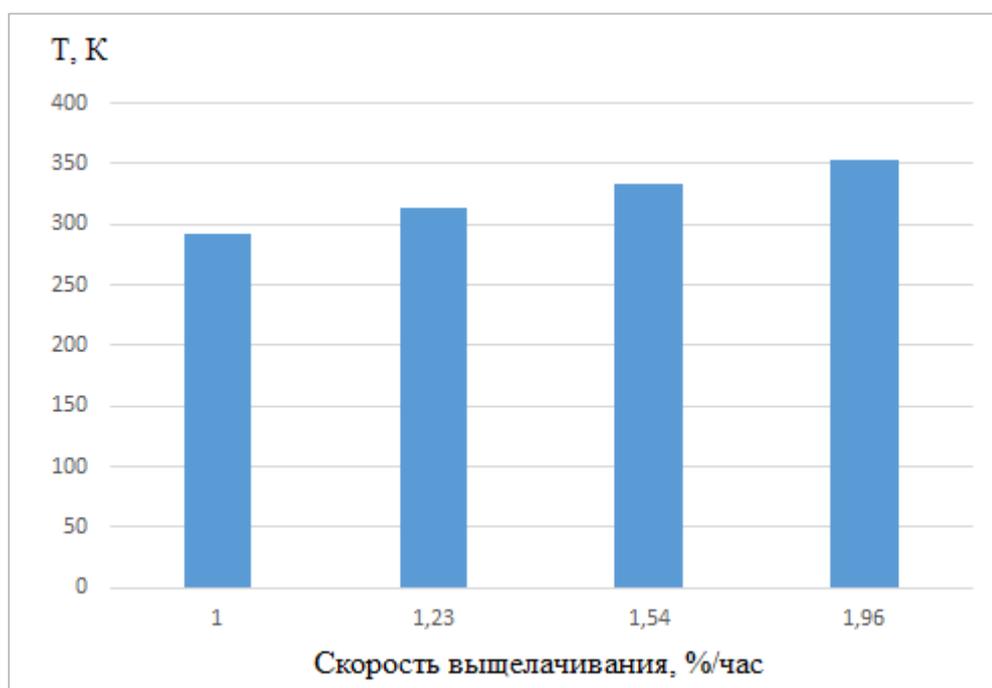
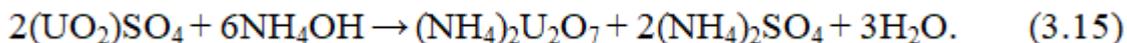


Рисунок 3.50 - Кинетические и энергетические характеристики извлечения урана из хвостов техногенного хвостохранилища "Карты 1-9" методом выщелачивания (при расходе $H_2SO_4 = 180$ кг/т, энергия активации = 6.0 кДж/моль)

Исследование сернокислотного выщелачивания хвостов позволило определить эффективные условия извлечения урана и оптимизировать технологический процесс. С целью извлечения их хвостового материала оксида урана U_3O_8 разработана усовершенствованная схема-технология разложения руды хвостохранилища "Карты 1-9" (рисунок 3.51).

Технология включает несколько этапов и представляет собой следующий технологический процесс. Отходы (урана 0,018%) поступают в реактор из нержавеющей стали, в котором вместе с реагентами равномерно перемешиваются механической мешалкой. В систему также добавляется серная кислота (40–70 мас%) из расчёта 60–350 кг/тонну. Процесс проходит при 65–70°C в течение 6 часов, соотношение твёрдых и жидких компонентов (Т:Ж) выдерживается равным 1:2.

После соответствующих реакций уран переходит в раствор в форме сульфата уранила, далее продуктивный раствор проходит нейтрализацию аммиачной водой, внесённой из расчёта 30-90 грамм на каждый килограмм урана. При этом протекает химическая реакция:



Фильтрация полученной пульпы позволяет отделить осадок диураната аммония, который затем сушат при 80–100°C. Высушенный продукт проходит этап прокаливания при 600–900°C, что способствует образованию конечного продукта – оксида урана (U_3O_8). Производственный выход полученного соединения составляет 90–99%.

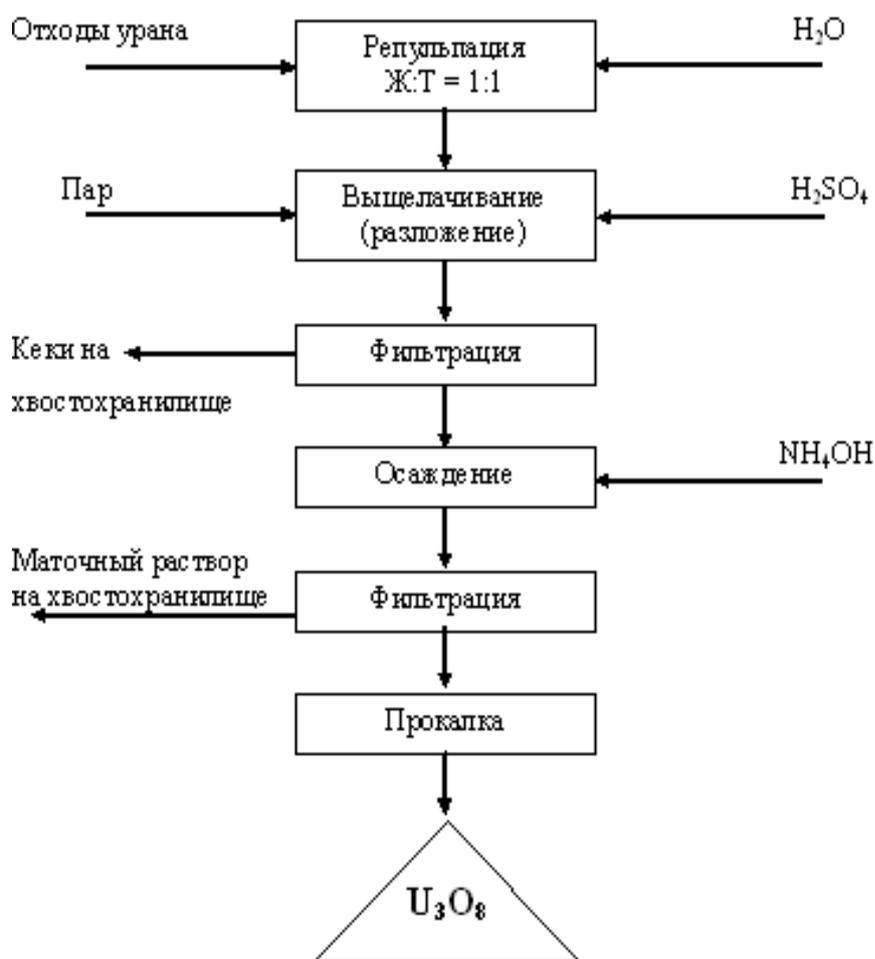


Рисунок 3.51 – Схема-технология переработки отходов урановой промышленности

Анализ результатов сернокислотного выщелачивания хвостов техногенного хвостохранилища «Карты 1-9» и извлечения из них урана подтвердил воз-

возможность реализации данного процесса. Однако значительная его кислотоёмкость делает процесс экономически невыгодным. Поэтому важно проведение дополнительных исследований и разработка альтернативных технологий переработки руд месторождений Таджикистана и выделение из них урана.

Для определения зависимости концентрации урана в растворе от концентрации выщелачивающего реагента (H_2SO_4) была взята проба из скважины №4 (глубина 8 м) с содержанием урана 0,019%.

Методика эксперимента включала:

- подготовку одинаковых навесок пробы по 50 г;
- обработку их растворами H_2SO_4 различной концентрации (25, 30, 50, 100, 150, 200 г/л) при соотношении Ж:Т = 1:2;
- проведение выщелачивания в двух режимах:
- стационарное (время контакта 24 часа);
- с перемешиванием (время контакта 3 часа).

При стационарном режиме переход урана в раствор составлял 40-50% при концентрации H_2SO_4 в пределах 50-100 г/л. Оптимальная концентрация кислоты составила 50 г/л, так как дальнейшее её увеличение не оказывало существенного влияния на извлечение. Максимальный уровень извлечения в этих условиях достиг 68,4%.

В промышленных условиях, где процесс выщелачивания проходит в пачуках, эффективность извлечения должна быть выше благодаря использованию кислорода воздуха в качестве дополнительного окислителя. В связи с этим была разработана установка, моделирующая работу пачука, и в настоящее время на ней проводятся испытания.

Результаты бурения скважин показали неравномерное распределение урана как по площади, так и по мощности тела хвостохранилища. Были выделены три блока по содержанию урана:

- до 0,010%,
- от 0,010% до 0,015%,
- более 0,015%.

Предварительные запасы урана в хвостохранилище оцениваются в 440 тонн, исходя из общего объёма накопленных отходов 3,034 млн. тонн при среднем содержании урана 0,0145%.

Предварительные технологические исследования подтвердили, что выщелачивание с перемешиванием является наиболее эффективным. В этом режиме параметры процесса следующие:

- Т:Ж = 1:2,
- концентрация H_2SO_4 = 50 г/л,
- время перемешивания = 3 часа.

При таких условиях извлечение урана в раствор составило 68,4%. Ожидается, что эффективность извлечения возрастёт при использовании воздушного перемешивания пульпы, так как кислород воздуха будет выполнять функцию дополнительного окислителя. Окончательная оптимизация режимов выщелачивания будет проведена в ходе следующего этапа исследований.

3.7. Получение уранового концентрата из отходов урановых хвостохранилищ города Истиклол

Повторная переработка отходов горнорудной промышленности приобретает всё большую актуальность, поскольку в таких отходах содержатся полезные ископаемые, не извлечённые при первичной обработке руд. К числу таких отходов относятся и урановые отходы, накопленные в Таджикистане начиная с 40-х годов XX века, когда технологии извлечения урана ещё не были достаточно развиты, что приводило к значительным потерям сырья. В частности, отходы, скопившиеся в хвостохранилищах города Табошар (г. Истиклол), можно рассматривать как потенциальный источник урана. Формирование указанных отходов происходило в 1945-1965 гг., когда функционировали два гидрометаллургических завода и две обогатительные фабрики по переработке ураносодержащей руды.

Основным источником ураносодержащего сырья для ГП "Востокредмет" являлся рудник Табошар, где добыча осуществлялась несколькими методами – методом подземного выщелачивания и карьерным методом (в Карьере

№ 1). Географически хранилище бедных руд и хвостохранилище находятся на территории Кураминского хребта. В настоящее время указанные хвостохранилища имеют статус «законсервированные», исключение составляет площадка, на которой складировались отходы бедных руд [226].

Выбор метода переработки отходов зависит от их состава и способа первичной обработки руды. В случаях, когда руда содержала кальцит и подвергалась карбонатному выщелачиванию, повторная переработка наиболее эффективна с использованием аналогичного карбонатного метода, поскольку кислотное выщелачивание требует значительных затрат реагентов. Напротив, когда руда или концентрат характеризуются высоким содержанием диоксида кремния, кислотное выщелачивание является наиболее рациональным методом, поскольку кремнезём практически не реагирует с кислотами. Для осуществления данного процесса могут быть использованы азотная или соляная кислота, однако с точки зрения экономической эффективности оптимальным остаётся применение серной кислоты [69].

Для определения оптимального метода переработки отходов были проведены исследования, в ходе которых изучены основные характеристики отобранных проб. Рисунок 3.52 характеризует гранулометрические характеристики отходов и распределение их по классам крупности.



Рисунок 3.52 - Гранулометрические характеристики отходов урановых хвостохранилищ города Истиклол и распределение их по классам.

Рисунок 3.53 представляет обобщённые данные о компонентном (химическом) составе рассматриваемых отходов.

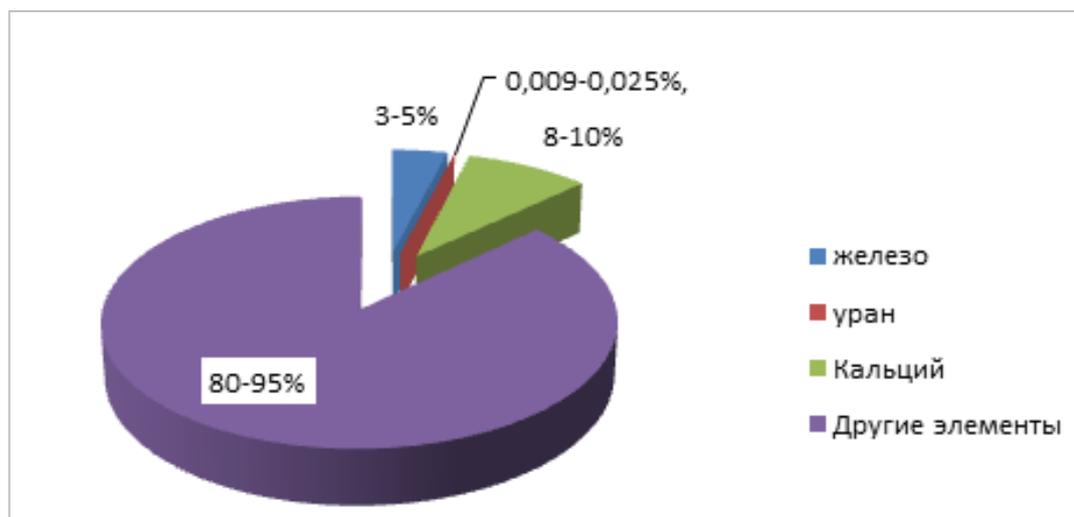


Рисунок 3.53 – Анализ химического состава отходов урановых хвостохранилищ города Истиклол: компонентный профиль

Радиоактивный фон поверхности хвостохранилищ колеблется в пределах 0,40–1,00 мкЗв/час по гамма-излучению, что свидетельствует о присутствии долгоживущих радионуклидов. Соответственно, распределение долгоживущих радионуклидов определено следующим образом:

- Ra-226 – от 12,1 до 180 кБк/кг,
- Th-232 – от 0,43 до 0,75 кБк/кг,
- K-40 – от 1,1 до 1,4 кБк/кг.

Так как отходы хвостохранилища Табошар содержат значительное количество двуокиси кремния, в качестве метода переработки был выбран кислотный способ выщелачивания с использованием серной кислоты.

В рамках исследований процесса извлечения урана из хвостохранилищ был проведён анализ влияния ключевых факторов, включая исходное содержание металла, концентрацию реагента и продолжительность контакта на общую эффективность процесса.

На начальном этапе экспериментов была поставлена цель определить возможность извлечения урана и оценить степень его выщелачивания. В качестве исходного материала использовались пробные образцы, среднее содержание урана в которых составляло 0,027%.

В ходе эксперимента по извлечению урана использовалось стационарное выщелачивание с фиксированными технологическими параметрами. Длительность процесса составила 24 часа, а температура поддерживалась на уровне 298 К для обеспечения стабильного взаимодействия между реагентом и минеральной структурой. Выщелачивание проводилось с применением серной кислоты различных концентраций - 20, 50, 100, 150 и 200 г/л. Исследуемые образцы имели массу 50 граммов, а соотношение твёрдых и жидких компонентов (Т:Ж) поддерживалось на уровне 1:2, что способствовало эффективному проникновению реагента в пористую матрицу хвостов.

Полученные результаты, представленные в таблице 3.18, демонстрируют зависимость степени извлечения урана от концентрации кислоты и позволяют выявить оптимальные параметры процесса.

Снижение концентрации урана в образцах 4 и 5, вероятно, обусловлено процессами окисления Fe^{2+} до Fe^{3+} , что повлияло на химическое равновесие системы. Взаимодействие образующихся соединений привело к изменению уровня pH до 4–5, способствуя образованию осадков гидроксида железа и полиуранатов.

Таблица 3.18 – Экспериментальные данные по извлечению урана из отходов: результаты выщелачивания образцов с средним содержанием урана

№ пробы	Вес, г	Количество урана в пробе, мг	CH_2SO_4 , г/л	Концентрация урана в растворе, мг/л	Извлечение, %
1	50	13,5	20	9	6,6
2	50	13,5	50	83	61,5
3	50	13,5	100	109	80,7
4	50	13,5	150	44	32,6
5	50	13,5	200	39	29,0

Объединённые пробы по хвостохранилищам выщелачивались с использованием растворов серной кислоты (концентрация 100 г/л, при соотношении

твёрдых и жидких компонентов (Т:Ж) равном 1:2). В ходе процесса применялось интенсивное перемешивание, а отбор образцов для анализа осуществлялся через 15, 30 и 45 минут, после чего образцы оставлялись для выстаивания в течение суток. Масса каждого образца 100 грамм (таблица 3.19).

Таблица 3.19 – Исследование коэффициента извлечения урана: результаты сернокислотного выщелачивания объединённых образцов

№	Характеристика образца (%)			Концентрация урана по временным интервалам (мг/л)				Извлечение
	MnO	Fe ₂ O ₃	U	сутки	45 мин	30 мин	15 мин	
Т II	0.14	7.3	$9.0 \cdot 10^{-3}$	41.2	38.0	39.4	37.6	98%
Т III	0.20	6.7	$8.5 \cdot 10^{-3}$	41.0	35.4	30.0	25.6	96%
Т IV	0.25	7.0	$6.8 \cdot 10^{-3}$	33.8	27.6	25.6	24.8	99%

Анализ данных таблицы 3.19 показывает, что основное содержание урана сосредоточено преимущественно в нижних слоях хвостохранилища и по его периферии. В связи с этим была проведена процедура объединения образцов, а затем повторное выщелачивание при идентичных условиях. Результаты, представленные в таблице 3.20, свидетельствуют о высокой эффективности предложенного метода.

Проведённые опыты показали, что хотя концентрация урана в отвалах мала, при выщелачивания объединённых проб серной кислотой извлечение урана составляет 96%. При необходимости возможно вторично переработать эти отходы с получением основного ценного продукта – концентрата урана и других важных химических соединений.

Таблица 3.20 – Анализ степени извлечения урана из повторно объединённых образцов: сравнительное исследование

№	Характеристика образца (%)				Концентрация урана по временным интервалам (мг/л)				Извлечение
	Ca	MnO	Fe ₂ O ₃	U	сутки	45 мин	30 мин	15 мин	
Т II	3.8	0.3	7.2	$1.2 \cdot 10^{-2}$	16.4	39.8	37.6	32.8	77.3%
Т III	4.9	0.3	6.6	$1.5 \cdot 10^{-2}$	58.0	51.6	48.6	42.4	85.2%
Т IV	4.3	0.2	4.8	$9.0 \cdot 10^{-3}$	37.5	28.8	26.2	24.8	83.3%
ТГ	0.5	0.1	5.5	$5.7 \cdot 10^{-3}$	18.4	18.4	17.6	16.6	65%
ТО	0.4	0.1	3.5	$1.1 \cdot 10^{-2}$	21.4	19.8	–	–	38.9%

ТГ – усреднённый образец с отвала № 7 (склоны отвала);
 ТО – усреднённый образец из отвала карьера №1 (выщелачивали при 2-х часовом активном перемешивании, далее отстаивали 24 ч.).

3.8. Заключение по главе 3

В третьей главе представлен детальный анализ особенностей процесса выщелачивания ураносодержащих руд и отходов, с использованием месторождений и хвостохранилищ республики в качестве наглядных примеров. Показана перспективность сернокислотного метода и метода карбонатного выщелачивания, рассмотрены технологические параметры, влияющие на повышение эффективности выделения урановых соединений из ураносодержащих руд и отходов бывших урановых производств.

Показано, что для руд месторождения "Танзим" наиболее эффективным методом является сернокислотное выщелачивание с предварительной отмывкой руды водой. Оптимальные условия включают использование серной кислоты в количестве 350 кг/т и азотной кислоты 30 кг/т, что позволяет достигать извлечения урана до 93,13%. Также проведены эксперименты по извлечению

урана с использованием анионного сорбента, что способствует экономии реагентов и повышению эффективности процесса. Кинетический анализ продемонстрировал, что скорость выщелачивания возрастает с увеличением температуры и концентрации кислот.

Для месторождения «Центральный Таджикистан» проведены исследования кислотного разложения урановых руд с применением различных окислителей, таких как перекись водорода, пиролюзит и азотная кислота. Исследование процесса выщелачивания показало, что наилучшие условия для эффективного извлечения урана включают поддержание температуры на уровне 60°C, концентрацию серной кислоты (H_2SO_4) в количестве 150 кг/т и применение пероксида водорода в объёме 25 мл/л. При таких параметрах достигается высокий уровень извлечения урана - 95.6%, что делает данный метод результативным.

Дополнительно анализ руды, добываемой из месторождения "Западный Таджикистан" выявил, что для её разложения перспективным является выщелачивание сернокислотным методом с добавлением реагента азотной кислоты. Экспериментально показано, что при температуре 80°C, использовании 30%-ной H_2SO_4 и времени выщелачивания 1 час достигается максимальное извлечение урана – 88.2 процентов. Кроме того, изучены кинетические аспекты процесса, выявлены зависимости степени извлечения урана от температуры, времени и pH раствора.

Дополнительно проведён сравнительный анализ химического состава урансодержащих руд различных месторождений Таджикистана, включая «Северный Таджикистан - 2». Установлено, что минералогический состав этих руд обуславливает необходимость индивидуального подбора методов переработки. Исследованы различные технологические подходы к разложению силикатных урановых руд, позволяющие не только эффективно извлекать уран, но и получать дополнительно ценные сопутствующие соединения, например, оксиды алюминия, оксиды железа и другие соединения.

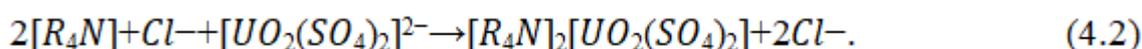
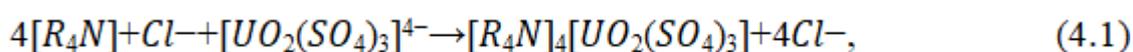
Соответственно, результаты данной главы демонстрируют, что имеется возможность существенного повышения эффективности переработки урано-содержащих руд через оптимизацию технологических параметров, подбор эффективных реагентов и использования современных сорбционных и осадительных методов переработки руд. Полученные данные могут быть использованы для дальнейшего совершенствования технологий извлечения урана с учётом экономических и экологических факторов, что особенно важно для развития уранодобывающей промышленности в Таджикистане.

ГЛАВА 4. СОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ УРАНА ИЗ РАСТВОРОВ И УРАНСОДЕРЖАЩИХ ВОД ТАДЖИКИСТАНА

4.1. Сорбция урана из раствора выщелачивания руды с использованием сорбента типа АМ(п)

Из руды месторождения "Центральный Таджикистан" извлекался урана выщелачиванием, при этом были получены продуктивные растворы с определёнными содержаниями урана, эти растворы далее проходили процесс сорбции, где использовался анионит АМ(п).

Применение метода ионного обмена, основанного на специализированных сорбентах, обусловлено тем, что после обработки серной кислотой уран остаётся в растворе в форме комплексных уранил-сульфатных анионов: $[UO_2(SO_4)_2]^{2-}$, который имеет две координирующие сульфатных группы, и $[UO_2(SO_4)_3]^{4-}$ - в котором координирующих сульфатных групп четыре. Процесс адсорбции этих комплексных соединений уранила выражается соответствующими уравнениями химреакций:



Извлечение урана из продуктивного раствора (концентрация = 0,515 г/л), проводилось с применением сорбционного метода, основанного на динамическом поглощении урановых соединений с использованием сорбента АМ(п). Этот способ позволял обеспечить непрерывную сорбцию, что значительно повышало эффективность извлечения целевого компонента. Исследования осуществлялись в стандартных условиях – при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении.

По завершении стадии сорбции остаточный раствор исследовался на химический состав, что позволило оценить уровень эффективности процесса улавливания урана. Адсорбция осуществлялась в колонке высотой 18 см и диаметром 2,4 см, где сорбент объёмом 45 см³ равномерно распределялся между

двумя слоями медицинской ваты, обеспечивая равномерное прохождение раствора. Продуктивный раствор подавался снизу вверх с скоростью подачи 30 мл/мин, что способствовало эффективному захвату урана, обеспечивая уровень сорбции в 47,6%. Дополнительные исследования помогли определить оптимальную скорость подачи – 12,3 мл/мин, что обеспечивало максимальную эффективность сорбции, достигавшую в процентном отношении 99 процентов.

После насыщения урана сорбент АМ(п) подвергался процессу десорбции. По мнению авторов [233], традиционным реагентом для этого этапа служит раствор серной кислоты.

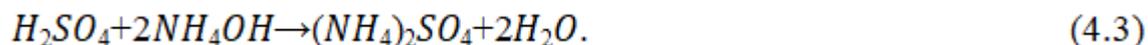
Таблица 4.1 – Характеристика процесса сорбции урана на ионообменной смоле АМ(п): экспериментальные данные по извлечению из раствора (постоянные величины – $C_U=0.515$ г/л, $V(AM(п))= 45$ см³, pH=1.5)

Скорость раствора, пропускаемого через колонки (мл/мин)	Содержание U на выходе колонки (мг/л)	Извлечение урана (%)
12,5	5.0	99.0
14.3	50.0	90.3
21.2	64.0	87.4
30.1	270.0	47.6

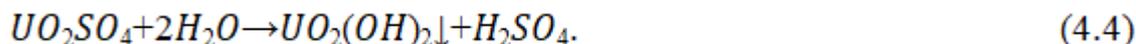
Насыщенный сорбент АМ(п) объёмом 45 см³ подвергался десорбции с применением 15%-ного раствора H₂SO₄. Процесс осуществлялся в динамических условиях при температуре 50–60°C, уровне pH = 1 и длился 6 часов, обеспечивая высокий уровень десорбции—99,4% ($\varepsilon U_{\text{десорб.}}$).

Образовавшийся десорбат далее нейтрализовался аммиачным раствором до достижения уровня pH = 8. После выделения урана раствор подвергался дополнительной обработке аммиачной водой, значительная часть которой использовалась для устранения остаточной кислотности. Данный процесс можно

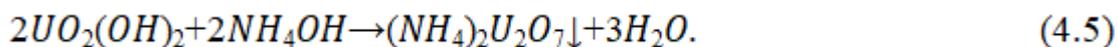
выразить следующим химическим уравнением:



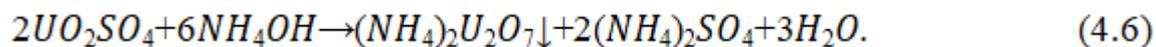
Реакция гидролиза уранилсульфата инициируется при достижении уровня pH 3.8, и протекание реакции осуществляется следующим взаимодействием:



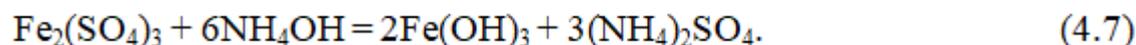
Следующий этап процесса – это реакция между $UO_2(OH)_2$ и аммиачной водой, что приводит к образованию аммония полиураната. Данное взаимодействие можно представить соответствующим уравнением:



Обобщённую реакцию осаждения диураната аммония можно представить следующим образом:



В растворах, содержащих уран, нередко присутствуют примесные элементы, среди которых выделяется трёхвалентное железо в форме сульфатного соединения. При нейтрализации аммиачной водой десорбатов сульфат железа претерпевает следующие химические превращения:



Для достижения крупного, хорошо фильтруемого осадка диураната аммония параметры десорбции, такие как температура, длительность процесса и уровень pH, были тщательно откорректированы. Добавление аммиачной воды в раствор требует строгого соблюдения этих условий, поскольку их нарушение приводит к образованию мелкодисперсного осадка. Такой осадок плохо задерживается фильтром и может проникать сквозь него, усложняя процесс разделения фаз.

Формирование структуры получаемого осадка зависит от множества факторов, среди которых особое значение имеют концентрация исходных реагентов, температурные условия в момент осаждения урана, интенсивность

перемешивания раствора, наличие механических примесей, а также объём разового введения аммиака. Дополнительное влияние оказывает изменение кислотности (рН) при добавлении аммиачного раствора, что может приводить к вариативности конечных результатов. Совокупность этих параметров формирует сложную систему взаимодействий, и их влияние может носить неоднозначный характер, приводя к различным физико-химическим свойствам образующегося осадка. Именно поэтому процесс осаждения диураната аммония для обеспечения оптимального результата необходимо вести под постоянным контролем.

Во время проведения экспериментов обеспечивался непрерывный мониторинг ключевых параметров процесса, включая температуру раствора, уровень рН и длительность его стабилизации на каждом этапе. Исследования выполнялись в термостате, где температура поддерживалась в пределах 50–60°C.

Для осаждения урана применялся аммиачный раствор с концентрацией по NH_3 , равной 18,5%, а длительность процесса составляла 6 часов. В результате уран осаждался в виде жёлтого кека, и его степень осаждения в процентном отношении составляла 97,8 процентов.

Чтобы получить товарный продукт, осаждённый жёлтый кек подвергался термической обработке при 700°C на протяжении 1 часа. В результате удалось получить конечный продукт, в котором содержание U_3O_8 было равным 74,7 процента.

4.2. Сорбция урана из растворов термически обработанным углём

В данном исследовании рассмотрено сорбционное извлечение урана с использованием сорбента, полученного в результате термической обработки углей месторождения Фан-Ягноб.

Выше в первой главе было отмечено, что сорбция урана является важнейшим этапом технологии получения урана в виде U_3O_8 . В Агентстве по ХБРЯ

безопасности НАНТ проводятся исследования различных сорбентов, изготовленных на основе местного растительного сырья.

Установлено, что скорлупа косточки абрикоса обладает значительно лучшими сорбционными характеристиками по сравнению с другими растительными материалами, которые были апробированы в качестве сорбентов.

Проанализирована кинетика сорбции урана из шахтных и дренажных вод, образующихся в отходах урановой промышленности. Построены кинетические кривые извлечения урана при различных температурах (293, 313, 333 K) и временных интервалах (от 1 до 10 часов). Экспериментально подтверждено, что энергия активации составляет 6.0 кДж/моль, что свидетельствует о протекании процесса в условиях, подчиняющихся диффузионным закономерностям.

В результате оптимизации условий сорбции была разработана технология, ориентированная на эффективное извлечение урана из жидких сред (дренажные потоки, шахтные воды). Этот процесс включает ряд последовательных стадий, каждая из которых играет важную роль в достижении высокой степени извлечения урана. На начальном этапе проводится подкисление среды. Далее осуществляется адсорбция урана, что позволяет отделить его из продуктивного раствора. Следующими этапами являются термическая обработка, а также выщелачивание, способствующее повышению выхода целевого соединения. После этого выполняется осаждение, которое позволяет сформировать устойчивые урановые соединения, за чем следует фильтрация для удаления примесей. Заключительный этап включает окончательную сушку, обеспечивающую получение готового продукта.

В ходе исследований, посвящённых концентрированию урана, уделялось внимание сорбентам, созданным на основе углеродных материалов. Углеродные сорбенты, традиционно получаемые из ископаемого сырья, характеризуются высокой эффективностью. Однако значительный интерес представляют альтернативные материалы, изготовленные из органических источников, таких как торф, древесина и другие природные компоненты.

С учётом доступности углей Фан-Ягнобского месторождения был разработан сорбент, полученный методом термической обработки в условиях отсутствия кислорода. Первоначально этот сорбент применялся для удаления из состава шахтных вод урановых соединений.

Процесс сорбции урана включает ряд последовательных этапов. Сначала термообработанный уголь (3–5 г) тщательно измельчается до фракций 0,25 мм и загружается в сорбционную колонку. Затем в неё добавляют шахтную воду, оставляя систему в состоянии покоя на 4 часа для первоначального взаимодействия. Следующая фаза заключается в непрерывном пропуске шахтной воды через сорбционную колонку со скоростью 10 мл/мин. Исходная концентрация урана в растворе составляет 0,044–0,051 г/л, а эффективность сорбции контролируется по снижению его содержания до 0,0039–0,0063 г/л. После завершения сорбционного этапа очищенный раствор направляется в отдельные ёмкости, а термообработанный уголь, насыщенный ураном термообработанный уголь подвергается дальнейшей термической обработке при 200–350°C, что обеспечивает полное сгорание материала.

Процесс переработки урансодержащей золы включает несколько последовательных стадий. На начальном этапе зола подвергается выщелачиванию, где используется серная кислота в сочетании с окислителями, такими как азотная кислота и трёхвалентное железо. Эти реагенты способствуют максимальному растворению урановых соединений. После завершения выщелачивания раствор проходит процесс фильтрации, в результате которого формируется фильтрат, насыщенный уранилсульфатом. Очищенный раствор затем подвергается следующей технологической стадии - осаждению урана с использованием аммиачной воды, по традиционной технологии, что приводит к образованию оксида урана (U_3O_8). Заключительным этапом является сушка полученного осадка в вакууме при температуре 100–150°C. Итоговый выход целевого продукта составляет 90–95%, а концентрация основного вещества достигает аналогичного уровня.

Оптимизированные параметры данной технологии обобщены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимизированные параметры извлечения из шахтных вод урана методом сорбции (сорбент - термообработанный уголь)

Параметры сорбции	Значения
Температура в помещении	298.15 К
Масса сорбента в сорбционной колонне	5 грамм
Слой сорбента в колонне, высота	25-30 мм
Размер фракций сорбента	до 0.25 мм
Объём шахтной воды, пропускаемый через колонну	10 литров
Содержание в исходном растворе урана	0,044–0,051 г/л
Процент извлечения из шахтной воды урана	90-95 процентов

На основании оптимизированных параметров извлечения из шахтных вод ураносодержащих соединений методом сорбции на сорбент - термически обработанный уголь, разработана оптимизированная схема-технология данного процесса (рисунок 4.1).

Технологический процесс получения оксида урана в виде U_3O_8 с использованием углеродного сорбента включает ряд последовательных этапов:

- первый этап – подготовка ураносодержащих растворов и их анализ - изучение химического состава исходного материала;

- второй этап – этап сорбирования до максимального насыщения сорбента - связывание урановых соединений с обработанным углеродным сорбентом;

- на этапе термической обработки насыщенный сорбент подвергается обжигу при 350°C , что способствует устранению посторонних примесных соединений и повышению его сорбционной активности;

- выщелачивание предварительно обработанного сорбента, где серная кислота и окислители используются для максимального высвобождения урана

из исходного материала. Этот этап обеспечивает эффективный переход целевого компонента в раствор;

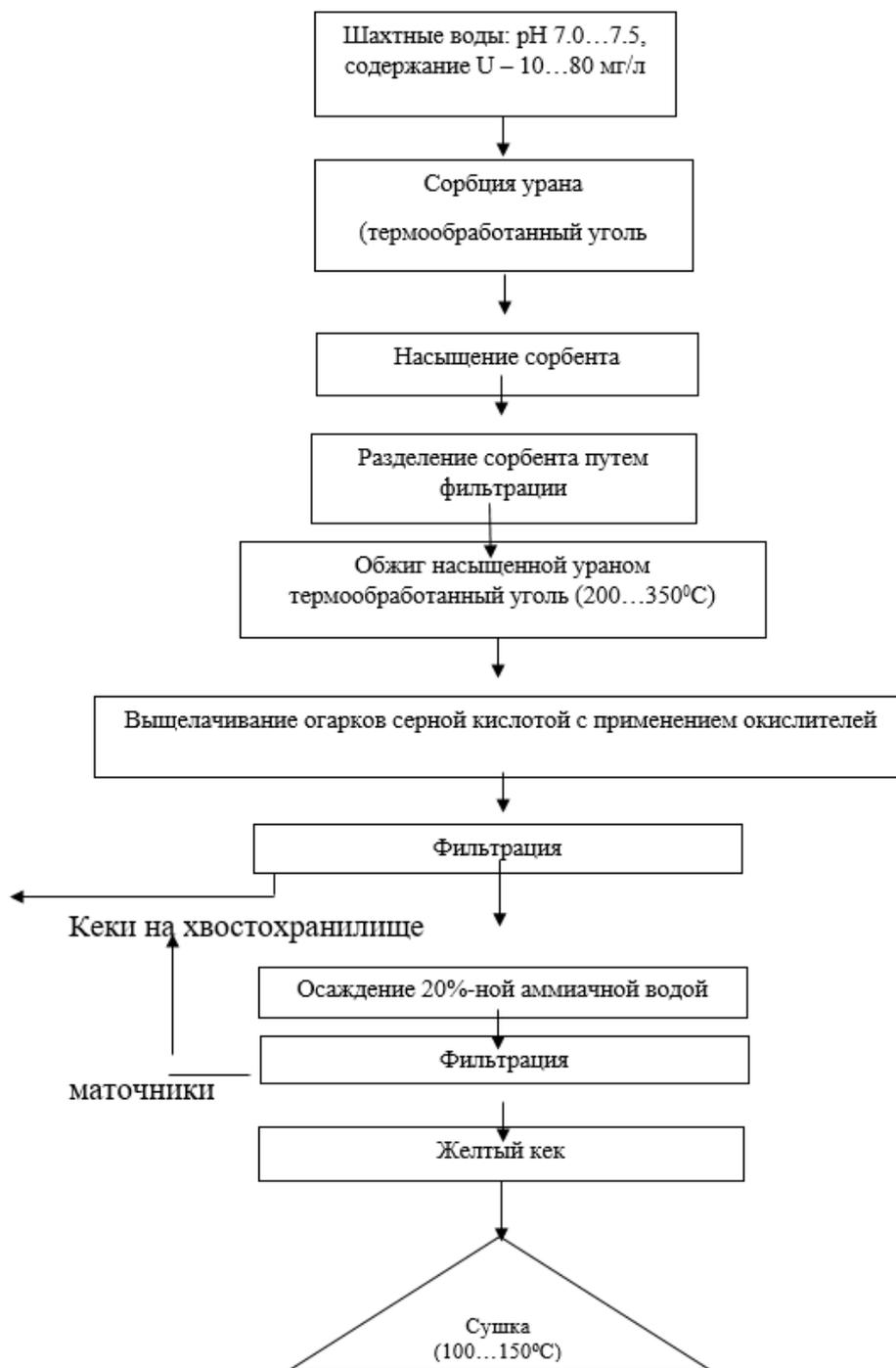


Рисунок 4.1 – Оптимизация процесса сорбции урана: использование активированного угольного сорбента из месторождения Фан-Ягноб

- фильтрация раствора, в ходе которой отделяются твёрдые частицы, что позволяет получить очищенный раствор, готовый к дальнейшим химическим операциям;

- заключительным этапом является осаждение урана, реализуемое посредством введения аммиачного раствора (концентрация 20%), что приводит к выделению урана в виде соединения U_3O_8 [236].

Дополнительно угольный сорбент был протестирован для извлечения ураносодержащих соединений из руды месторождения "Западный Таджикистан".

Технологическое исполнение этого процесса выглядело следующим образом. Использовали раствор, полученный после выщелачивания руды, содержащий 0.040 г/л урана при уровне pH = 3,9. Перед загрузкой в сорбционную колонну сорбент подвергался механическому измельчению и фракционированию по размеру частиц, использовались частицы руды фракций от (-0,25) до (+0,25) мм.

Затем ураносодержащий раствор поступал в сорбционную колонну, где выдерживался в неподвижном состоянии в течение 4–24 часов. На заключительном этапе раствор непрерывно пропускался через сорбционную колонну с постоянной скоростью (10 мл/час) при 25°C. При этом были получены экспериментальные результаты, которые обобщены в виде таблицы 4.3.

Таблица 4.3 – Анализ технологических параметров сорбции урана из растворов: выбор оптимальных условий для выделения U_3O_8

Сорбент	Объем раствора, пропущенный через сорбент (мл)	Содержание сорбента (г)	Фракции сорбента	τ сорбции (ч)	Извлечение урана (%)
N-I	40	5	-1 + 0,25	4	25.4
N-I	80	-« -	-1 + 0,25	8	26.3
N-I	40	-« -	-0,5 + 0,25	4	17.5
N-I	80	-« -	-0,5 + 0,25	8	22.4
N-I	40	-« -	-0,5 + 0,1	4	12.4

Продолжение таблицы 4.3

N-I	80	—« —	–0,5 + 0,1	8	21.0
N-I	40	—« —	–0,25 + 0,1	4	51.2
N-I	80	—« —	–0,25 + 0,1	8	57.5
N-I	120	—« —	–0,25 + 0,1	12	60.1
N-I	160	—« —	–0,25 + 0,1	16	61.5
N-I	200	—« —	–0,25 + 0,1	20	60.8
N-I	240	—« —	–0,25 + 0,1	24	60.3
N-II	40	—« —	–1 + 0,25	4	20.4
N-II	80	—« —	–1 + 0,25	8	24.4
N-II	40	—« —	–0,5 + 0,25	4	31.6
N-II	80	—« —	–0,5 + 0,25	8	34.2
N-II	40	—« —	–0,5 + 0,1	4	10.7
N-II	80	—« —	–0,5 + 0,1	8	14.5
N-II	40	—« —	–0,25 + 0,1	4	65.7
N-II	80	—« —	–0,25 + 0,1	8	72.2
N-II	120	—« —	–0,25 + 0,1	12	81.6
N-II	160	—« —	–0,25 + 0,1	16	90.8
N-II	200	—« —	–0,25 + 0,1	20	89.7
N-II	240	—« —	–0,25 + 0,1	24	90.6

Результаты экспериментов продемонстрировали, что через 12–15 часов после начала сорбции извлечение урана стабилизируется и не претерпевает значительных изменений (рисунок 4.2).

Кроме того, исследовалось влияние уровней рН в сорбционной колонне на процесс сорбции урана. Показано, что начало сорбции приходится на уровень рН равный трём, постепенно усиливается и достигает максимальной эффективности при рН=7, после чего степень извлечения вновь начинает снижаться (рисунок 4.3).

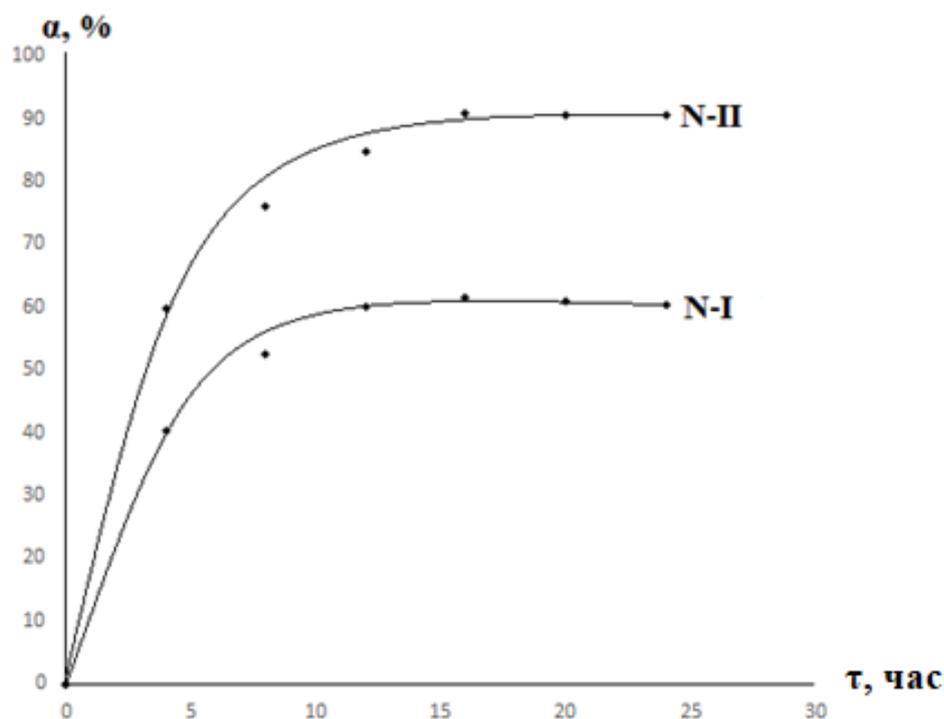


Рисунок 4.2 – Влияние продолжительности сорбции на эффективность уранового извлечения (сорбент N-1 с фракциями (-0.5+0.25), сорбент N-II с фракциями (-0,25+0,1))

После завершения сорбционного процесса, степень извлечения урана контролируется по снижению его концентрации в растворе до 0.0039–0.0063 г/л. Очищенная жидкость перенаправляется в отдельные ёмкости, а термообработанный уголь, насыщенный ураном, подвергается высокотемпературному обжигу в диапазоне $T=200\text{--}350^{\circ}\text{C}$.

После образования урансодержащей золы она проходит этап выщелачивания, где используется серная кислота совместно с окислителями, такими как трёхвалентное железо или азотная кислота, способствующими эффективному высвобождению урана. После завершения этого процесса полученная масса подвергается фильтрации, в ходе которой выделяется уранилсульфатный фильтрат, содержащий целевые соединения.

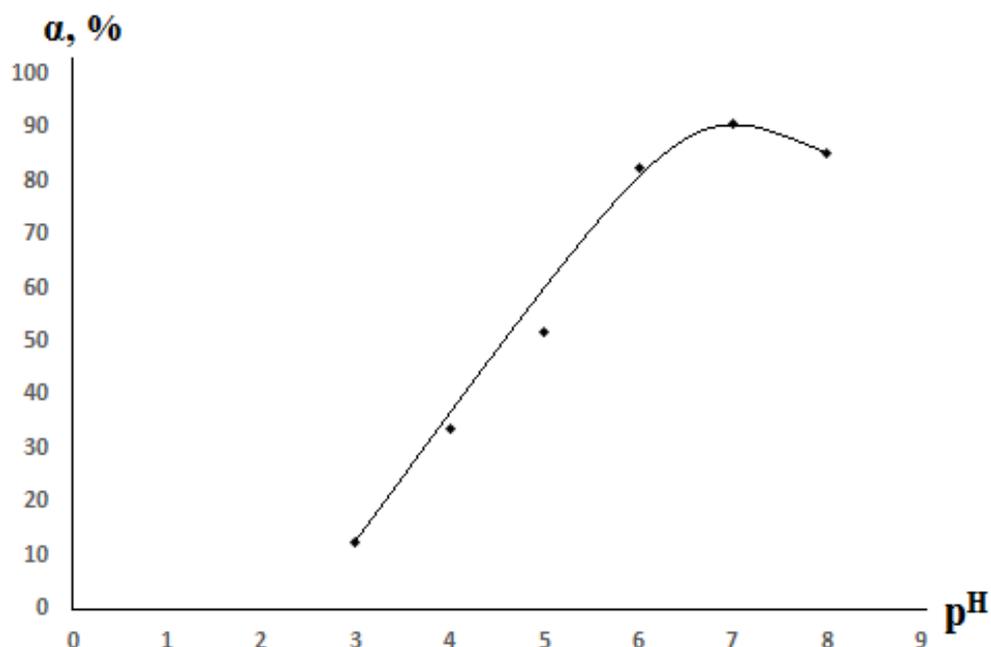


Рисунок 4.3 – Исследование зависимости эффективности сорбции урана от уровня pH среды

На следующем этапе уран извлекается из раствора посредством осаждения аммиачной водой по стандартной методике, в виде оксида урана U_3O_8 . Заключительным шагом является вакуумная сушка осадка при температуре 100–150°C для получения конечного продукта.

Выход конечного продукта составляет 90–95%, при этом содержание основного вещества достигает 90–95%.

4.3. Сорбция урана из растворов при помощи микрогеля

Данный раздел рассматривает методы обработки выщелоченных рудных растворов и шахтных вод с применением как природных, так и промышленных сорбентов [222].

Для эффективного извлечения урана использовался микрогель, представляющий собой пектиновые полисахариды, выделенные из корзинок подсолнечника [237]. Этот сорбент обладает высокой сорбционной способностью, а его гранулы имеют размер до 0,4 мм.

Процесс получения пектиновых полисахаридов из подсолнечника включал несколько последовательных этапов:

- подготовка сырья: высушенные и измельчённые корзинки подсолнечника загружались в реактор, где подвергались обработке раствором соляной кислоты. При этом контролировался уровень кислотности, поддерживая рН в пределах 1–2, а также гидромодуль, установленный на уровне 1:10;

- на этапе набухания микрогеля смесь нагревалась до 40–50°C и постоянно перемешивалась, что способствовало формированию стабильной структуры;

- затем проводилась экстракция урана при температуре 85°C в условиях водяной бани, процесс длился 30 минут, при интенсивном перемешивании со скоростью 2500 оборотов в минуту. Гидромодуль в этом случае составлял 1:20;

- после экстракции обработанный раствор подвергался фильтрации с использованием полиамидного фильтра. Из полученного осадка урановые соединения многократно промывались дистиллированной кипячёной водой, а затем высушивались;

- далее осуществлялось разделение раствора на три основные фракции: микрогель, пектиновые соединения и олигосахаридные компоненты;

- на стадии осаждения микрогеля гидролизат охлаждали и нейтрализовали аммиаком до уровня рН 3.5–4, что приводило к выпадению осадка. Это обусловлено тем, что микрогель не растворяется в слабокислых и нейтральных средах;

- последний этап включал процесс очистки и финальной обработки микрогеля. Он отделялся посредством центрифугирования, проводимого в течение 30 минут при скорости вращения 5000 оборотов в минуту. Затем материал многократно промывали этиловым спиртом, фильтровали и подвергали сушке, обеспечивая получение очищенного конечного продукта.

Процесс сорбции урана включает последовательные этапы, обеспечивающие эффективное извлечение и дальнейшую переработку материала.

1. Подготовка сорбента – 1 г микрогеля с размером фракций менее 0,4 мм насыщался водой, чтобы обеспечить его набухание.
2. Непосредственно сорбция урана – подготовленный сорбент загружался в сорбционную колонну, и через сорбент со скоростью 0.2 мл/мин начинает подаваться урансодержащий раствор, в котором осуществляется контроль концентрации урана.
3. Анализ извлечения – из выходного потока регулярно отбирались 5-миллилитровые пробы для определения остаточного содержания урана.

После насыщения сорбента ураном он подвергался термообработке при температуре 250–350°C до полного разложения органической матрицы. В результате образовывалась зольная масса, обогащённая ураном, которая далее растворялась в H_2SO_4 . Для повышения эффективности процесса использовали окислители – азотную кислоту и трёхвалентное железо, способствующие выделению урана в виде соединения уранилсульфата.

На следующем этапе из полученного раствора уран осаждали аммиачной водой, и уран осаждался в виде соединения U_3O_8 . На завершающей стадии полученный осадок подвергается вакуумной сушке при 100–150°C, обеспечивая необходимое качество конечного продукта.

Выход урана в виде U_3O_8 определялся в процентном отношении как 90–95 процентов, при этом концентрация основного компонента достигла аналогичного уровня. Детальные результаты данного исследования обобщаются в таблице 4.4.

Соответственно, предложенный метод обработки шахтных вод демонстрирует высокую эффективность благодаря применению микрогеля, синтезированного из пектиновых полисахаридов, выделенных из корзинок подсолнечника. Этот инновационный сорбент обладает высокой способностью извлекать уран, что позволяет успешно отделять его из растворов в виде оксидного соединения U_3O_8 .

Для расширенного анализа дополнительно были проведены исследования процессов сорбции урана, в которых использовались альтернативные сорбционные материалы. Эксперименты осуществлялись в статическом режиме, что позволило оценить их сорбционные свойства и эффективность по сравнению с микрогелем. Итоговые результаты анализа представлены на рисунке 4.4.

На основании полученных данных установлено, что микрогелевый сорбент обладает высокой сорбционной способностью, демонстрируя показатели, сопоставимые с классическими сорбентами.

Таблица 4.4 – Оптимизированные параметры извлечения из шахтных вод урана методом сорбции на сорбент - микрогель

Параметры сорбции	Значения	
	$pH_{\text{раствора}} = 7$	$pH_{\text{раствора}} = 2 - 6$
Размер фракций сорбента	< 0.4 мм	< 0.4 мм
Вес сорбента в колонне	1 грамм	1 грамм
Сорбционная ёмкость сорбента	1.6 мг/г	0.72 мг/г
Высота слоя сорбента в колонне	0.8 м	0.8 м
Температура раствора	20-25°C	20-25°C
Объём пропущенного через колонну раствора	50 мл	50 мл
Концентрация в исходном растворе U	35.7 мг/л	20.0 мг/л
Извлечение урана из раствора	90-95	70-75



Рисунок 4.4 – Сравнительная характеристика различных сорбентов (сорбент 3 грамма, раствор – 20 мл, время сорбции 24 ч, режим статический)

4.4. Некоторые методы извлечения урана из природных урансодержащих вод сложного солевого состава

Сасык-Куль - крупнейшее бессточное озеро, расположенное в пределах одноимённой котловины в низовьях реки Аличур. Оно обладает удлинённой овальной формой, ориентированной в северо-восточном направлении. Этот водоём имеет уникальные гидрологические особенности, обусловленные его замкнутостью и климатическими условиями региона. Из-за отсутствия стока вода в озере подвержена испарению, что влияет на солёность и химический состав.

Вдоль его побережья проходит важная транспортная артерия - автомагистраль Ош–Хорог, соединяющая разные регионы страны. Расстояние от водоёма до административного центра города Хорог - 195 километров. Ближайший населённый пункт - поселение Аличур, удалённое на 12 км в северо-восточном направлении. В окрестностях озера Сасык-Куль климат исключительно засушливый: годовое количество осадков не превышает 100–108 мм, тогда как уровень испарения достигает 550–560 мм.

Озёрная вода представляет собой насыщенный минералами многокомпонентный рассол с концентрацией солей от 150 до 300 г/л. Высокое содержание урана делает её промышленно значимой, сопоставимую с растворами, образующимися при подземном выщелачивании урановых руд. Помимо урана, в составе воды присутствуют значительные запасы таких важных элементов, как вольфрам, литий и бор, имеющих стратегическое значение для различных отраслей промышленности.

Однако извлечение урана из озёрного раствора представляет собой сложную задачу, главным препятствием которой остаётся нехватка эффективных технологий. Основная сложность обусловлена высокой минерализацией воды, перенасыщенной хлор-ионами и прочими химическими примесями, что усложняет разработку методов переработки. Для промышленного освоения ресурсов озера требуется разработка инновационных технологий, способных преодолеть эти барьеры и обеспечить рентабельное извлечение полезных элементов.

В 1975–1976 годах в лаборатории ГП "Востокредмет" (Таджикистан) проводились попытки извлечения урана из озёрной рапы методом сорбции, а также в ВНИИХТе (Москва) исследовался мембранный способ переработки этих рассолов. Однако данные эксперименты не привели к дальнейшему развитию технологий. Использование мембранного метода оказалось неэффективным вследствие его чрезмерной энергоёмкости, требуя затрат электроэнергии на уровне 1 кВт·ч на каждый кубометр рапы, а также дорогостоящего оборудования, что делало его экономически невыгодным. В то же время сорбционный способ показал низкую результативность, поскольку ионообменные смолы оказались неспособны эффективно удалять хлор-ионы, которые не поддавались очистке стандартными сорбентами. Эти факторы стали ключевыми препятствиями на пути промышленного освоения урановых запасов озера.

Специалисты лаборатории ГП «Востокредмет» сосредоточили усилия на поиске оптимальных решений для извлечения урана из озёрного рассола Сасык-Куль. В 2001 году ими была проведена очередная серия исследований,

направленных на разработку эффективных методик извлечения урана из концентрированного солевого раствора. В рамках экспериментов были протестированы три основных подхода:

- сорбционные технологии - применялись как синтетические, так и природные сорбенты, включая анионообменные смолы, активированный уголь, цеолиты;

- осадительные процессы - использовались различные осадители, такие как известь, щёлочь и аммиак, способствующие выделению урана;

- соосадительные способы, предусматривающие использование соединений железа и титана в виде их оксидов.

Исследования выявили значительные трудности в применении сорбционного метода. Высокая концентрация солей, включая карбонат-, бикарбонат- и хлор-ионы, оказывает негативное влияние на эффективность сорбционного процесса, поскольку эти соединения снижают способность урановых ионов связываться с сорбентом. В практике уранового производства растворы с подобным химическим составом чаще применяют на этапе десорбции, где они способствуют высвобождению урана из сорбента, а не его первоначальному извлечению. Кроме того, проведённые исследования подтвердили, что осадительные методики не обеспечивают достаточную степень выделения урана, что делает их непригодными для промышленного использования.

В ходе экспериментов гидроксиды титана и железа рассматривались как соосадители для выделения урановых соединений, поскольку они широко применяются в радиохимии и извлечении урана из морской воды. Однако возникла сложность: введение оксидов титана и железа в раствор не инициировало осаждение урана, даже при изменении условий эксперимента. Так, добавление диоксида титана не оказывало влияния на концентрацию урана, независимо от уровня pH (1–9), соотношения диоксид титана / раствор (1:20) или времени контакта (свыше 24 часов).

Положительный результат был достигнут только при одновременном осаждении урана вместе с гидроксидами железа и титана, непосредственно в

растворе. В таких условиях формирующийся осадок проявлял высокую активность и хорошо развитую поверхность без посторонних примесей. Использование метода позволило достичь следующих уровней извлечения урана:

- при использовании соединений железа уровень извлечения урана достигал 87.5%;
- применение оксида титана демонстрировало высокую эффективность, обеспечивая 99%-ное извлечение урана в лабораторных условиях.

Однако, несмотря на впечатляющие результаты, промышленное внедрение данной технологии оказалось экономически невыгодным из-за значительных затрат на химические реагенты. Анализ расхода материалов, необходимого для извлечения одного килограмма урана, показывает следующие показатели:

- хлорид железа - 74 кг,
- серная кислота - 827 кг,
- аммиачная вода - 175 кг.

Учитывая также различные дополнительные затраты, этот процесс хотя и осуществим в техническом исполнении, но при этом экономически невыгоден и не эффективен.

Соответственно, чтобы с высокой эффективностью перерабатывать рапу озера Сасык-Куль, необходимо разработать более экономичные и оптимизированные технологии.

4.4.1. Технология извлечения урана из рассола с высоким содержанием ионов хлора

В рамках исследования были проведены отборы проб озёрной воды Сасык-Куль, а их химический состав проанализирован и представлен на рисунках 4.5 и 4.6. Концентрация урана в озёрной рапе достигала 20 мг/л, при этом её уровень pH составлял 9,2, то есть среда водоёма являлась щелочной.

Образцы подвергли процессу обезвоживания, то есть осуществляли выпаривание 250 мл урансодержащей жидкости до полного высушивания. В результате эксперимента удалось получить 27 г солевого осадка.

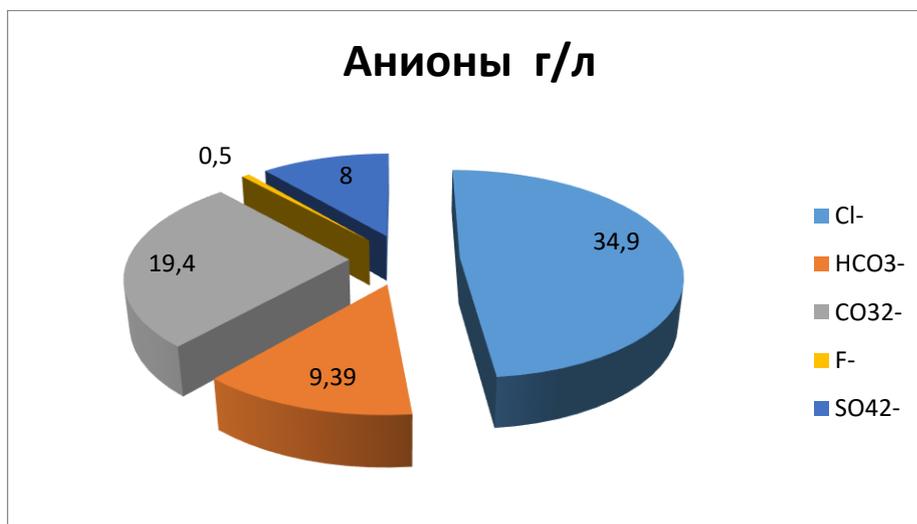


Рисунок 4.5 – Химический профиль озёрных вод Сасык-Куль: содержание основных анионов [239]

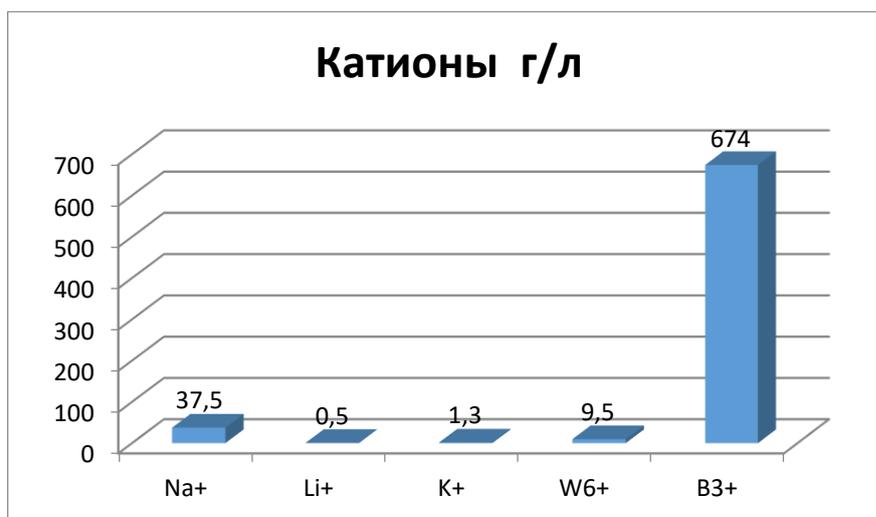


Рисунок 4.6 – Химический профиль озёрных вод Сасык-Куль: содержание основных катионов [239]

На рисунках 4.7 и 4.8 представлены результаты рентгеноспектрального анализа полученного солевого осадка (спектрометр "SPECTROSCAN MAKS-GF2E", оборудованного рентгеновской трубкой БХ-7 с анодным материалом Ag). При проведении анализов использовались следующие параметры: напря-

жение на рентгеновской трубке 40 кВ, сила тока 100 мкА, два диапазона дискриминации сигналов: 450–1350 и 1350–2250 мВ. Рабочее напряжение детектора 1586 В.

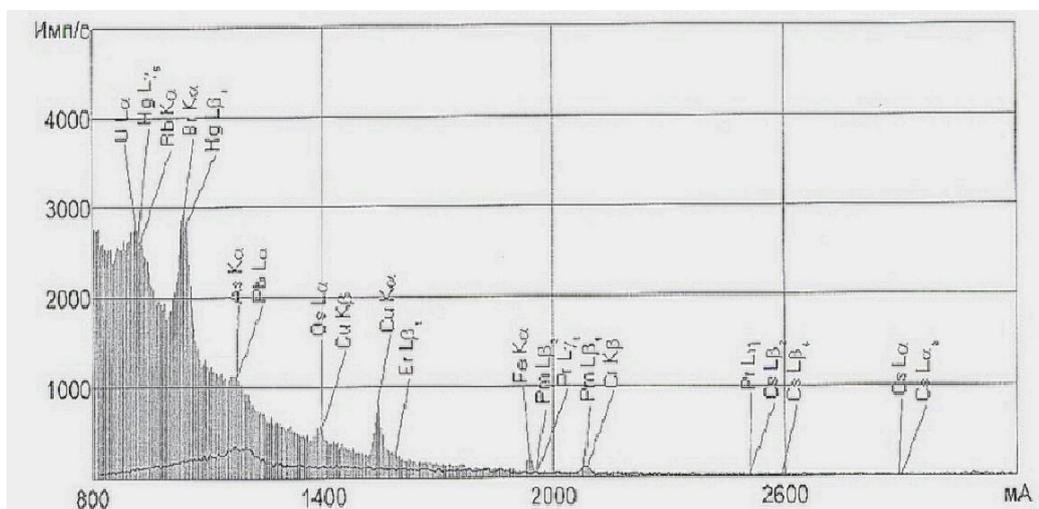


Рисунок 4.7 – Анализ химических элементов в солевом остатке после выпаривания

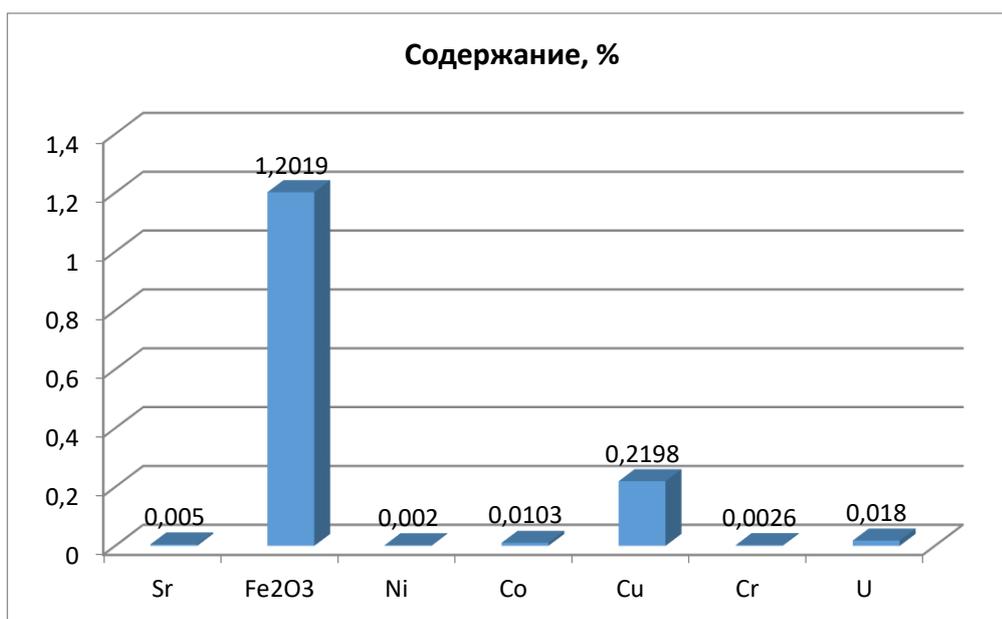


Рисунок 4.8 - Химический состав по основным компонентам солевого остатка озера Сасык-Куль: спектральный анализ

Для удаления хлоридов выпаренный остаток растворяли в концентрированной серной кислоте, взятой в количестве 25 мл), обеспечивая непрерывное перемешивание, при этом происходило интенсивное выделение паров хлороводорода. Отделённые пары улавливались с дальнейшим получением из них

технического раствора HCl с концентрацией 10–12%. Затем в процесс дополнительно вводили концентрированную H₂SO₄ (25 мл), разбавляли дистиллированной водой до общего объёма 200 мл, что привело к снижению уровня pH до 0,2.

Поскольку для эффективной сорбции урана оптимальный диапазон pH должен находиться в пределах 2.5–3.5, раствор корректировали путём добавления 150 мл NH₄OH, что обеспечило достижение pH = 3.3. В результате общий объём раствора составил 350 мл. Для сорбции использовали сорбент – ионообменную смолу AM(п) в количестве 2 грамма.

Согласно полученным экспериментальным данным, данный метод одволяет извлекать уран не ниже 85 процентов (таблица 4.5).

Таблица 4.5 - Результаты сорбции урана из раствора на модифицированной смоле AM(п) после удаления хлоридов

Эксперимент	Объёмы пропущенных растворов (мл)	Вход			Выход			Сорбция U	Извлечение урана, %
		pH	г/л	абс. г	pH	г/л	абс. г		
1	170	3,05	1.8·10 ⁻²	3.1·10 ⁻³	2,93	5.0·10 ⁻³	8.5·10 ⁻⁴	2.2·10 ⁻³	72,2
2	350	3,3	1.3·10 ⁻²	4.6·10 ⁻³	2,75	2.0·10 ⁻³	7.0·10 ⁻⁴	3.9·10 ⁻³	84,6

После завершения сорбционного этапа насыщенный сорбент подвергался десорбции, реализуемой традиционным методом с использованием раствора серной кислоты. Этот процесс позволял эффективно высвободить уран из сорбента и подготовить раствор к дальнейшим стадиям обработки. Одновременно был проведён параллельный сравнительный эксперимент, в котором вместо серной кислоты применялся раствор аммиачной селитры.

В ходе эксперимента использовали 100 г сорбента, десорбцию проводили, используя три литра раствора, который готовили путём смешивания 22.8 мл HNO_3 и 360 г аммиачной селитры (NH_4NO_3).

В результате эксперимента полученный раствор имел концентрацию 100 г/л NO_3 при уровне $\text{pH} = 0,7$. Объём, занимаемый 100 г сорбента, составил 250 мл, что определило скорость десорбции на уровне 250 мл/час.

Обобщённые данные по процессу десорбции представлены в таблице 4.6, где видно, что максимальная степень выделения урана из сорбента в раствор достигла 8,2 грамма на один литр.

Таблица 4.6 - Показатели десорбции урана с применением раствора селитры

№ п/п	Объём, мл	pH	SO_4^{2-} , г/л	NO_3^- , г/л	U, г/л	Абс. г
1	220	5,66	8,16	56,9	8,2	1,804
2	220	5,48	6,24	73,48	6,7	1,474
3	220	4,28	5,28	85,9	3,0	0,66
4	220	3,24	4,8	74,5	2,9	0,638
5	220	3,03	4,8	77,0	2,4	0,528
6	220	2,84	13,44	77,4	4,3	0,9718
7	226	2,68	9,12	78,66	5,4	1,188
8	220	2,32	2,88	79,5	4,6	1,012
9	220	1,04	2,76	80,2	4,7	1,0134
10	220	0,92	2,5	82,8	5,0	1,1
11	250	0,67	2,4	82,8	3,3	0,825
12	250	0,54	1,44	83,0	2,0	0,5
13	254	0,5	1,44	83,0	1,2	0,3048
Отмывка $\text{H}_2\text{O}=580$ мл		1,4			0,073	0,04234
Сорбент АМ(п) после десорбции: $U=5.4$ г/кг, процент десорбции 96%.						

Следовательно, доказана возможность извлечения урана из концентрированных солевых растворов, содержащих значительное количество хлоридов. Основная сложность процесса заключается в необходимости испарения

большого объёма воды. Высокие энергетические затраты на перекачивание такой массы жидкости стали причиной предложения использовать образующийся водяной пар для отопления ближайших населённых пунктов.

По результатам исследований проведена разработка схемы-технологии переработки озёрной рапы Сасык-Куль, включающей ключевые стадии: концентрирование путём выпаривания; выщелачивание ценных компонентов; улавливание выделяющихся газов хлороводорода; процессы сорбции и десорбции; осаждение целевых соединений; сушка и окончательная термическая обработка (прокалка) полученного продукта (рисунок 4.9).

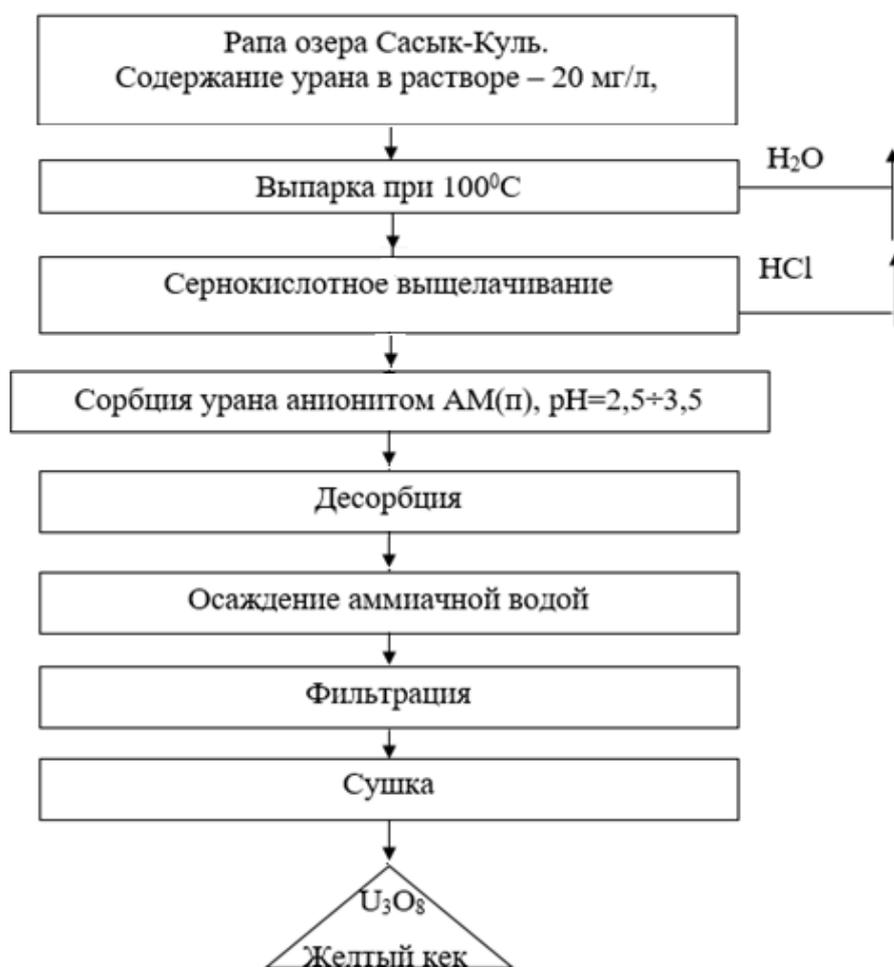


Рисунок 4.9 – Схема-технология переработки озёрной рапы Сасык-Куль с выделением урана [68]

4.5. Закономерности сорбции урана из шахтных и дренажных вод

Природные воды в основном очищают сорбционными методами, чаще всего используя методы ионной или молекулярной сорбции. Адсорбент играет двойную роль: он не только устраняет нежелательные примеси, но и катализирует химические реакции, поскольку процессы на границе фаз развиваются быстрее, чем в жидкой среде. Это объясняется увеличенной концентрацией молекул и ионов на поверхности, их упорядоченным расположением и ослаблением межатомных связей, что способствует активному протеканию реакций.

Хемосорбция, или химическая адсорбция, основана на валентных взаимодействиях, обеспечивающих прочное связывание адсорбируемых веществ с поверхностью сорбента. Её интенсивность возрастает с повышением температуры, поскольку процесс требует значительных затрат энергии активации. Однако, образующиеся соединения не формируют новые вещества, так как поверхностные атомы адсорбента остаются структурно связанными с его материалом.

Граница между физической и химической адсорбцией не всегда бывает очевидной, поскольку одно и то же вещество, поглощаемое одним и тем же адсорбентом, может вести себя по-разному в зависимости от внешних условий. Так, при определённых параметрах среды оно проявляет физическую сорбцию, обусловленную слабым межмолекулярным взаимодействием, тогда как в иных условиях хемосорбция становится преобладающим процессом, основанным на валентных связях между адсорбатом и поверхностью сорбента. На интенсивность этих явлений влияет температура: с её увеличением скорость физической адсорбции уменьшается, поскольку молекулы адсорбата приобретают большую энергию и легче покидают поверхность сорбента.

Анализ кинетических кривых, характеризующих процесс извлечения урана с использованием скорлупы абрикосовых косточек при различных температурах (рисунок 4.10), подтверждает наличие прямой зависимости между

температурой среды и эффективностью сорбции урана. Повышение температуры приводит к увеличению сорбционной способности материала. Для данного процесса была вычислена энергия активации, равная 6,2 кДж/моль.

В ходе сорбции отмечено значительное снижение уровня pH раствора. Этот эффект, наряду с замещением водородных ионов на поверхности сорбента урановыми ионами, указывает на преобладание ионообменного механизма сорбции металлических катионов. Химическая природа данного обменного процесса может быть выражена в следующей реакционной схеме:

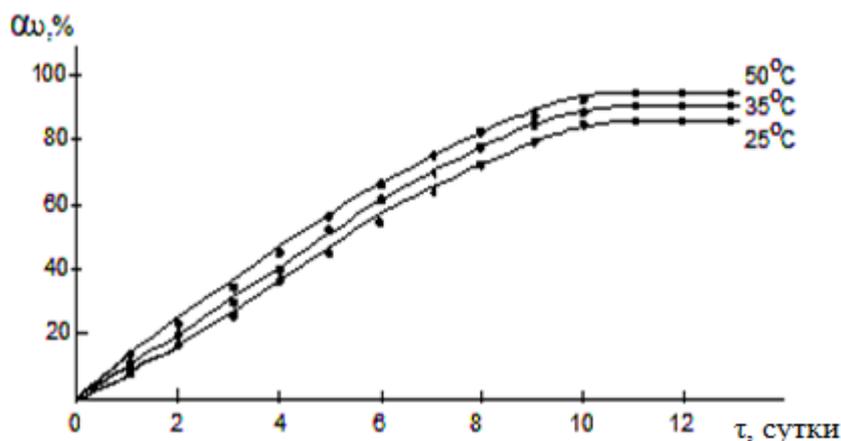
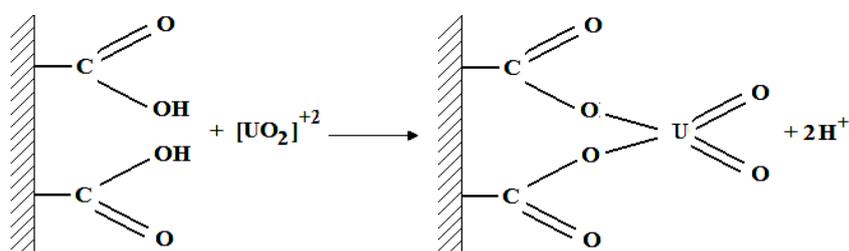


Рисунок 4.10 – Динамика сорбции урановых ионов на биосорбенте из скорлупы абрикосовых косточек (фракции сорбента $\varnothing < 2.0$ мм)

Дополнительное доказательство ионообменного механизма сорбции урановых катионов было получено при проведении путём ИК-спектроскопического анализа скорлупы грецкого ореха до и после контакта с урансодержащим раствором, где получены дополнительные доказательства ионообменного механизма сорбции урановых катионов (рисунок 4.11).

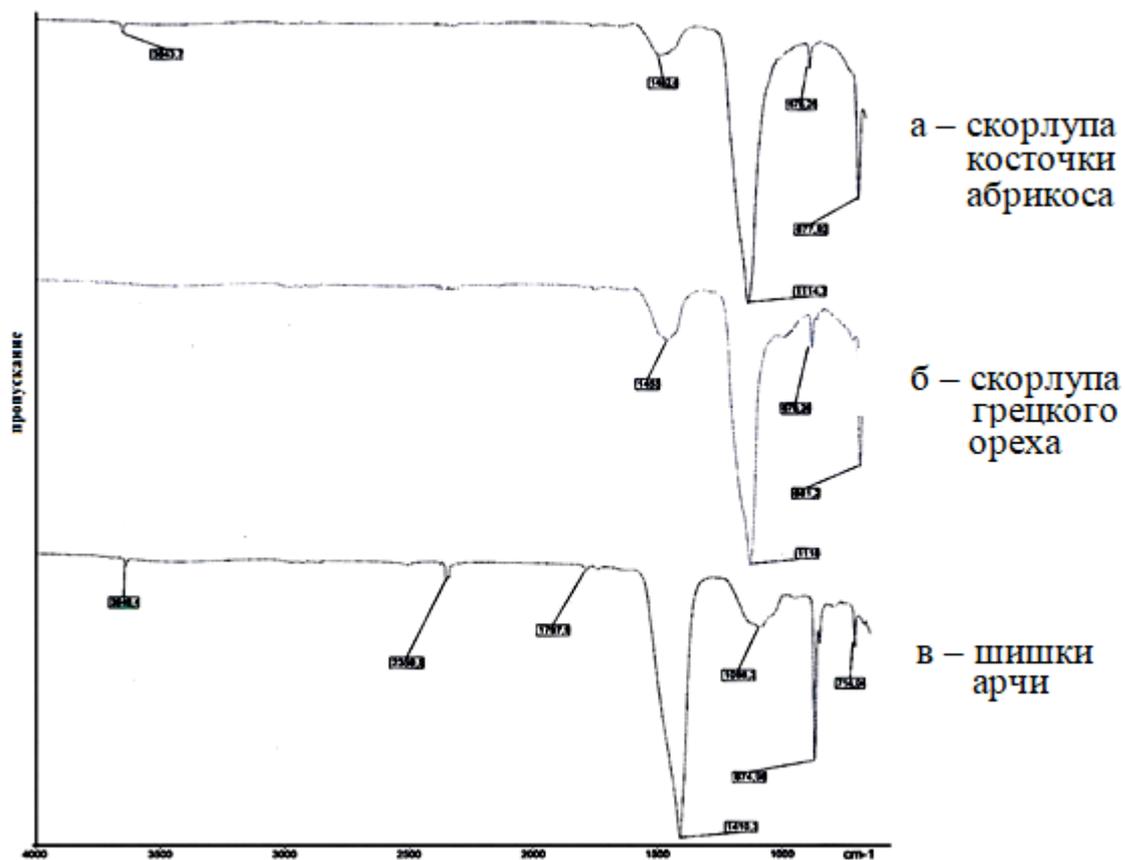


Рисунок 4.11 - Структурные изменения сорбента после нагревания ($T=600^{\circ}\text{C}$): данные ИК-спектроскопии

Различия между спектрами исходного сорбента и модифицированного материала оказались незначительными, однако несколько ключевых особенностей подтвердили процесс химического взаимодействия. Интенсивность полос пропускания, связанных с валентными колебаниями С-Н связей в алифатических структурах, а также присутствие -ОН групп, практически не претерпели изменений. Аналогичная картина наблюдалась и в поглощении карбонильных (-C=O) групп, которое, несмотря на сохранение своей интенсивности, сместилось в низкочастотную область с максимумом в $1620,5 \text{ см}^{-1}$. На основе научных публикаций такое изменение спектральных характеристик интерпретируется как процесс ионизации функциональных групп, сопровождаемый заменой водородного иона на металлический. Этот механизм подтверждает, что сорбция урана осуществляется посредством ионного обмена.

Исследование сорбционных свойств природных материалов показало, что сорбент, изготовленный из шишек арчи, обладает высокой сорбционной ёмкостью (рисунок 4.12), что делает его наиболее перспективным среди изученных образцов.

Установлено, что сорбент из шишек арчи демонстрирует наибольшую эффективность поглощения сравнительно с другими исследованными природными сорбентными материалами, но при этом сорбент из шишек арчи показывает самое длительное время его насыщения - около 90 дней, что значительно превышает соответствующие показатели других материалов (рисунок 4.13).

Как показали результаты, максимальное насыщение сорбента из шишек арчи отмечается после 90-дневного промежутка времени и составляет 10 кг. Сорбент скорлупы косточек абрикоса показывает максимальное насыщение ураном за 12 суток и составляет 11.3 кг, при этом за 90-дневный период сорбент из скорлупы косточек абрикоса, соответственно, показывает лучшие результаты сорбирования урана [240-248].

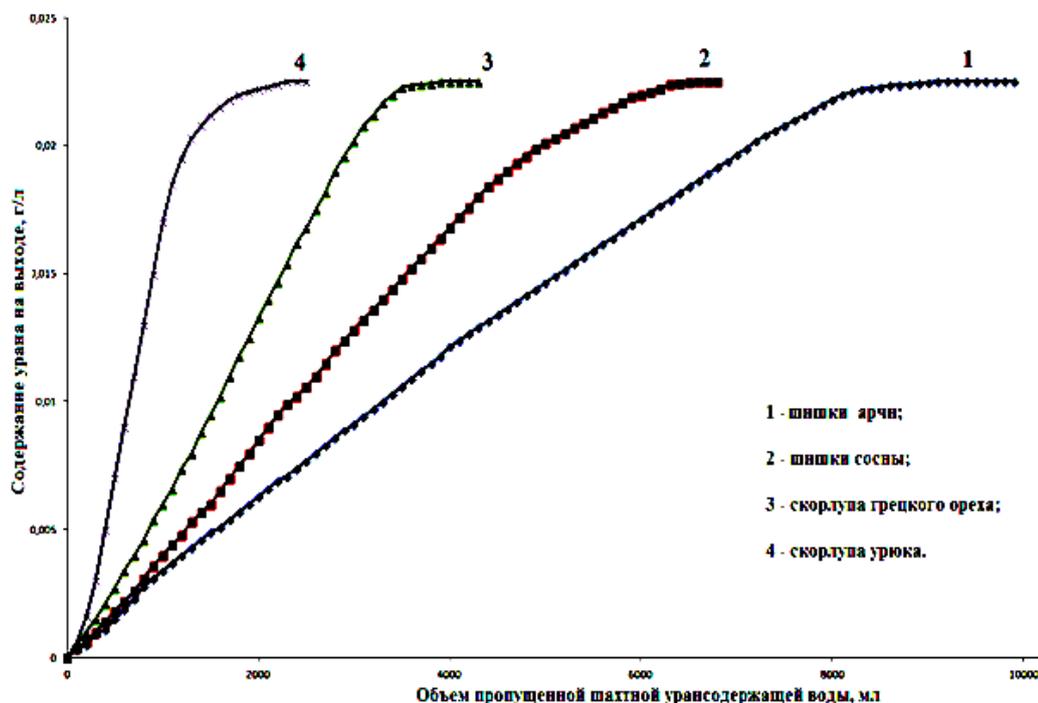


Рисунок 4.12 - Поведение урана в процессе фильтрации через сорбент из растительного сырья в зависимости от объёмов пропущенной воды

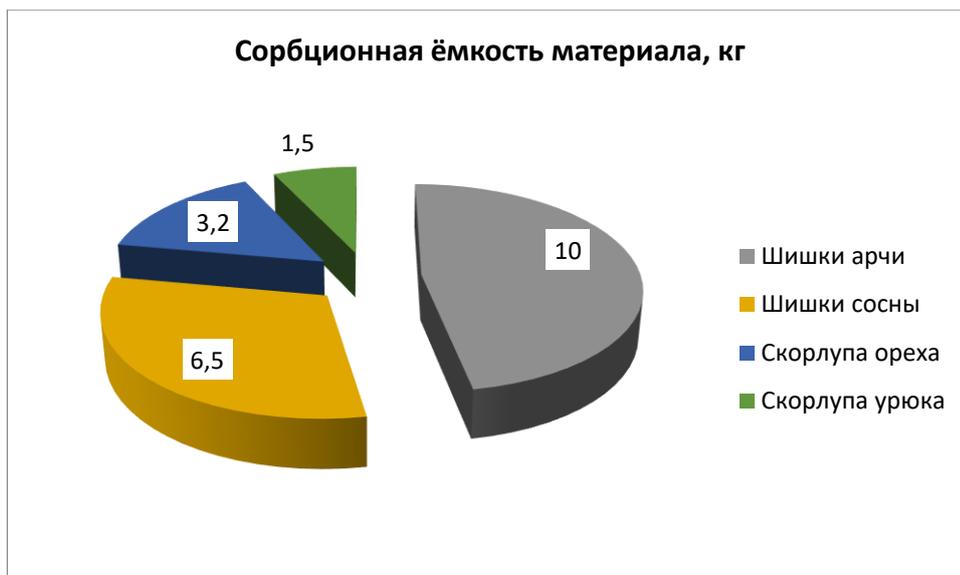


Рисунок 4.13 – Сорбционная ёмкость изученных природных сорбционных материалов

На рисунке 4.14 представлены результаты исследования извлечения урана из ураносодержащих вод сорбцией на различные сорбенты. Как видно из рисунка 4.14, максимальное извлечение урана отмечено из Штольни № 6, г. Табошар (98.2%) при использовании сорбента АМ(п).

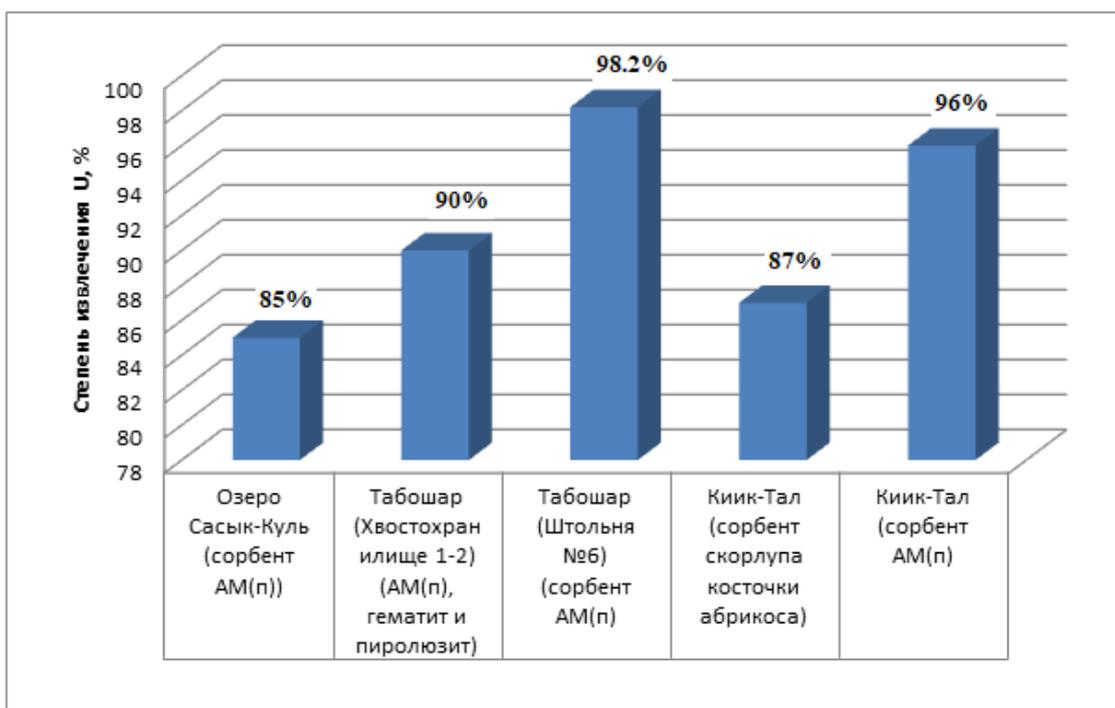


Рисунок 4.14 - Извлечение урана из ураносодержащих вод сорбцией на различные сорбенты

Анализ водных образцов из исследуемых объектов позволил определить концентрацию урана в различных источниках. В озере Сасык-Куль содержание урана составило 0,04 г/л, тогда как в шахтных водах месторождения Киик-Тал этот показатель достиг 0,025 г/л. воды из-под хвостохранилищ I и II (г. Табошар) – 0.01 г/л и из Штольни № 6 (г. Табошар) – 0.002 г/л.

4.6. Исследование сорбционных характеристик скорлупы косточек абрикоса

Скорлупа косточек абрикоса представляет собой доступный и недорогой материал, который образуется как побочный продукт переработки фруктов на консервных предприятиях северного Таджикистана. Ежегодный объём этих отходов исчисляется сотнями тонн, что делает этот ресурс перспективным в сорбционных процессах.

Набухаемость скорлупы установлена на уровне 17%, что влияет на её поглотительные характеристики. Для оптимизации процесса сорбции были проведены целевые эксперименты, результаты которых систематизированы в таблице 4.7 и визуальны представлены в рисунке 4.15.

Таблица 4.7 – Ключевые параметры сорбции урана на биосорбенте из скорлупы абрикосовых косточек ($\tau=5$ ч, Т:Ж=2:300)

№ п/п	pH	V, мл	T, °C	Насыщен- ие U, абс. г	U, мг/л	U, абс.г	Извле- чение U (α), %	% сорб- ции U
Фракции скорлупы косточек абрикоса = 2 мм								
1	8.0/8.4	300/297	20/20	$3.7 \cdot 10^{-4}$	23/22	$6.9 \cdot 10^{-3}/6.5 \cdot 10^{-3}$	1.6	5.3
Фракции скорлупы косточек абрикоса = 1 мм								
2	1,8/1,95	300/295	50/40	$2.7 \cdot 10^{-4}$	24/23	$7.2 \cdot 10^{-3}/6.9 \cdot 10^{-3}$	1.2	3.8
3	8.0/7.7	300/285	20/20	$4.1 \cdot 10^{-4}$	23/22	$6.9 \cdot 10^{-3}/6.5 \cdot 10^{-3}$	1.8	7.4
4	1,8/1,9	300/295	35/35	$2.0 \cdot 10^{-4}$	23/19	$6.8 \cdot 10^{-3}/6.6 \cdot 10^{-3}$	0.9	3.0
5	8.0/7.3	300/290	35/35	$5.5 \cdot 10^{-4}$	23/19	$6.9 \cdot 10^{-3}/6.4 \cdot 10^{-3}$	2.4	8.2
6	1,8/2.0	300/286	20/20	$5.0 \cdot 10^{-5}$	24/24	$7.2 \cdot 10^{-3}/7.2 \cdot 10^{-3}$	0.2	0.7

Продолжение таблицы 4.7

7	8,0/7,2	300/294	50/40	$6.9 \cdot 10^{-4}$	23/18	$6.9 \cdot 10^{-3}/6.2 \cdot 10^{-3}$	3.0	10.0
8	3,7/4,4	300/293	50/40	$1.04 \cdot 10^{-3}$	24/24	$6.9 \cdot 10^{-3}/5.9 \cdot 10^{-3}$	4.5	15.1
9	3,75/4,4	300/294	20/20	$6.0 \cdot 10^{-4}$	23/22	$6.9 \cdot 10^{-3}/6.3 \cdot 10^{-3}$	2.6	8.7
10	3,75/5,2	300/294	35/35	$7.0 \cdot 10^{-4}$	23/20	$6.9 \cdot 10^{-3}/6.2 \cdot 10^{-3}$	3.0	10.1
Фракции скорлупы косточек абрикоса = 0.5 мм								
11	1,8/2,1	300/295	50/40	$4.5 \cdot 10^{-4}$	35/30	$9.2 \cdot 10^{-3}/8.7 \cdot 10^{-3}$	2.0	4,9
12	8,0/7,9	300/288	20/20	$5.5 \cdot 10^{-4}$	22/21	$6.5 \cdot 10^{-3}/6.0 \cdot 10^{-3}$	2.4	8,5
13	1,8/2,5	300/296	35/35	$3.3 \cdot 10^{-4}$	35/30	$9.2 \cdot 10^{-3}/8.8 \cdot 10^{-3}$	1.4	3,6
14	8,0/8,1	300/295	35/35	$7.0 \cdot 10^{-4}$	22/20	$6.5 \cdot 10^{-3}/5.8 \cdot 10^{-3}$	3.0	10,9
15	1,8/1,8	300/294	20/20	$1.8 \cdot 10^{-4}$	35/35	$9.2 \cdot 10^{-3}/9.0 \cdot 10^{-3}$	0.8	2,0
16	8,0/8,2	300/295	50/40	$9.0 \cdot 10^{-4}$	22/19	$6.5 \cdot 10^{-3}/5.6 \cdot 10^{-3}$	3.9	14,0
17	3,7/4,2	300/295	50/40	$14.4 \cdot 10^{-4}$	23/18	$6.5 \cdot 10^{-3}/5.3 \cdot 10^{-3}$	6.3	21,3
18	3,7/4,2	300/295	20/20	$11.4 \cdot 10^{-4}$	23/18	$6.5 \cdot 10^{-3}/5.3 \cdot 10^{-3}$	5.0	17,6
19	3,7/4,3	300/295	35/35	$12.9 \cdot 10^{-4}$	23/18	$6.5 \cdot 10^{-3}/5.2 \cdot 10^{-3}$	5.6	20,0
Фракции скорлупы косточек абрикоса = 0.25 мм								
20	1,8/1,9	300/289	50/40	$9.0 \cdot 10^{-4}$	21/18	$6.2 \cdot 10^{-3}/5.2 \cdot 10^{-3}$	3.9	15,4
21	7,8/8,0	300/298	20/20	$10.0 \cdot 10^{-4}$	22/19	$6.6 \cdot 10^{-3}/5.6 \cdot 10^{-3}$	4.3	15,2
22	1,8/2,3	300/294	35/35	$9.0 \cdot 10^{-4}$	21/18	$6.2 \cdot 10^{-3}/5.2 \cdot 10^{-3}$	3.9	14,9
23	7,8/8,1	300/295	35/35	$13.0 \cdot 10^{-4}$	22/18	$6.6 \cdot 10^{-3}/5.3 \cdot 10^{-3}$	5.7	20,4
24	1,8/1,88	300/297	20/20	$8.0 \cdot 10^{-4}$	21/18	$6.2 \cdot 10^{-3}/5.3 \cdot 10^{-3}$	3.5	13,1
25	7,9/8,3	300/292	50/40	$17.0 \cdot 10^{-4}$	22/17	$6.6 \cdot 10^{-3}/4.9 \cdot 10^{-3}$	7.4	25,7
26	3,8/4,4	300/295	50/40	$35.0 \cdot 10^{-4}$	22/11	$6.6 \cdot 10^{-3}/3.1 \cdot 10^{-3}$	15.2	53,1
27	3,8/4,2	300/297	20/20	$27.0 \cdot 10^{-4}$	22/13	$6.6 \cdot 10^{-3}/3.9 \cdot 10^{-3}$	11.7	41,5
28	3,8/4,7	300/295	35/35	$29.0 \cdot 10^{-4}$	22/13	$6.6 \cdot 10^{-3}/3.7 \cdot 10^{-3}$	12.6	44,2

Зависимость сорбции урана от уровня pH среды имеет выраженный экстремальный характер, при этом наибольшая эффективность поглощения наблюдается при уровне pH = 3,65.

В кислых растворах уран, как правило, присутствует в форме комплекса $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$, который преимущественно сорбируется на анионообменных смолах, особенно при значениях pH ниже 2. Однако при высокой кислотности возрастает конкурентная сорбция серной кислоты, что существенно снижает

сорбционную способность материала по отношению к урану. Исходя из этого, процесс сорбции урана наиболее эффективно протекает при повышенных значениях pH, когда негативное влияние конкурентного поглощения серной кислоты минимально.

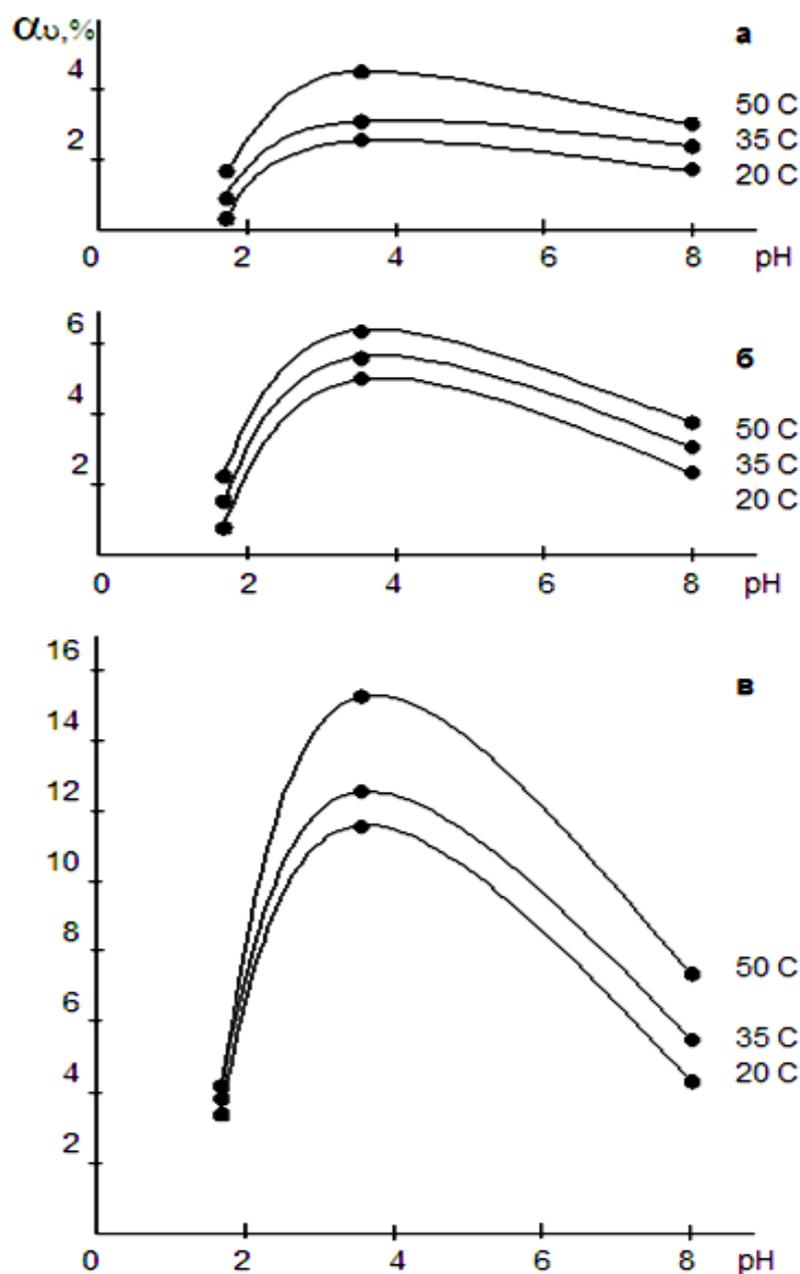


Рисунок 4.15 – Влияние уровней pH и фракций скорлупы косточек абрикоса на извлечение урана: а) \varnothing 1.0 мм; б) - \varnothing 0.5 мм; в) \varnothing 0.25 мм

Рост температуры раствора и измельчение скорлупы косточек абрикоса способствуют повышению эффективности извлечения урана.

Для исследования динамики сорбционного процесса применялся раствор с $pH = 3,9$ и концентрацией урана 23 мг/л. Он пропусклся через слой измельчённой скорлупы абрикосовых косточек (масса 20 г, размер частиц $d = 1$ мм) при стабильной скорости 100 мл/час на протяжении 25 часов. По завершении эксперимента содержание урана в сорбенте достигло 1,72 кг/т, что в абсолютных значениях составляет 34,4 мг.

Первоначальное соединение и итоговый продукт были исследованы методом спектрального анализа с применением лабораторного аналитического оборудования "Спектроскан". Итоги исследования представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Сравнительный анализ химического состава сорбента до и после сорбции (экспериментальные данные)

Элементы	Сорбент перед сорбцией		Сорбент после сорбции	
	Значение ($n \cdot 10^{-4}$), %	Ошибка, %	Значение ($n \cdot 10^{-4}$), %	Ошибка, %
Ni	11,03	3,39	446,24	8,30
V	9,72	19,31	156,01	29,80
Sr	61,71	3,55	4009,10	45,18
Co	-3,88	3,12	176,52	6,14
Cr	47,66	10,43	120,25	17,96
Pb	44,33	11,54	-559,25	14,88
Cu	1,36	2,90	416,48	7,73
Ti	-1591,2	0,03	1084,30	0,04
As	14,19	2,24	190,18	3,55
Mn	175,31	17,96	323,43	28,48
Zn	46,02	2,72	359,72	6,09
Fe	3851,40	0,01	26995,00	0,03
Примечание: элементы Sr и V измерялись в мг/кг. В полученном продукте (скорлупа косточек абрикоса) после обжига содержание U = 1,78%.				

На следующем этапе исследования сорбции урана на сорбенте из скорлупы абрикосовых косточек проводился анализ зависимости эффективности извлечения урана от скорости потока раствора. Обобщённые результаты данного эксперимента представлены в рисунке 4.16.

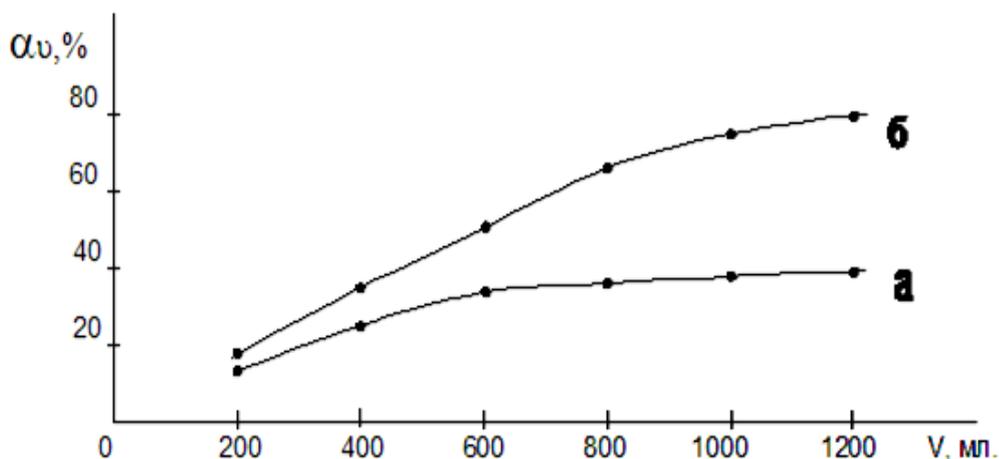


Рисунок 4.16 – Влияние скорости объёмов растворов, пропущенных через сорбент на сорбцию урана при постоянных условиях ($t=25^\circ\text{C}$, $\text{pH}=3,7$, размер фракций сорбента 1.0 мм): а) 100 мл/ч; б) 100 мл/сутки

Анализ процесса извлечения урана из шахтных и промышленных вод при разных уровнях pH (таблица 4.9) демонстрирует высокий коэффициент сорбции при уровнях $\text{pH} = 8,0$ и $\text{pH} = 3,7$. В то же время при $\text{pH} = 1,8$ эффективность сорбции остается низкой. В диапазоне $\text{pH} 7-8$ на выходе из колонки возможно удаление сорбционного материала, поскольку в этом интервале достигается его максимальное насыщение ураном.

Уран извлекается максимально при выдержке сорбента в растворе на протяжении 10–12 суток. В исследуемом диапазоне pH при 25°C окружающей среды эффективность процесса повышается от 5,2% (при уровне pH равном 1.8) до 86,9% (при уровне pH равном 8.0).

Таблица 4.9 - Сорбция урана на сорбент скорлупу косточек абрикоса в динамическом режиме и технологических параметрах: ($t=25^{\circ}\text{C}$, размер фракций сорбента 1.0 мм, масса сорбента 20 г, объём раствора 100 мл/сутки, $U=23$ мг/л)

Время сорбции (сутки)	pH на выходе	U, мг/л	U, абс. г	Насыщение ураном сорбента, абс. г	Извлечение U, %	Процент сорбции, U
pH на входе 8.0						
1	5,0	3.2	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$19.8 \cdot 10^{-4}$	8,6	86,1
2	5,6	1.1	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$21.9 \cdot 10^{-4}$	18,1	95,22
3	5,72	1.57	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$21.4 \cdot 10^{-4}$	27,4	93,04
4	6,6	1.57	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$21.4 \cdot 10^{-4}$	36,7	93,04
5	6,95	1.57	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$21.4 \cdot 10^{-4}$	46,0	93,04
6	7,35	2.1	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$20.9 \cdot 10^{-4}$	55,1	90,86
7	7,35	3.15	$3.15 \cdot 10^{-4}$	$19.8 \cdot 10^{-4}$	63,7	86,30
8	7,35	3.15	$3.15 \cdot 10^{-4}$	$19.8 \cdot 10^{-4}$	72,3	86,30
9	7,1	4.2	$4.2 \cdot 10^{-4}$	$18.5 \cdot 10^{-4}$	80,4	80,43
10	7,25	9.47	$9.5 \cdot 10^{-4}$	$13.5 \cdot 10^{-4}$	86,3	41,17
11	7,65	21.5	$21.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	86,9	6,52
12	7,4	23	$23 \cdot 10^{-4}$	0	-	0
pH на входе 3.7						
1	4,25	7.5	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$20.9 \cdot 10^{-4}$	9	90,86
2	4,26	6.5	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$21.9 \cdot 10^{-4}$	18,6	95,21
3	4,26	8.5	$8.5 \cdot 10^{-4}$	$20.9 \cdot 10^{-4}$	27,7	90,86
4	4,24	10.8	$10.8 \cdot 10^{-4}$	$19.9 \cdot 10^{-4}$	36,3	86,52
5	4,24	11.5	$11.5 \cdot 10^{-4}$	$17.8 \cdot 10^{-4}$	44,1	77,39
6	4,07	14.5	$14.5 \cdot 10^{-4}$	$17.8 \cdot 10^{-4}$	51,8	77,39
7	3,97	17.0	$17 \cdot 10^{-4}$	$16.7 \cdot 10^{-4}$	59,1	72,61
8	3,87	17.5	$17.5 \cdot 10^{-4}$	$14.6 \cdot 10^{-4}$	65,4	63,47

Продолжение таблицы 4.9

9	3,87	18.8	$18.8 \cdot 10^{-4}$	$14.1 \cdot 10^{-4}$	71,6	61,30
10	3,86	19.5	$19.5 \cdot 10^{-4}$	$10.4 \cdot 10^{-4}$	76,1	45,21
11	3,85	19.0	$19.0 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-4}$	79,3	31,74
12	3,84	21.4	$30 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-4}$	81,5	22,6
рН на входе 1.8						
1	1,86	24.0	$24.0 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$	3,5	25,0
2	1,82	29.5	$29.5 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	4,6	7,81
3	2,0	30.5	$30.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	5,2	4,7
4	1,75	32.0	$32.0 \cdot 10^{-4}$	0	-	0
5	1,75	32.0	$32.0 \cdot 10^{-4}$	0	-	0

Кинетические кривые процесса сорбции урана при 25–50°C обладают параболической зависимостью (рисунок 4.17) и могут быть описаны уравнением Ерофеева-Колмогорова:

$$d\alpha/dt = K \cdot (1 - \alpha),$$

здесь:

- α – коэффициент извлечения урана, %;
- τ – временной параметр, сутки;
- K – константа скорости сорбции, сутки⁻¹.

После проведения несложных математических преобразований указанное уравнение можно представить в измененной форме:

$$\lg(1 - \alpha) = K\tau/2.3.$$

Графическая зависимость $\lg(1 - \alpha)$ от временного параметра демонстрирует линейные отрезки с отрицательным наклоном, который численно соответствует величине $K/2,3$. Энергия активации сорбционного процесса урана определена методом анализа тангенса угла наклона прямой корреляции между $\lg K$ и обратной величиной температуры $1/T$ (рисунок 4.18). Причем при различных значениях уровней рН среды наблюдается увеличение энергетической

характеристики сорбционного процесса – энергии активации от 6.0 до 13.0 кДж/моль (таблица 4.10).

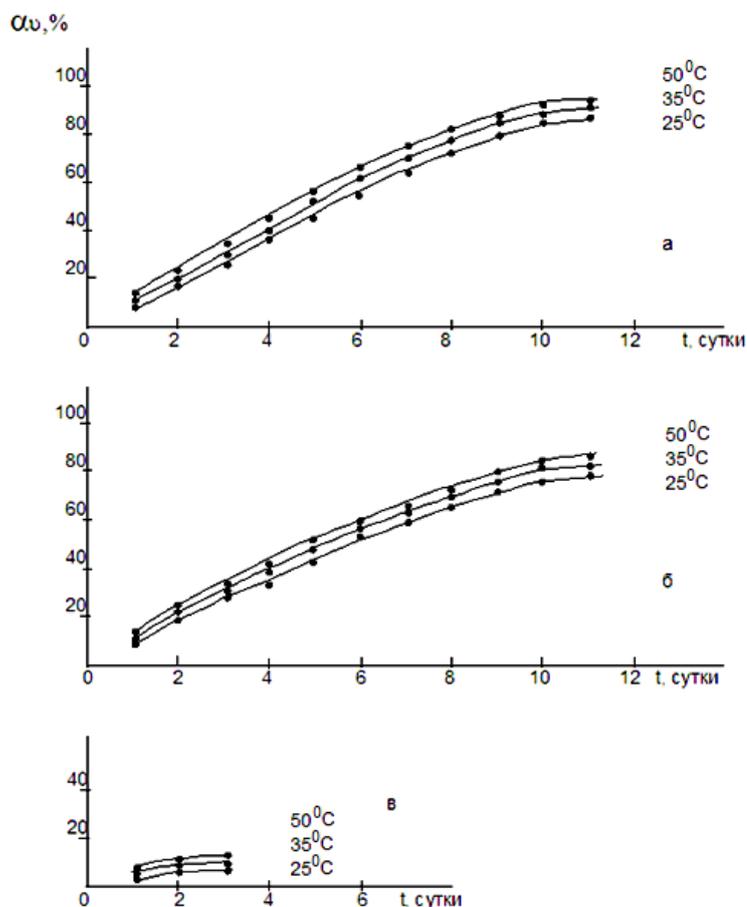


Рисунок 4.17 – Влияние уровней рН на сорбцию урана сорбентом скорлупы косточек абрикоса (постоянные параметры – скорость 100 мл/сутки, фракции сорбента \varnothing 1.0 мм): а) рН=8.0; б) 3.7; в) 1.8

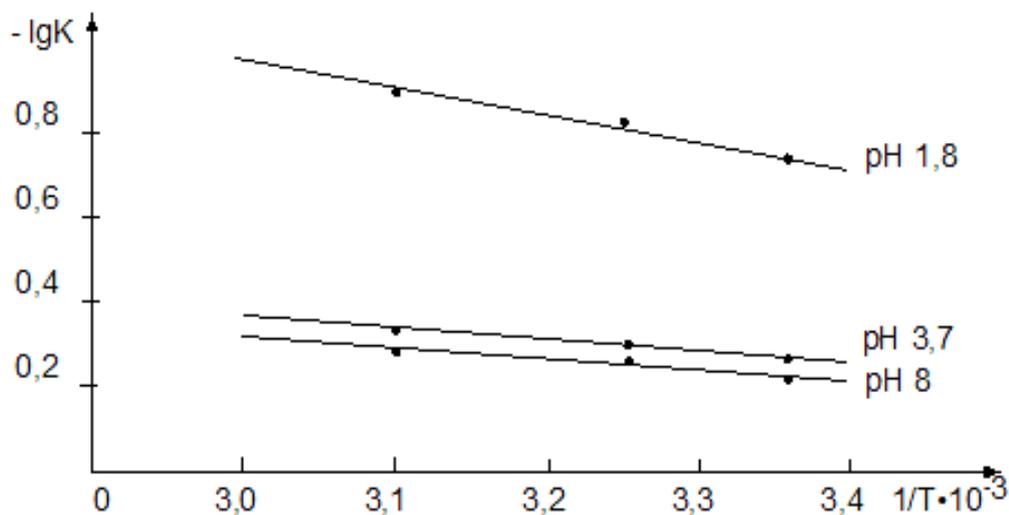


Рисунок 4.18 – Влияние обратной величины температуры $1/T$ на величину lgK в сорбционном процессе

Следующим, заключительным этапом данного исследования явилось создание схемы-технологии, описывающей технологические этапы сорбции урана из состава ураносодержащих вод месторождения Киик-Тал Таджикистана на сорбент скорлупы косточек абрикоса (рисунок 4.19).

Таблица 4.10 - Кинетические и энергетические характеристики процесса сорбции урана на сорбенте – скорлупе косточек абрикоса при постоянных параметрах: масса сорбента 20 г, размер фракций 1 мм; объём раствора 100 мл/сутки; $U=23$ мг/л

рН	Температура раствора	Истинная сорбционная скорость U (г·л ⁻¹ ·1сутки ⁻¹)	Энергия активации процесса (кДж/моль)
8,0	298 K	0,51	6,2
	308 K	0,55	
	323 K	0,60	
3,7	298 K	0,47	6,6
	308 K	0,51	
	323 K	0,55	
1,8	298 K	0,12	13,3
	308 K	0,14	
	323 K	0,18	

Разработанная схема-технология включает несколько ключевых этапов, обеспечивающих эффективное извлечение урана из шахтных вод;

- на начальном этапе уран поглощается сорбционным материалом, способным селективно связывать его соединения;

- далее насыщенный сорбент подвергается термическому обогащению, где обработанная скорлупа абрикосовых косточек служит эффективным адсорбентом;

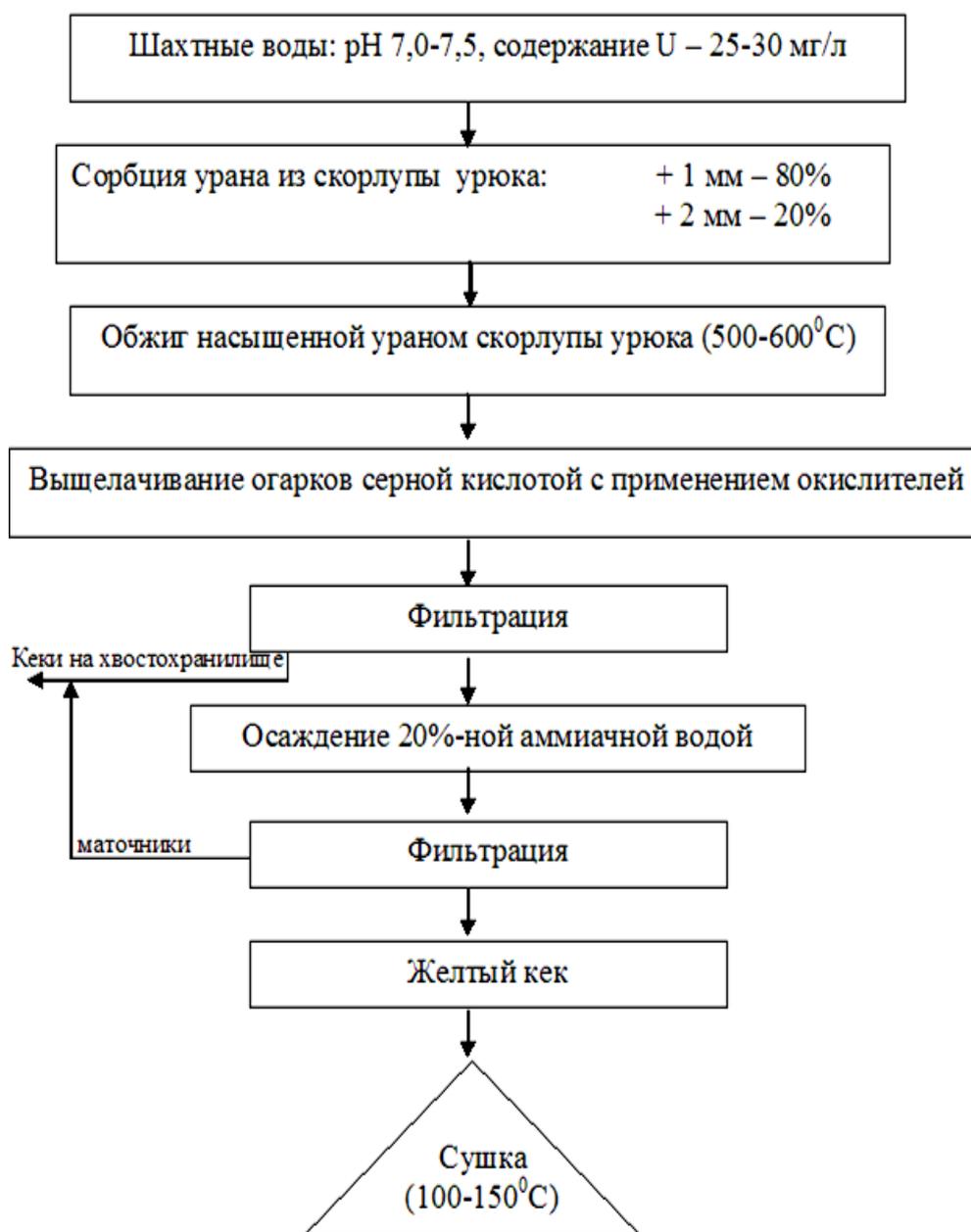


Рисунок 4.19 – Процесс извлечения урана вод месторождения Киик-Тал на сорбенте из скорлупы абрикосовой косточки: схема технологии

- кислотное разложение образовавшегося остатка с добавлением окислителей, что способствует высвобождению урановых соединений в раствор;
- затем происходит осаждение урана, формируя его устойчивые соединения в осадочной форме;
- завершающий этап включает дегидратацию, обеспечивающую получение концентрированного конечного продукта.

Что касается физико-химических характеристик шахтных вод, они имеют концентрацию урана 25–30 мг/л, pH 7,0–7,5 и скорость потока 4,0–5,0 м³/час.

Температурные условия процесса: проведение сорбции не требует искусственного подогрева, так как раствор сохраняет температуру окружающей среды. Оптимальные условия достигаются в летний период, когда температура жидкости составляет 25–30°С. В холодное время года для ускорения процесса рекомендуется предварительный нагрев до аналогичных параметров.

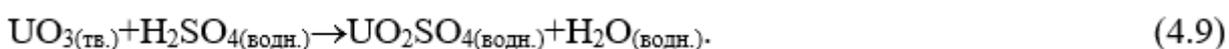
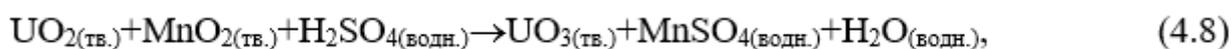
Подготовка сорбционного материала: перед применением сорбент проходит предварительную обработку, включающую дробление скорлупы абрикосовых косточек для получения равномерной фракции. В результате:

- размер более 1 мм имеют около 80% частиц, обеспечивая необходимую активную площадь поверхности для эффективной сорбции;
- размер менее 1 мм имеют около 20% частиц.

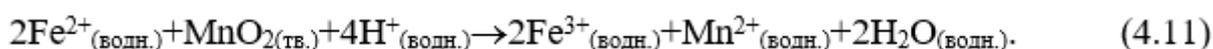
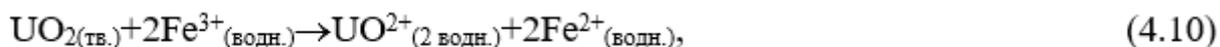
Полученный измельченный материал загружается в сорбционную колонну, через которую осуществляется непрерывная фильтрация заданного объема раствора. Очищенные маточные жидкости, концентрация урана в которых не превышает предельно допустимых значений (ПДК), могут использоваться для нужд хозяйственно-бытового назначения.

Термическая обработка и сорбция урана: после полного насыщения сорбционный материал подвергался сушке в электрической муфельной печи с одновременным термообжигом, проводимым при температуре 500°С, обеспечивающей полное выгорание органических компонентов. Формирующиеся шлаковые соединения оксида урана затем подвергались кислотному выщелачиванию, где ключевым реагентом выступала серная кислота с добавлением окислителей, таких как азотная кислота, пиролюзит и трехвалентное железо.

Механизмы химических реакций между пиролюзитом и диоксидом урана представлены следующими уравнениями:



Процесс химического взаимодействия между пиролюзитом и ураном протекает с низкой скоростью, однако присутствие ионов железа значительно ускоряет его. Эти ионы выполняют роль переносчиков кислорода, способствуя более эффективному протеканию реакции. Уравнения данных химических реакций выглядят следующим образом:



Фильтрация и осаждение урана:

Температурные параметры и продолжительность сорбции подбираются на основе экспериментальных данных. После завершения этапа выщелачивания твердые остатки (шлам) проходят процесс фильтрации на различных фильтр-прессах, что позволяет отделить жидкую фазу от твёрдых частиц. Очищенный фильтрат (регенерат) направляется в реактор с механической мешалкой, тогда как шламовые отходы подлежат утилизации в хвостохранилище.

В ходе последующей реакции в регенерат урана постепенно вводят аммиачную воду, активно перемешивая раствор. Это способствует осаждению урановых соединений, что повышает эффективность их выделения. Завершающим этапом является финальная фильтрация с применением рамных фильтр-прессов, позволяющая удалить остаточные примеси.

Маточные растворы после фильтрации направляются в хвостохранилище, тогда как полученный жёлтый кек загружается на термообработку в печи, что приводит к образованию стабильного соединения урана U_3O_8 .

Процесс десорбции урана:

В ходе экспериментального исследования насыщенный сорбент массой 30 г был разделен на три отдельных образца по 10 г каждый. В качестве десорбирующего раствора использовалась смесь кислот следующего состава: H_2SO_4 - 39,2 г/л, HNO_3 - 6,38 г/л.

Детализированные результаты эксперимента представлены в таблице 4.11.

Термообработка сорбционного материала и его насыщение ураном: сорбент массой 10 г подвергался термической обработке при $T=500^{\circ}\text{C}$ в муфельной печи в течение 1 часа. По окончании процесса получено 0,26 г жёлтого порошка с содержанием урана 83,9% (жёлтый кек).

Эффективность сорбции была подтверждена лабораторными исследованиями, согласно которым сорбционный материал на основе скорлупы косточки абрикоса способен аккумулировать 1,2–1,7 кг/т урана, что эквивалентно среднему содержанию данного элемента в природных урановых рудниках.

Таблица 4.11 - Анализ выхода урана при десорбции из насыщенного сорбента

Объем (мл/час)	Концентрация урана (мг/л)	U, абс. г	Содержание на сор- бенте U (после десорбции), %
Десорбция в колонне (динамический режим)			
27.5	23.0	$6.3 \cdot 10^{-4}$	-
28.0	500	$14.0 \cdot 10^{-4}$	-
32.0	400	$1.18 \cdot 10^{-2}$	-
50 (отмывка водой)	9.0	$4.5 \cdot 10^{-4}$	н/о
Десорбция с перемешиванием в течение 2 часов			
41.5	229	$9.5 \cdot 10^{-3}$	-
49.0	4.03	$2.11 \cdot 10^{-3}$	-
29 (отмывка H_2O)	10.0	$2.9 \cdot 10^{-4}$	0,005

Главная задача предложенного метода - обеспечение очистки урансодержащих вод в труднодоступных горных районах Таджикистана без необходимости строительства дорогостоящих производственных мощностей.

Технологические направления дальнейшей переработки сорбента: после насыщения ураном сорбционный материал транспортировался на гидрометаллургическое предприятие, где его переработка осуществляется одним из двух вариантов.

Вариант I: Вариант I: Метод десорбции урана и его последующая адсорбция на полимерной смоле включают ряд последовательных этапов, обеспечивающих максимальную эффективность извлечения целевого компонента:

- на первом этапе проводится обработка насыщенного сорбента, где урансодержащий материал подвергается воздействию сернокислого регенерационного раствора, содержащего H_2SO_4 и HNO_3 в концентрации 0,400–0,500 г/л. Такая химическая обработка способствует эффективной десорбции;

- адсорбция урана: полученный регенерат поступает в адсорбционный процесс с использованием ионообменной смолы АМ(п), который проводится при температуре 30–40°C и рН 2,4–2,6, создавая оптимальные условия для сорбции;

- следующий этап начинается с насыщения смолы АМ(п), обеспечивающей адсорбцию урана в пределах 100–120 кг/т.

После этого осуществляется десорбция, в ходе которой урановые соединения высвобождаются из сорбента с помощью сернокислого реагента, способствующего переводу урана в растворенную форму. На заключительном этапе обработанный раствор проходит контрольную фильтрацию, что позволяет удалить примеси и получить очищенный концентрированный регенерат. Затем в раствор добавляют 20%-ный аммиачный раствор, приводя рН к диапазону 7,5–8,0, что способствует формированию осадка.

Вариант II: Высокотемпературная обработка и кислотное извлечение.

Процесс включает несколько последовательных этапов, направленных на концентрирование и выделение урана из исходного материала:

- термическая обработка: урансодержащая скорлупа с концентрацией 0,12–0,17% (1,2–1,7 кг/т) подвергается обжигу в специализированных печах

при 550–600°C, где органические компоненты разлагаются и концентрация урана увеличивается;

- концентрирование урана: после термообработки объём исходного материала сокращается в 40–50 раз, а концентрация урана увеличивается до 7–8% (70–80 кг/т), что делает процесс более эффективным;

- кислотное разложение: полученная зола растворяется в серной кислоте при температуре 50°C, затем нейтрализуется известняком, стабилизируя рН на уровне 2,4–2,6;

- фильтрация и утилизация: образовавшийся осадок (кек) фильтруется, многократно промывается чистой водой, а затем направляется в хвостохранилище для безопасного хранения отходов;

- заключительная обработка: полученный регенерат проходит финальное осаждение с введением 20%-ного аммиачного раствора, затем проходит фильтрацию, выделяя жёлтый кек, подготовленный для дальнейшей переработки и получения чистых урановых соединений;

- оставшиеся маточные растворы утилизируются в хвостохранилище.

Оба варианта позволяют эффективно перерабатывать насыщенную ураном скорлупу, обеспечивая извлечение урана для последующей переработки.

4.7. Заключение по главе 4

В главе 4 рассмотрены различные сорбционные методы выделения урана из растворов и урансодержащих вод Таджикистана. По анализу представленных данных можно сделать следующие выводы:

1. Использование анионита типа АМ(п) эффективно при сернокислотном выщелачивании урана, где уран присутствует в виде комплексных анионов. Оптимальная скорость подачи раствора составляет 12,3 мл/мин и позволяет достичь 99-процентного уровня сорбции урановых соединений. Десорбция насыщенного сорбента проводится с применением 15%-ного раствора сер-

ной кислоты при $T=50-60^{\circ}\text{C}$, обеспечивая 99.4-процентный уровень десорбции. Осаждение урановых соединений посредством аммиачной воды позволяет получить высокочистый диуранат аммония.

2. Исследованы сорбционные свойства углей месторождения Фан-Ягноб. Применение термообработанных углей эффективно для извлечения урана из шахтных вод, обеспечивая степень извлечения урана на уровне 90-95%. Обжиг насыщенного ураном сорбента и последующее выщелачивание серной кислотой с применением окислителей позволяют выделить уран в форме закиси-окиси (U_3O_8).

3. Проведены опыты по сорбции урана из шахтных вод. В качестве сорбента использован микрогель, полученный из пектиновых полисахаридов, извлечённых из корзинок подсолнечника. Метод демонстрирует высокую степень извлечения урана (90-95%) при pH 7. Обжиг насыщенного сорбента позволяет получить золу с высоким содержанием урана, который далее извлекается традиционными методами.

4. Исследована перспективность извлечения урана из озёрной рапы оз. Сасык-Куль. Анализ технологии показал, что сорбционные методы малоэффективны из-за высокого содержания хлорид-ионов. Однако применение осаждения урана гидратами железа и титана позволило достичь степени осаждения 87,5% и 99% соответственно. Для окончательной оценки экономической целесообразности данного подхода необходимы дополнительные исследования.

5. Проведённые лабораторные испытания по изучению сорбционных свойств измельчённой скорлупы косточек абрикоса позволили определить параметры технологического процесса и оптимизировать их. В частности, уровень сорбции урана при уровне pH 8.0 достигает 86.9 процентов. Метод отличается низкими затратами и возможностью применения в удалённых районах. Варианты переработки насыщенной ураном скорлупы включают обжиг с последующим растворением урана или десорбцию с использованием серно-кислотных растворов.

Таким образом, исследованные сорбционные методы позволяют эффективно выделять уран из различных источников. Наиболее перспективными являются ионообменная сорбция на смолах, использование термообработанных углей и применение природных сорбентов, таких как микрогель и скорлупа урюка. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию процессов и их адаптацию к промышленному применению.

ГЛАВА 5. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРОИЗВОДСТВ УРАНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ИЗ РУД

5.1. Исследование радиологической ситуации уранового хвостохранилища Дегмай Республики Таджикистан

Проблемы образования радиоактивных отходов при добычи урана, радиоэкологического мониторинга, рекультивации загрязненных территорий в мире и Центральной Азии обсуждены в публикациях [249–270].

В источниках [271–274] проведён анализ наблюдений за состоянием хранилищ урановых отходов, располагающихся на территории Таджикистана. В работе [271] представлены паспорта всех урановых хвостохранилищ Таджикистана. В работах [272, 273] дана оценка потенциальной радиационной опасности урановых хвостохранилищ республики. В исследовании [274] представлены результаты радиационного мониторинга хвостохранилища Дегмай и его ближайшего населённого пункта - посёлка Гозиён. В работе [272] также рассмотрена радиационная опасность урановых объектов для населения г. Истиклол (Республика Таджикистан).

Характеристика участка Дегмай

Хвостохранилище Дегмай расположено на севере Таджикистана и относится к бывшему рудообогатительному комбинату в г. Чкаловск (ныне г. Бустон).

Объект эксплуатировался с 1963 по 1999 год. Расположение хвостохранилища и пульпопровода представлено на рисунке 5.1.

В настоящей работе изучена радиационная ситуация на хвостохранилище Дегмай [275]. Исследования включали характеристики полевых, геосферных и биосферных условий на объектах наследия, кроме того проводился мониторинг и замеры следующих показателей:

- мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы (МАЭД – гамма фон);
- концентрации радона в атмосферном воздухе;
- концентрации радона в помещениях.

МАЭД на территории хвостохранилища Дегмай приведены на рисунке

5.2.

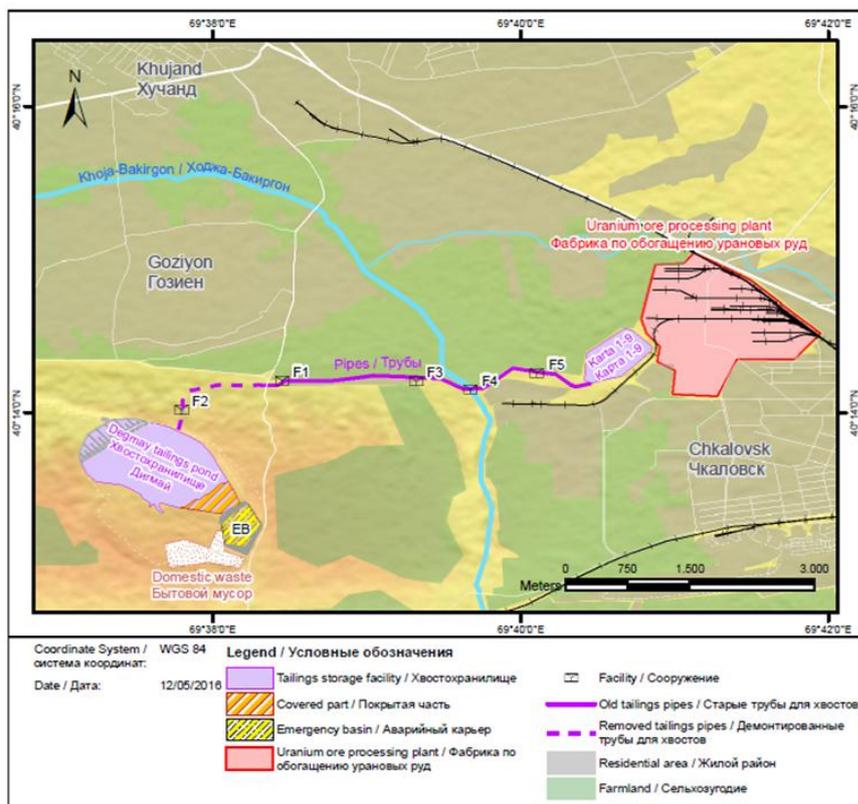


Рисунок 5.1 - Хвостохранилище Дегмай

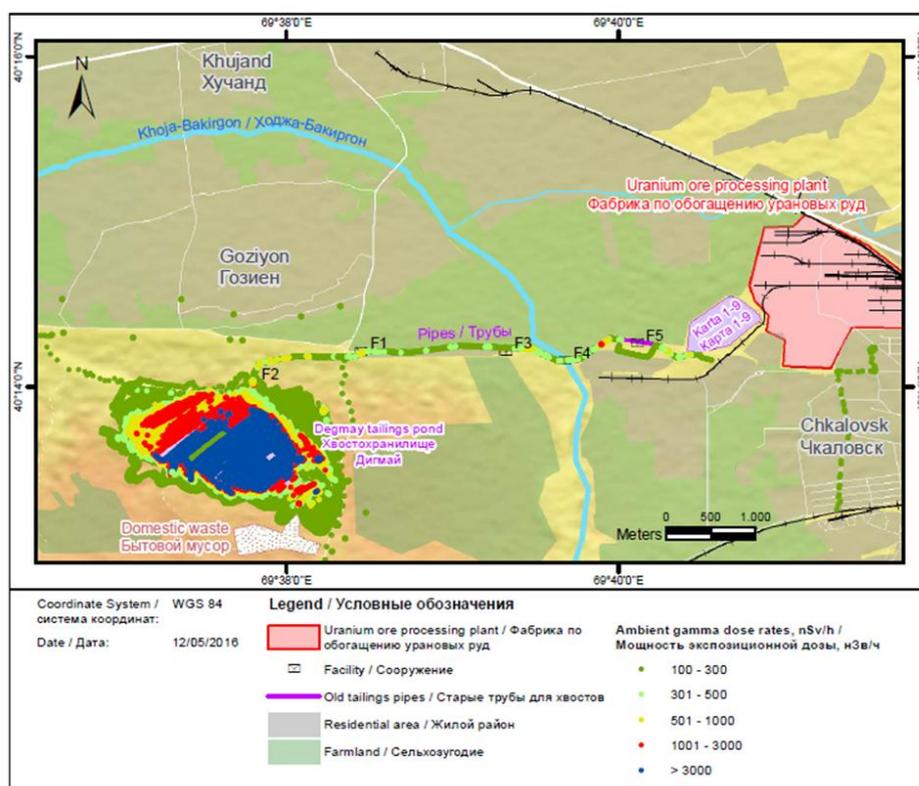


Рисунок 5.2 - МАЭД на хвостохранилище Дегмай

Мониторинг МАЭД (мощности амбиентной эквивалентной дозы) проводился на всей территории хвостохранилища и прилегающих участках до достижения естественного уровня радиации (150–200 нЗв/ч).

Наивысшие уровни радиации (до 12 000 нЗв/ч) были зафиксированы в центральных частях хвостохранилища.

Факторы, влияющие на повышенные уровни радиации:

- оседание пыли на естественных склонах приводило к локальному повышению МАЭД до 1 000 нЗв/ч, особенно на северо-востоке и юго-западе хвостохранилища (участки с песчаными и илистыми отложениями охристого и красно-коричневого цвета);

- отвальная порода и бедные руды также способствовали увеличению радиационного фона, местами превышая 1 000 нЗв/ч;

- примерно 15% всех замеров зафиксировали особенно высокие уровни радиации > 3 000 нЗв/ч.

Дополнительно МАЭД измерялась вдоль первоначального пульпопровода. В трубах № 1, 2 и 3 отмечены повышенные уровни радиации (>500 нЗв/ч) из-за осадков и хвостового материала внутри них.

Мониторинг радона (Rn-222)

В данной работе представлены результаты мониторинга радона в атмосферном воздухе (на открытой местности и внутри помещений).

Для оценки влияния выбросов радона из различных объектов бывшей промзоны были проведены долгосрочные замеры концентрации Rn-222.

Основные параметры мониторинга:

- 18 точек отбора были расположены в зоне Дегмай и села Гоziён;
- средний фоновый уровень радона в атмосфере, определённый на 8 удалённых точках мониторинга (более 1 км от хвостохранилища), составил 37 Бк/м³;

- концентрация радона в атмосфере значительно варьируется в зависимости от сезона.

Во время зимнего мониторинга, измерения на 15 наружных детекторах

показали концентрации в диапазоне 15–2 500 Бк/м³.

Ключевые результаты:

- в точке D1Ro9 (юго-восточная окраина хвостохранилища) концентрация Rn-222 составила 12 Бк/м³;

- экстремально высокие уровни (1 200–2 500 Бк/м³) зафиксированы в точках D1Ro4 и D1Ro5, но данные могут быть менее репрезентативными из-за короткого периода измерений (4 дня). Эти участки были вскрыты во время рекультивационных работ, что могло повлиять на временный рост концентрации радона;

- в точке D1Ro2 (на территории хвостохранилища) долгосрочный мониторинг (5 месяцев) показал 540 Бк/м³, что указывает на стабильно высокий уровень радона.

Границы загрязнённых зон:

- 66% точек мониторинга показали концентрации радона ниже 50 Бк/м³;
- уровень 50–80 Бк/м³ соответствует переходной зоне к загрязнённой области;

- значения > 80 Бк/м³ характеризуют загрязнённую зону.

Результаты программы мониторинга радона в атмосферном воздухе в зимний период 2015-2016 гг. приведены на рисунке 5.3.

Результаты мониторинга наглядно демонстрируют, что по мере удаления от хвостохранилища Дегмай концентрация радона в атмосферном воздухе значительно снижается.

Среднее значение концентрации Rn-222 в селе Гоziён (по 10 замеренным точкам) составляет 36 Бк/м³.

В пределах хвостохранилища концентрации радона варьируются в диапазоне 540–2 500 Бк/м³.

На расстоянии более 350 м от хвостохранилища содержание Rn-222 снижается до уровней ниже 80 Бк/м³.

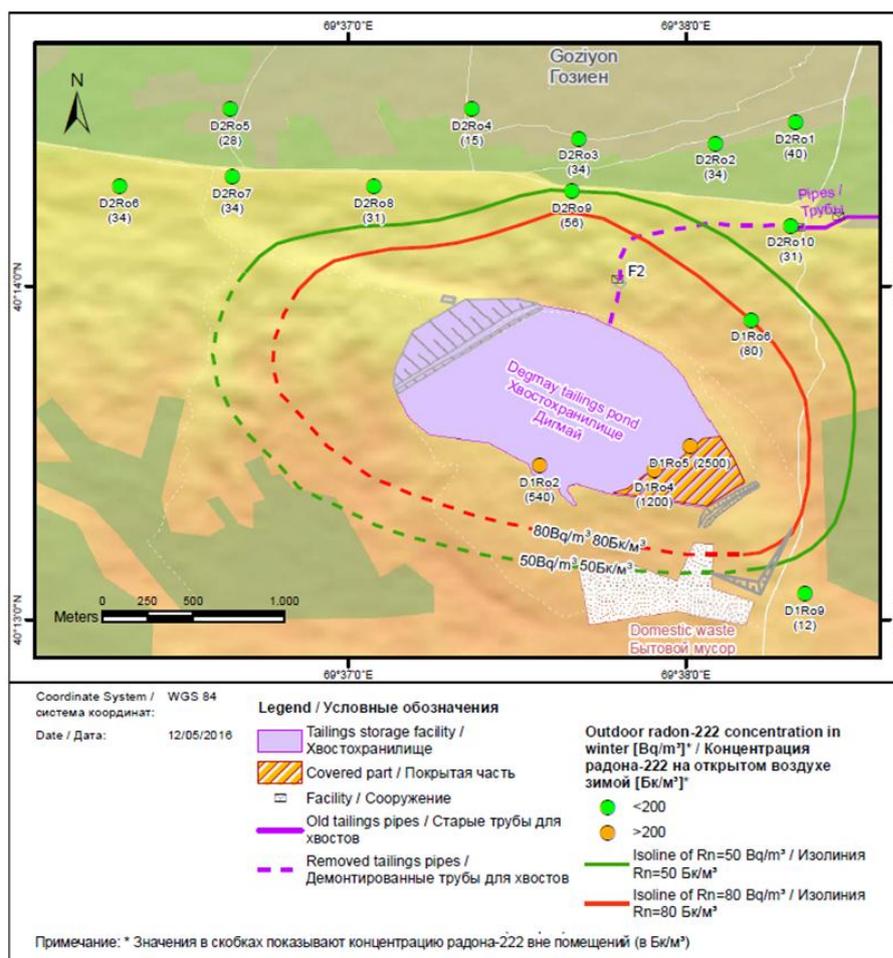


Рисунок 5.3 - Результаты программы мониторинга радона в атмосферном воздухе в зимний период 2015-2016 гг

Мониторинг в летний период

В ходе летнего мониторинга удалось изъять 16–18 радоновых детекторов, два из которых были повреждены.

Результаты анализа данных детекторов показали концентрации радона в диапазоне 19–1 100 Бк/м³.

Как снова подтверждают данные, представленные на рисунке 5.4, летние концентрации радона в атмосферном воздухе остаются низкими за пределами зоны хвостохранилища Дегмай.

Граница влияния радона фиксируется на расстоянии около 300 м от пляжа хвостохранилища, что указывает на локализованное распространение радона в атмосферном воздухе

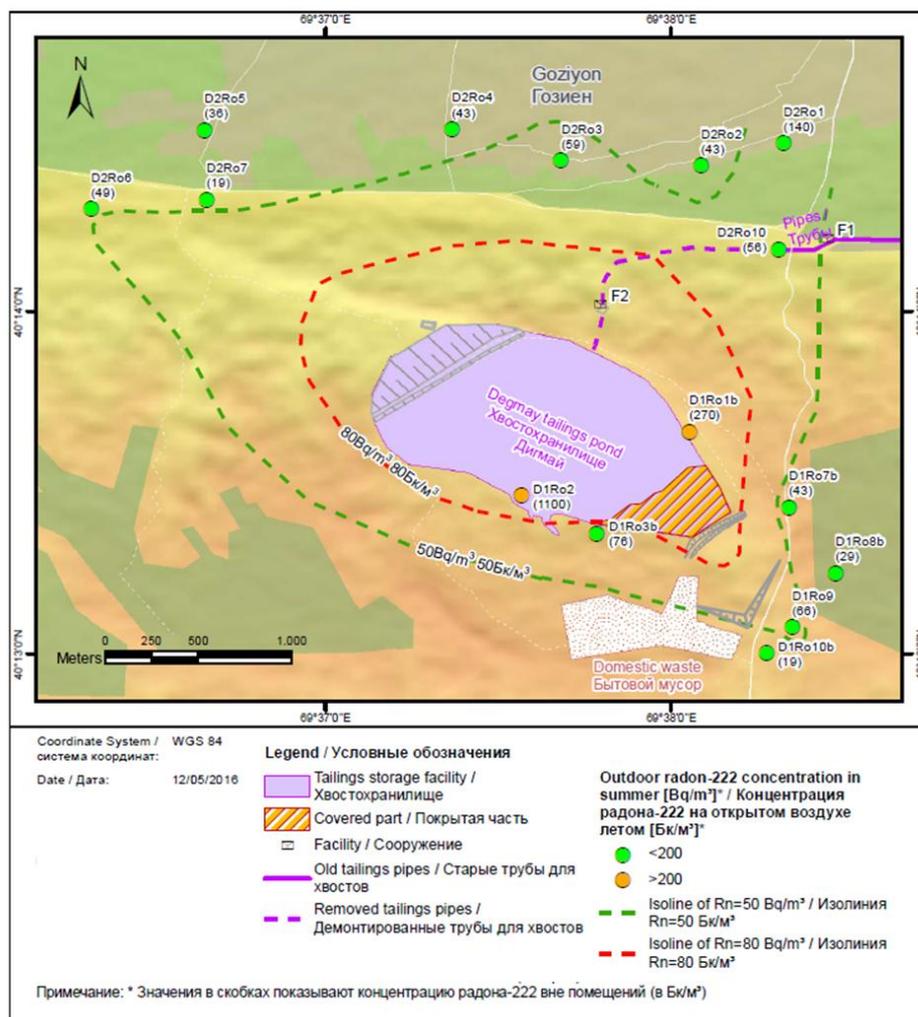


Рисунок 5.4 - Результаты программы мониторинга радона в атмосферном воздухе в летний период 2016 г

Выводы по среднегодовым концентрациям радона (Rn-222):

Согласно данным мониторинга, жилые районы села Гоziён не подвергаются значительному влиянию радона, поступающего с территории хвостохранилища Дегмай. Эти районы расположены на расстоянии более 800 м севернее хвостохранилища. Среднегодовые концентрации Rn-222 здесь остаются ниже 50 Бк/м³.

Южная часть села Гоziён находится на высоте 350–400 м над уровнем моря, в то время как верхняя часть хвостохранилища расположена на высоте 490 м над уровнем моря. В юго-восточной части хвостохранилища точки мониторинга радона находились на уровне 500–540 м над ур. м. (на расстоянии

500–750 м от источника). Здесь среднегодовые концентрации Rn-222 также остаются ниже 50 Бк/м³.

Мониторинг радона внутри помещений

Зимний анализ 5 детекторов, установленных в зданиях села Гозиён, показал концентрации радона в диапазоне 71–450 Бк/м³ (рисунок 5.5).

Только в одной точке мониторинга концентрация Rn-222 превышала 300 Бк/м³, однако это не было связано с отходами добычи и обогащения урана.

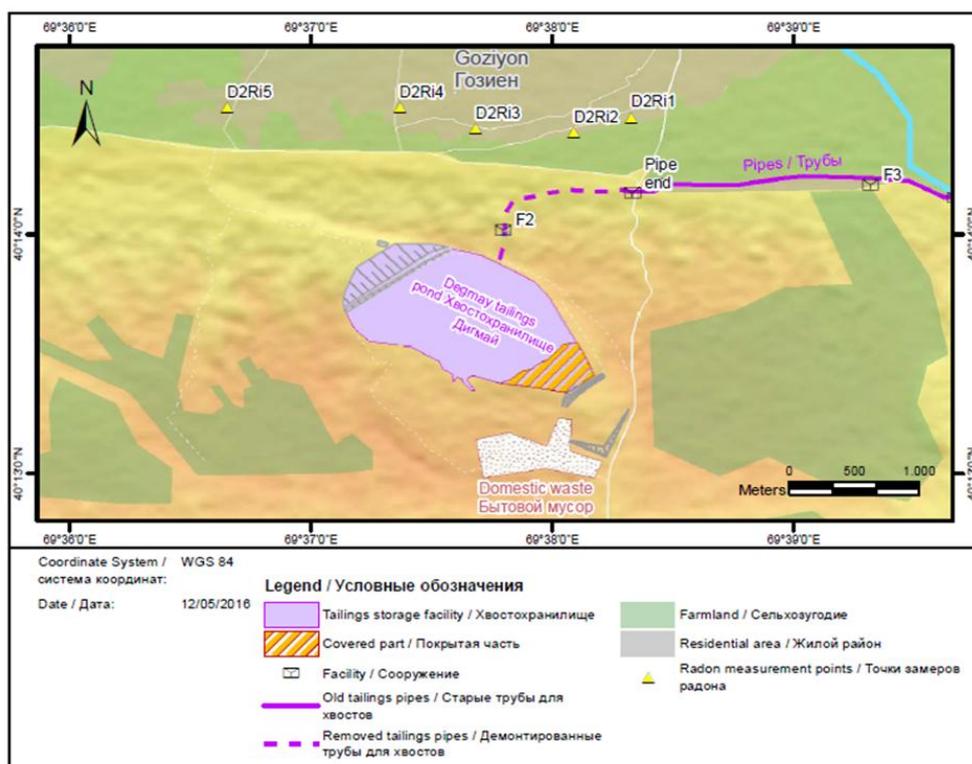


Рисунок 5.5 - Расположение точек мониторинг радона внутри помещений на участке Дегмай (2015-2016 гг.)

В соответствии с Нормами радиационной безопасности Республики Таджикистан (НРБ-06, статья 5.3) допустимая равновесная среднегодовая концентрация радона в закрытых помещениях не должна превышать 300 Бк/м³.

Результаты мониторинга радона в зданиях села Гозиён:

- анализ 5 датчиков, установленных в зданиях, показал, что в летний период концентрации радона варьировались в пределах 87–310 Бк/м³;
- в сравнении с зимним мониторингом были выявлены следующие особенности:

- во всех жилых помещениях концентрации радона летом соответствовали зимним значениям и не превышали 300 Бк/м³, хотя зимой были незначительно выше;

- в одной незаселённой комнате (точка D2Ri1), где строительные работы не были завершены, вновь зафиксировано повышенное значение, аналогичное зимнему периоду.

Вывод: Условия летнего мониторинга радона подтверждают, что хвостохранилище Дегмай не оказывает влияния на уровень радона в жилых зданиях.

Среднегодовые значения концентрации радона (за исключением одной незаселённой комнаты) не превышают предельный уровень 300 Бк/м³, установленный нормами.

5.2. Радиологический мониторинг хвостохранилища Дегмай Республики Таджикистан с определением мощности амбиентного эквивалента дозы и тяжёлых металлов в почве и воде

Вопросы мониторинга загрязнённых территорий от уранового производства, решение проблем, связанных с объектами наследия в постсоветском пространстве были проанализированы в публикациях [276–296].

В исследовании [297] были проанализированы следующие параметры хвостохранилища Дегмай:

- мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) – как полевой параметр при пробоотборе;
- лабораторные параметры – содержание металлов в мг/кг (U, Th, As, Ni, Cr, Fe, Sr, Sb, Se, Zn, Pb, Sc, Ag, Co) в 8 пробах;
- активность радионуклидов (U-238, Ra-226, Pb-210, U-235, Ra-228, Th-232, K-40) – в 5 пробах.

Значения МАЭД на территории хвостохранилища Дегмай представлены на рисунке 5.2.

Результаты измерений МАЭД

Мониторинг МАЭД проводился на всей территории хвостохранилища и

прилегающих территориях до фиксации естественного уровня радиации (150–200 нЗв/ч). Максимальные уровни радиации (до 12 000 нЗв/ч) были зафиксированы в центральных частях хвостохранилища.

Определение точек пробоотбора

Точки пробоотбора определялись на основе результатов измерений МАЭД. Программа отбора проб включала различные виды материалов, среди которых:

- образцы почвы и огородных субстратов с естественным фоном;
- речные наносы;
- хвостовой материал, образовавшийся в результате обогащения урановой руды.

Расположение точек пробоотбора представлено на рисунке 5.6.

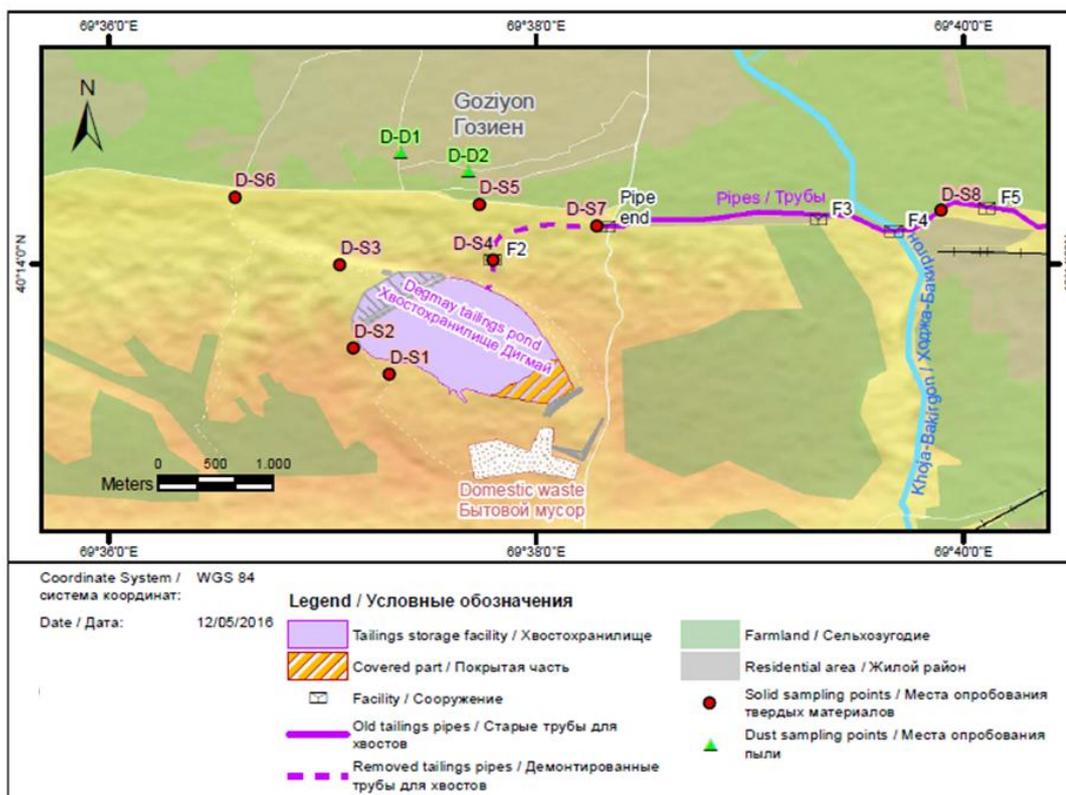


Рисунок 5.6 - Расположение точек пробоотбора твёрдых материалов и пыли на участке Дегмай

Результаты параллельного анализа проб в лаборатории ВИСМУТ показали реалистичные концентрации урана в пробах D-S5 и D-S6, которые

близки к глобальному значению Кларка 4.97 ppm. Это более чем соответствует активности U-238, представленной в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Результаты анализа твёрдых материалов на радионуклиды, Дегмай

№ пробы	Характеристика материалов	U-238	Ra-226	Pb-210	U-235	Ra-228	Th-228	K-40
		Бк/кг						
D-S1	загрязненный грунт	39	207	208	1.8	38	38	474
D-S5	каменистая огородная земля	38	110	99	1.8	26	26	373
D-S6	каменистая огородная земля	25	36	36	1.2	20	21	301

Для определения содержания радионуклидов было пробурено 8 скважин. На рисунке 5.7 показано расположение точек бурения.

В буровых кернах были проанализированы следующие параметры:

- лабораторные параметры – содержание металлов (в мг/кг) U, As, Ni, Cr, Fe, Sr, Sb, Se, Sc, Zn, Co в 11 пробах.
- определение радионуклида Ra-226 – в 7 керновых пробах.
- полный изотопный анализ – проведён в одной керновой пробе.
- геотехнические тесты – выполнены для 40 проб.

Результаты анализа радионуклидов в пробах, отобранных во время буровых работ, представлены в таблице 5.2.

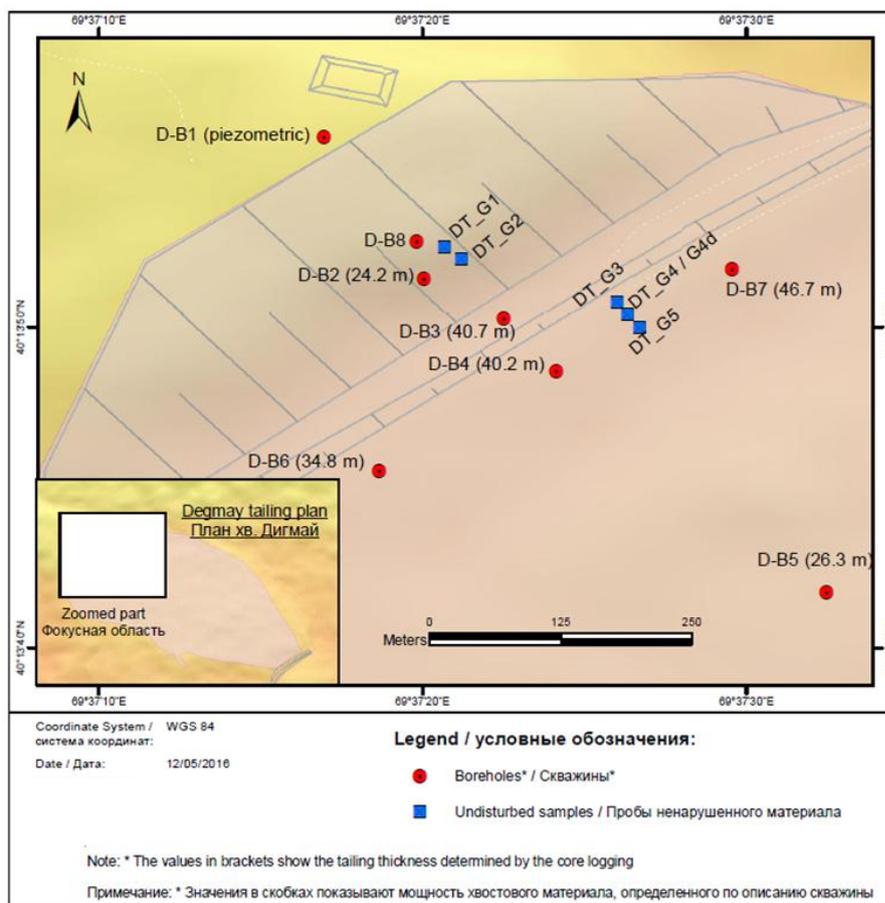


Рисунок 5.7 - Расположение скважин и точек пробоотбора на хвостохранилище Дегмай

Таблица 5.2 - Результаты анализа хвостового материала по некоторым радионуклидам, Дегмай

№ пробы	Материал / интервал глубин	U-238	Ra-226	Pb-210	U-235	Ra-228	Th-228	K-40
		Бк/кг						
DB2_R2	хвостовой материал (кern) / 19.0-19.2 м	912	3900	4230	42	67	68	1080
DB3_R2	хвостовой материал (кern) / 18.3-18.5 м	789	4950	5060	36	70	77	1160
DB4_R3	хвостовой материал (кern) / 30.6-30.75 м	574	9640	9790	26	64	64	994

DB5_R1	хвостовой материал (кern) / 5.0-6.0 м	550	9290	9570	25	50	45	672
DB5_R2	хвостовой материал (кern) / 19.2-19.3 м	1100	31100	30200	51	136	140	667
DB5_R3	хвостовой материал (кern) / 25.5-25.6 м	985	33700	33000	45	115	125	711
DB6_R2	хвостовой материал (кern) / 28-28.8 м	610	6000	6110	28	66	65	1030
DB7_R3	хвостовой материал (кern) / 29.2-29.35 м	582	6290	6160	27	55	55	955

Результаты анализа радионуклидов

На основе проанализированных радионуклидов была выявлена следующая картина:

- загрязнённая проба грунта D-S1, которая была отобрана с естественного склона вблизи намывного пляжа хвостохранилища, содержит явные следы воздействия хвостовых материалов;
- скважинные пробы демонстрируют характерные показатели, типичные для хвостовых материалов;
- пробы DB5_R2 и DB5_R3 показывают особенно высокую активность всех радионуклидов, включая U-238.

Мониторинг участка Дегмай

В общей сложности на участке Дегмай были определены 32 точки мониторинга, включая:

- точки пробоотбора поверхностных стоков;
- ирригационные скважины;
- пьезометры (наблюдательные скважины для мониторинга грунтовых

вод).

В ходе буровых работ в рамках проекта, для оценки гидравлических и гидрохимических условий, ниже хвостохранилища был установлен пьезометр.

Полевые параметры – такие как температура, рН и электропроводность – определялись ежемесячно с ноября 2015 года.

Пробоотбор и анализ воды

Анализ проб воды проводился в течение четырёх основных кампаний мониторинга:

- ноябрь 2015 года;
- февраль 2016 года;
- апрель 2016 года;
- сентябрь 2016 года.

Самые последние данные были собраны в октябре 2016 года.

Расположение точек мониторинга воды представлено на рисунке 5.8.

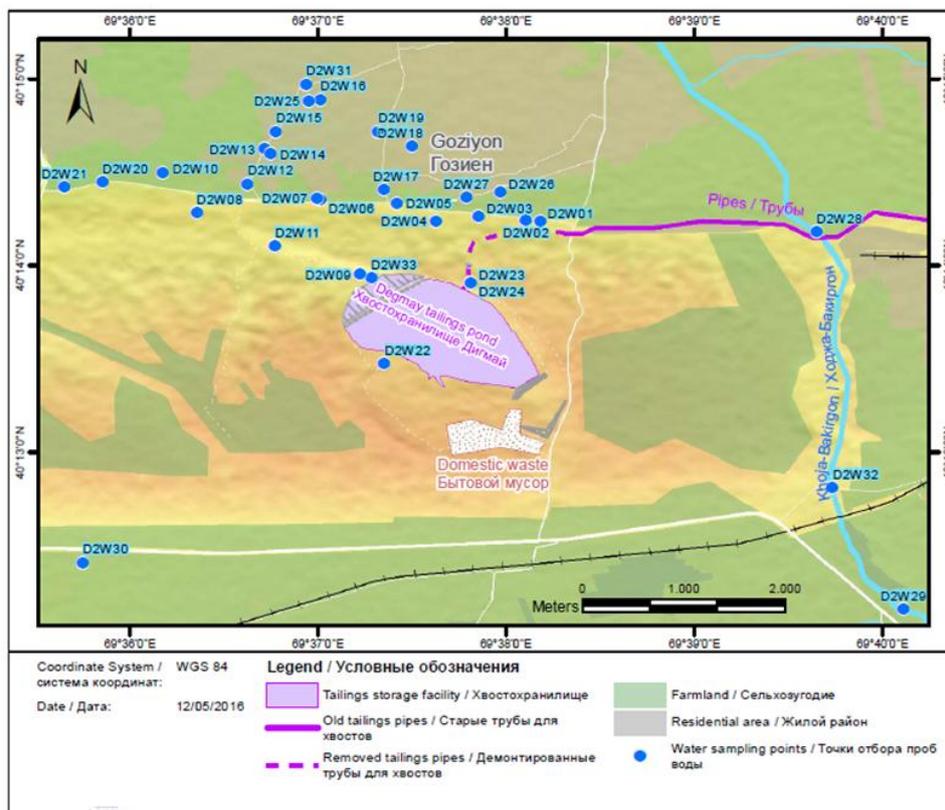


Рисунок 5.8 - Расположение точек мониторинга воды (Дегмай)

Результаты анализа концентрации урана в пробах воды

Во всех проанализированных пробах воды содержание урана находилось в пределах 10–25 мкг/л, что сопоставимо с фоновыми пробами. Однако распределение концентраций указывает на небольшое систематическое увеличение содержания урана в западных скважинах села Гозиён, где концентрации превышают 20 мкг/л. Возможное влияние хвостохранилища Дегмай:

- повышенные концентрации урана в западных скважинах могут свидетельствовать о влиянии загрязнённой воды из хвостохранилища Дегмай;

- эти точки пробоотбора находятся в зоне продолжения долины, в которой расположено само хвостохранилище.

Анализ радионуклидов в частной скважине

В одной пробе воды, отобранной из частной скважины в селе Гозиён (D2W16), был проведён детальный анализ радионуклидов. Результаты анализа (таблица 5.3) не показали существенно повышенных значений.

Таблица 5.3 - Радионуклидный анализ грунтовых вод, проба которых была взята в скважине (D2W1604), 2016 год

U-238-ряд						U-235-ряд		Th-232-ряд		
мБк/л										
U-238	U-234	Th-230	Ra-226	Pb-210	Po-210	U-235	Ac-227	Th-232	Ra-228	Th-228
205	230	<10	<50	<25	3.4	10	<10	<10	<40	<10

В рамках исследования также был проведён мониторинг пылевого загрязнения. В селе Гозиён были установлены две точки мониторинга пыли (см. рисунок 5.6) для проведения контрольных замеров. Период наблюдений начался 6 апреля 2016 года и продолжался до 16 июля 2016 года. Эффективное поперечное сечение контейнеров для сбора пыли составляло 0,01 м². Результаты анализа проб пыли приведены в таблице 5.4.

Основной источник пыли – сухие хвостовые материалы. Мелкодисперсный материал переносится ветром в засушливые периоды. Преобладающее направление ветра в Дегмай – восточно-западное или обратное. Село Гозиён расположено к северо-западу от хвостохранилища, что может снижать уровень его воздействия.

Таблица 5.4 - Результаты программы сбора проб пыли

Параметры	D-D1, Дегмай, ул. Абдували (Ленина)	D-D2, Дегмай, ул. Гулистон
Время экспозиции контейнеров (дней)	101	101
Собранная масса (г сухого вещества)	0.583	0.223
Площадь контейнера (м ²)	0.01	0.01
Скорость оседания пыли (г/м ² /30 сут.)	16.65	6.38
Удельная активность (Бк на кг сухого вещества)		
U-238	19	70
U-234	18	73
Ra-226	25	175
Pb-210	888	710
Ra-228	< 68	< 200
Th-228	< 16	< 50
Активность уровней оседания (Бк/м²/30 сут.)		
U-238	0.32	0.44
U-234	0.31	0.47
Ra-226	0.42	1.1
Pb-210	15	4.5
Ra-228	< 1.1	< 1.3
Th-228	< 0.27	< 0.32

Скорость оседания пыли соответствует ожидаемым значениям для сухой и частично пылевой среды, не подвергшейся влиянию дополнительных источников пыли. Точка D-D1 представляет естественный фон. В точке D-D2 удельная активность U-238 и Ra-226 несколько повышена. Ra-226 демонстрирует превышение над U-238, что остаётся не совсем понятным, так как хвостовой материал находится на расстоянии более 1 км от точки пробоотбора. Концентрации Pb-210 могут быть объяснены распадом радона (Rn-222). В целом, уровни оседания пыли не представляют радиологической опасности.

В ходе работы были определены:

- мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД);
- содержание тяжёлых металлов и радионуклидов в почвах и воде.

5.3. Исследование радиологической ситуации урановых отходов

г. Истиклол Республики Таджикистан

В данном исследовании проведён анализ радиационной обстановки в зоне урановых отходов города Истиклол [298]. Естественный фон гамма-радиации в Истиклоле составляет 140–150 нЗв/ч. В районе рудника Табошар фоновый уровень значительно выше – в среднем 239 нЗв/ч (получено на основе 33 замеров в разных местах).

В характеристических точках, расположенных вне зон загрязнения, связанных с добычей и обогащением урана, значения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) варьируются: 153 нЗв/ч (на огородных участках) и 467 нЗв/ч (на выходах коренных пород в Старом Табошаре).

Мониторинг МАЭД проводился на всех объектах зоны рудника и прилегающих территориях до достижения естественного радиационного фона.

Результаты замеров в рудном поле Сарым Сахли (участок Табошар). Данные по уровню МАЭД представлены на рисунках 5.9 и 5.10.



Рисунок 5.9 - Распределение уровней МАЭД в рудной зоне Сарым Сахли и на прилегающих территориях

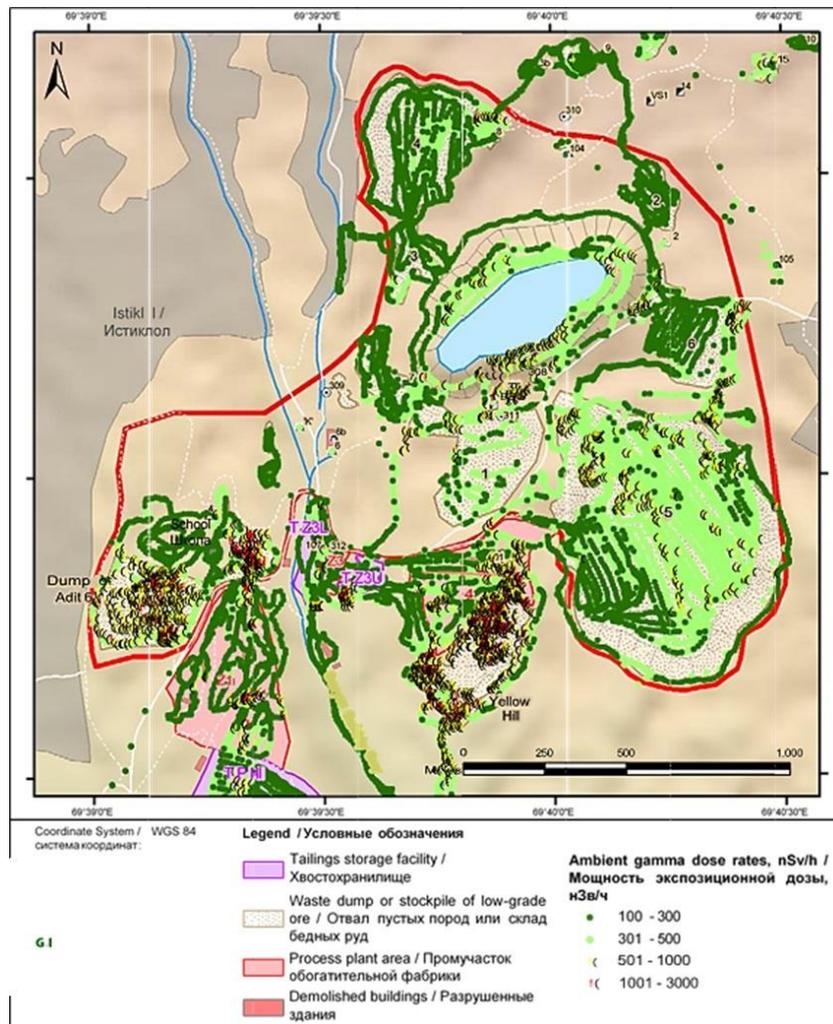


Рисунок 5.10 - Результаты съемки МАЭД в зоне Сарым Сахли

Максимальный уровень радиации (>2000 нЗв/ч) был зафиксирован восточнее школы № 5 – на ближайшем к ней отвале, где складировались бедная

руда и рудные остатки. Возможной причиной рассеивания этого материала могли быть погрузочные работы. Статистика замеров:

- 42% точек мониторинга показали фоновые уровни < 300 нЗв/ч;
- повышенный уровень > 500 нЗв/ч зафиксирован в основном на отвале штольни № 6 (вблизи школы № 5).

Горный участок Старый Табошар

В горном участке Старого Табошара уровень МАЭД измерялся на всех объектах в зоне рудника и на прилегающих территориях. Замеры прекращались по достижении мест с фоновыми показателями. Результаты съемки МАЭД приведены на рисунке 5.11.

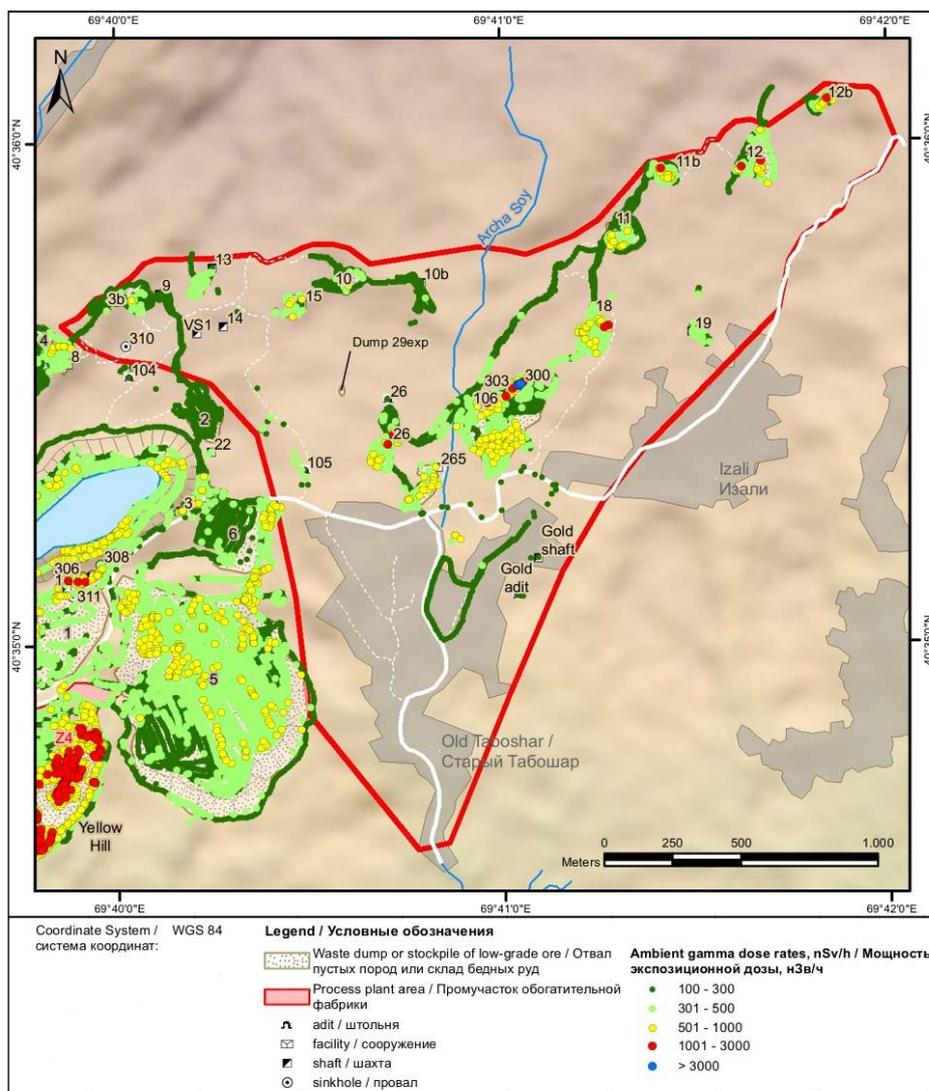


Рисунок 5.11 - Результаты съемки МАЭД на горном участке Старый Табошар
Около 61 % замеров показали фоновые уровни ниже 300 нЗв/ч (рисунок

5.12). Повышенные уровни, превышающие 500 нЗв/ч, характерны для отвалов пустых пород шахт 5, 5б, 18, 26 и 265. На остальных отвалах зафиксированы лишь несколько локальных очагов с МАЭД более 1000 нЗв/ч. В целом, для большинства отвалов характерен уровень МАЭД ниже 300 нЗв/ч, что соответствует фоновым значениям.

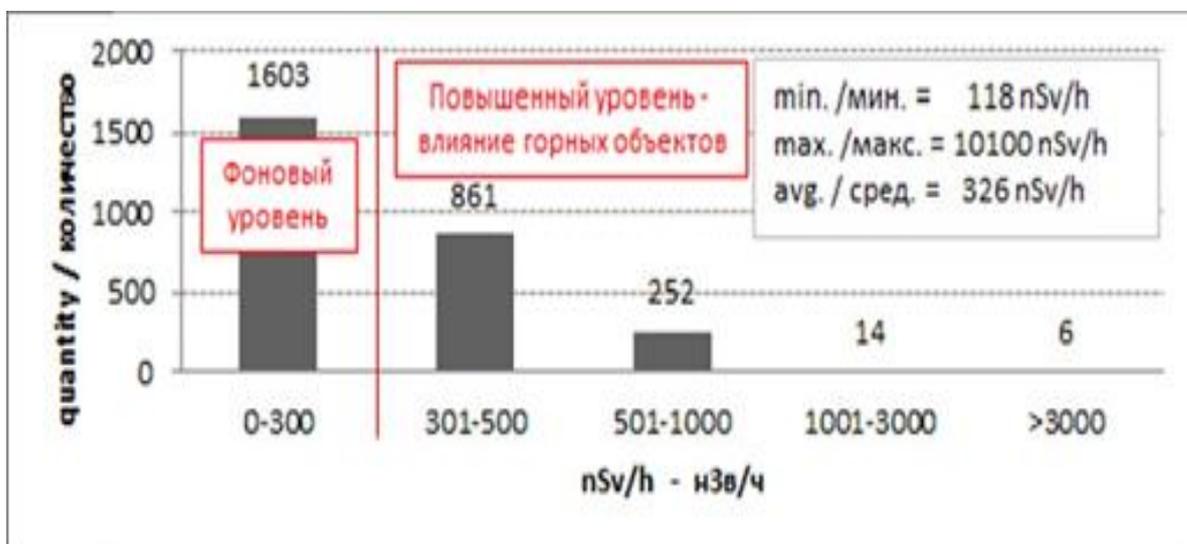


Рисунок 5.12 - Распределение уровней МАЭД в Старом Табошаре

Территория комбината по обогащению бедной руды Z4

Уровни МАЭД измерялись на всех объектах комбината и прилегающих территориях вплоть до участков с фоновыми значениями (рисунок 5.13). Значения МАЭД в диапазоне 500–1500 нЗв/ч зафиксированы на обширных территориях, особенно в местах складирования отходов выщелачивания. Около 18% замеров показали фоновые уровни ниже 300 нЗв/ч (рисунок 5.14).

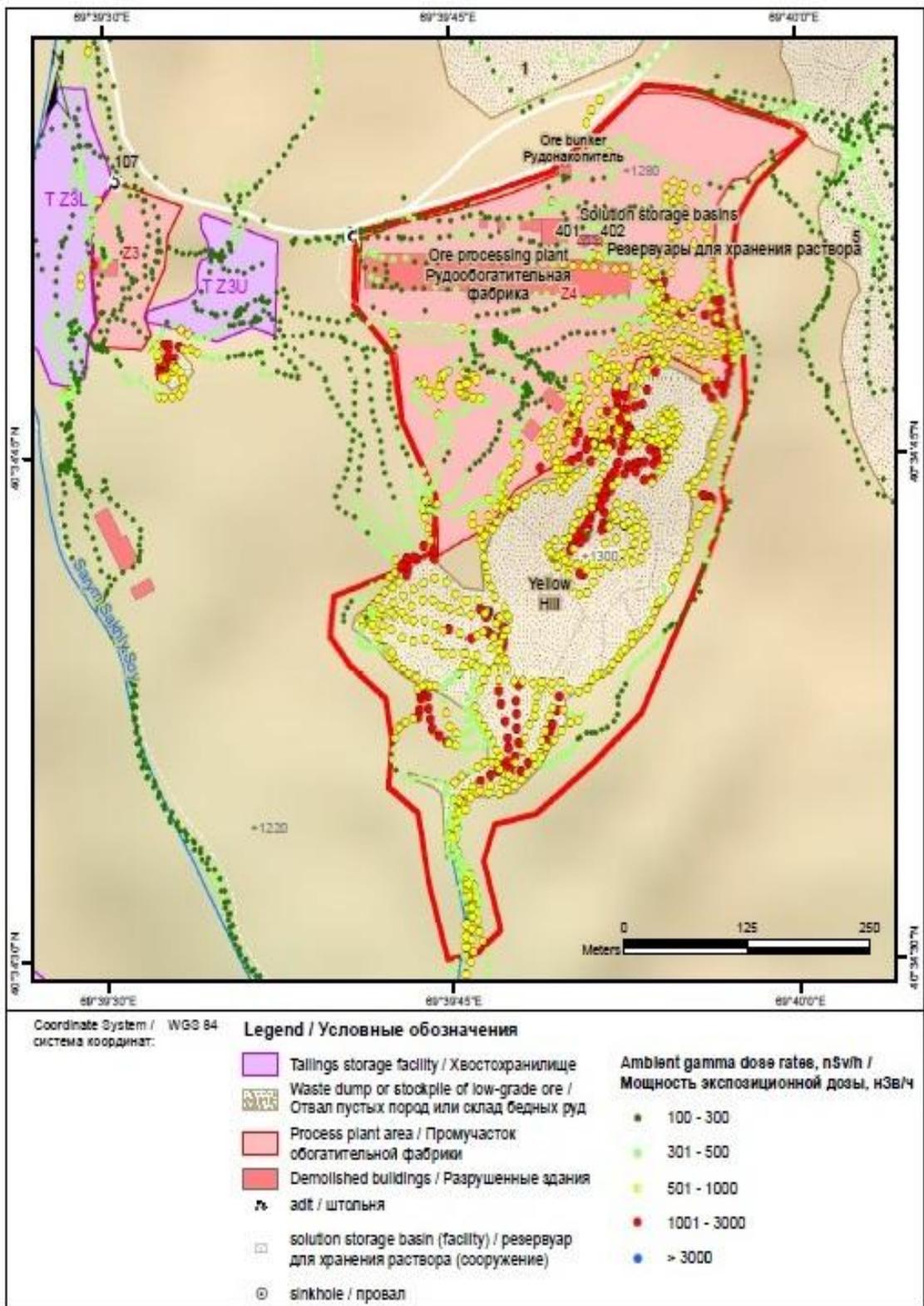


Рисунок 5.13 - Результаты съемки МАЭД на территории комбината по обогащению бедной руды Z4

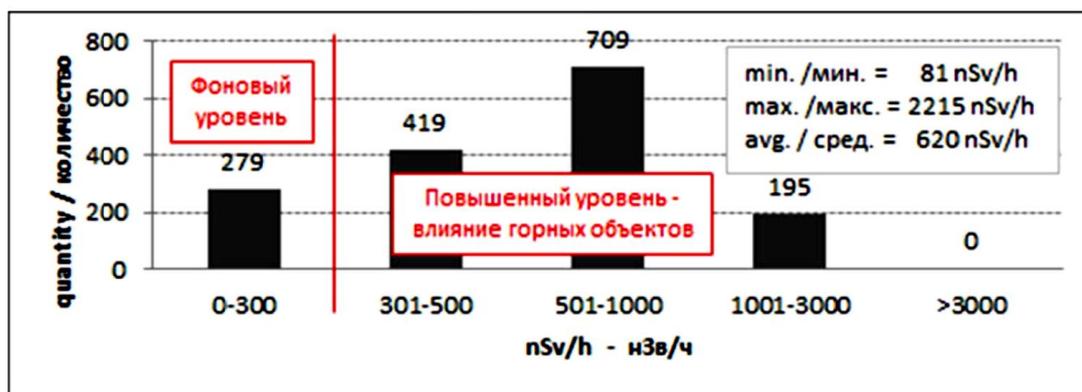


Рисунок 5.14 - Распределение уровней МАЭД на территории комбината по обогащению бедной руды Z4.

Промучастки (комбинаты) Z1 и Z3 и хвостохранилища

Была проведена регулярная съемка МАЭД на промышленных участках Z1 и Z3, а также в прилегающих районах. Около 70 % всех замеров показали фоновые значения ниже 300 нЗв/ч (рисунок 5.15). Измерения проводились до мест с естественными фоновыми показателями (рисунки 5.16 и 5.17). Уровни МАЭД в диапазоне 500–1500 нЗв/ч зафиксированы на небольших участках, преимущественно на отвалах бедных руд и открытых зонах складирования хвостового материала.

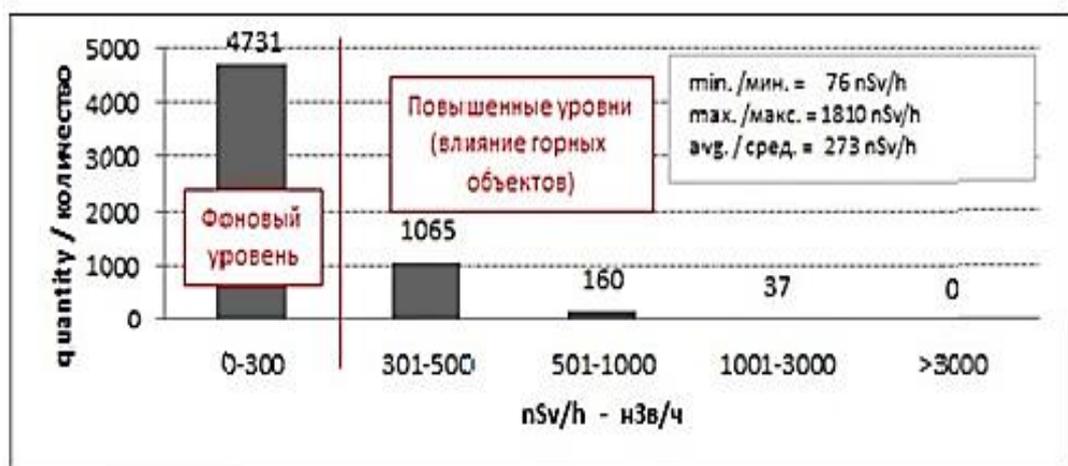


Рисунок 5.15 - Распределение уровней МАЭД на промучастках (комбинаты) Z1 и Z3.

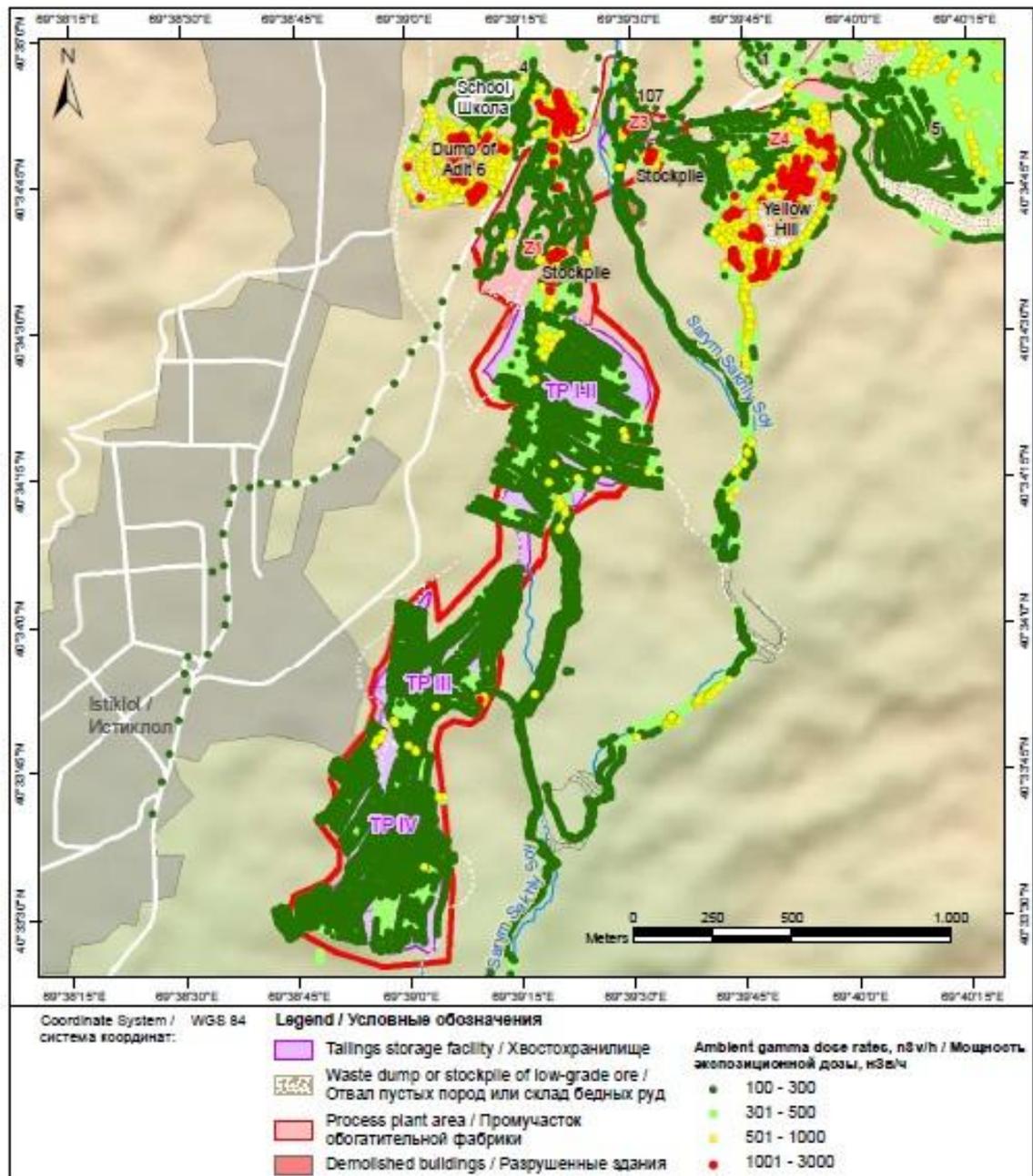


Рисунок 5.16 - Результаты съемки МАЭД на промучастках (комбината) Z1 и Z3, включая хвостохранилища I-IV очереди

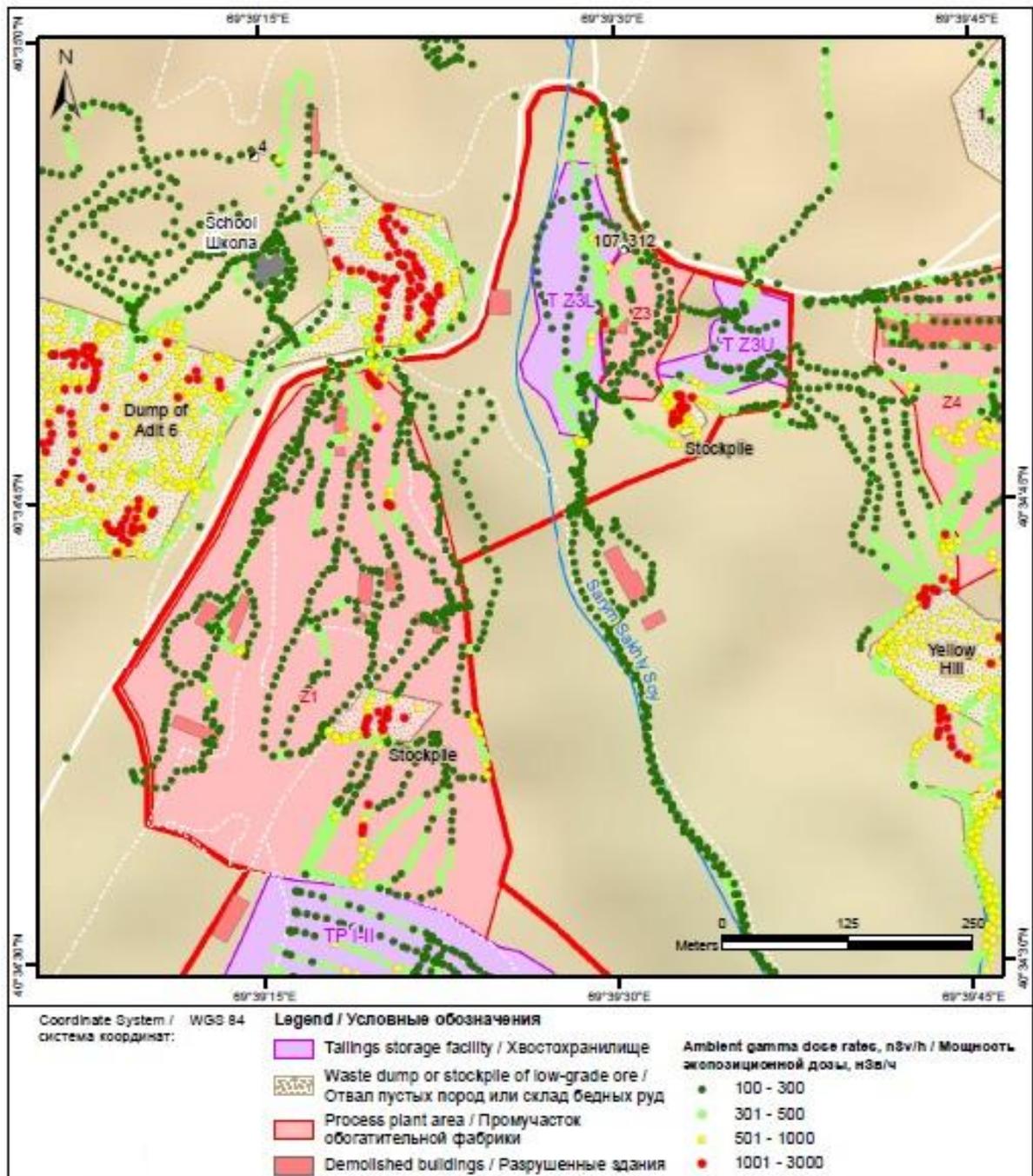


Рисунок 5.17 - Результаты съемки МАЭД на промучастках (комбината) Z1 и Z3

Территория ниже по течению от участка Табошар

Уровни МАЭД измерялись в долине реки Сарым Сахли Сой вплоть до места её слияния с рекой Уткен Сой. Большая часть долины имеет значения МАЭД ниже 300 нЗв/ч. Повышенные уровни радиации связаны с отложив-

шимся песчаным хвостовым материалом. По мере удаления от хвостохранилищ Табошара уровень МАЭД увеличивается, достигая более 2000 нЗв/ч (рисунок 5.18), что объясняется накоплением размытых хвостов в расширяющейся части долины. Различные участки с МАЭД выше 500 нЗв/ч занимают в общей сложности около 10 000 м² и распределены по нижней части долины реки Сарым Сахли Сой на протяжении более 2 км.

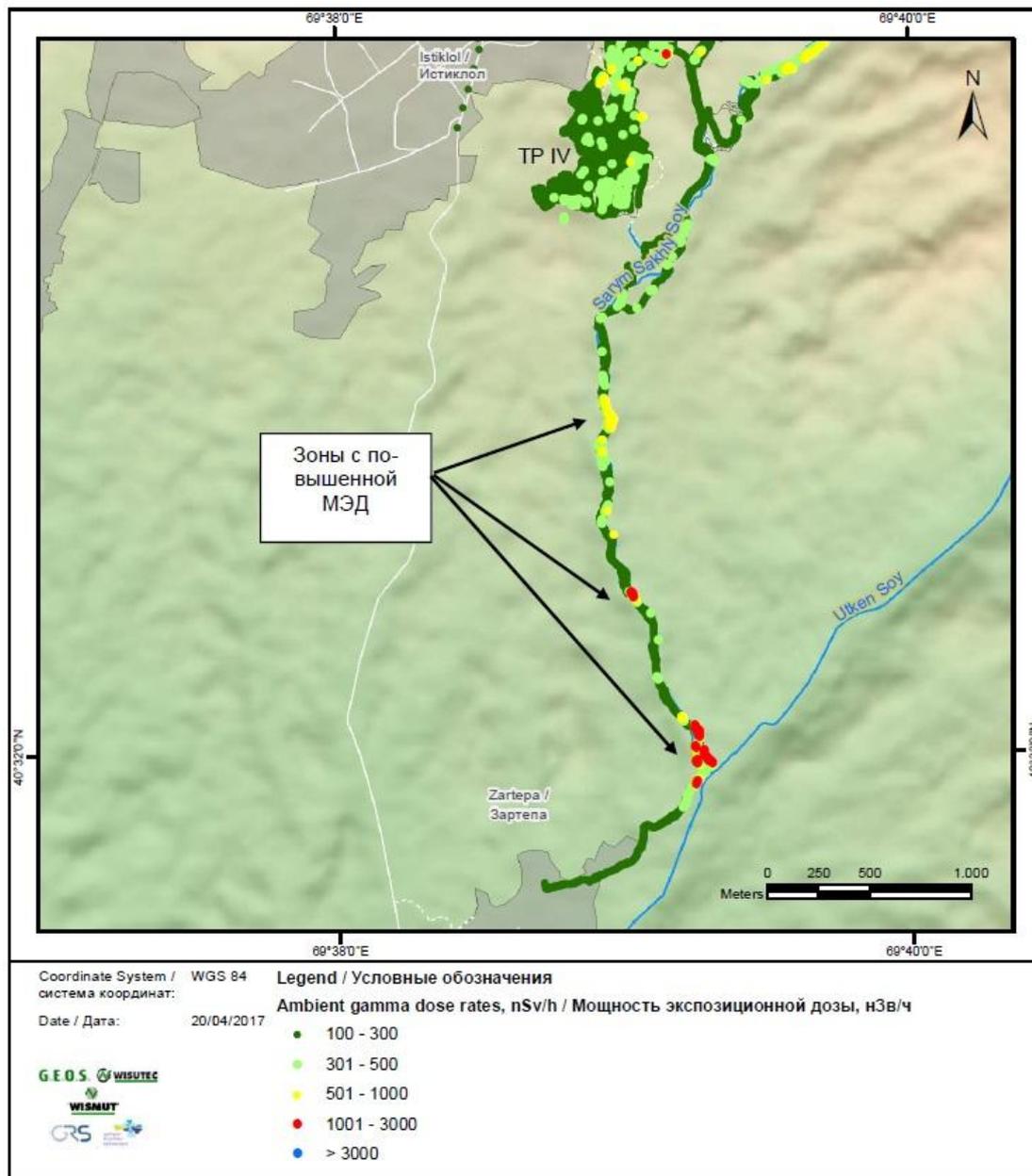


Рисунок 5.18 - Результаты съемки МАЭД ниже по течению от участка Табошар

Таким образом, во время полевых работ были изучены разные участки территории г. Истиклол и определена мощность амбиентного эквивалента дозы в территориях урановых отходов. Были определены открытые горные выработки, отвалы пустых пород, хвостохранилища, а также заброшенные промучастки. Были выделены загрязненные участки и участки, не имеющие загрязнений.

5.4. Заключение по главе 5

В 5-ой главе рассмотрены вопросы воздействия радионуклидов на окружающую среду при производстве урановых концентратов, с акцентом на радиологическую ситуацию урановых хвостохранилищ и их влияние на населенные пункты Таджикистана. На основе анализа представленных данных можно сделать следующие выводы:

1. Проведен мониторинг на хвостохранилище Дегмай с измерением мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД), концентрации радона в воздухе и почве. Наибольшие уровни радиации (до 12 000 нЗв/ч) зафиксированы в центральных частях хвостохранилища. Влияние радона на населенные пункты ограничено: в селе Гоziён концентрации радона не превышают 50 Бк/м³. В зимний период концентрации радона внутри хвостохранилища достигали 2 500 Бк/м³, но с удалением от хвостохранилища показатели значительно снижались.

2. Проведён анализ почвы и воды в районе хвостохранилища Дегмай. В почве зафиксированы повышенные уровни U-238, Ra-226 и Pb-210, типичные для отходов урановой промышленности. Концентрации урана в воде варьируются в пределах 10-25 мкг/л, что соответствует фоновым значениям, но наблюдается локальное увеличение концентрации в западных скважинах села Гоziён. Пробы воздуха указывают на возможное влияние пылевого загрязнения хвостохранилища на прилегающие районы.

3. Проведено исследование хвостохранилищ, рудников и промышленных объектов, связанных с урановой добычей в г. Истиклол. В районе рудника

Табошар уровень гамма-излучения в среднем составляет 239 нЗв/ч, местами превышая 2000 нЗв/ч. На территории комбинатов по обогащению урана отмечены высокие уровни радиации (500-1500 нЗв/ч). Вблизи реки Сарым Сахли обнаружены участки с уровнем радиации свыше 2000 нЗв/ч, что связано с оседанием урановых хвостов.

4. Представлены выводы и рекомендации по загрязненным территориям. Наиболее высокие уровни радиации зафиксированы в центральных частях хвостохранилищ и на отвалах урановых руд. Основные загрязняющие факторы – радон, пыль с хвостохранилищ и выщелачивание урана в подземные воды. Требуется продолжение мониторинга радиационной ситуации, а также разработка программ рекультивации загрязненных территорий. Необходимо внедрение современных методов улавливания радона и снижения пылевого загрязнения путем создания защитных покрытий на хвостохранилищах.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что радиационная обстановка в районах уранодобычи требует постоянного контроля и принятия мер по снижению воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

ГЛАВА 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

6.1. Обсуждение перспективы переработки новых урансодержащих руд Таджикистана

Данное исследование представляет собой итоговый результат научной деятельности, проведённой в рамках следующих тематических направлений Агентства по ХБРЯ безопасности:

- "Изыскание технологических основ переработки урансодержащих руд и отходов урановой промышленности" (Номер государственной регистрации: ГР № 102 ТД 843, период выполнения 2010-2014 гг.);

- "Физико-химические основы извлечения урана из руд и урансодержащих шахтных и технических вод" (Номер государственной регистрации: ГР № 00470 ТД 0115, период выполнения 2015-2019 гг.);

- "Физико-химические основы радиационной экологии, разработка радиоэкологических карт регионов и радиационный мониторинг биосферы Таджикистана" (Номер государственной регистрации: ГР № 00471 ТД 0115, период выполнения 2015-2019 гг.);

- "Физико-химические основы выделения урановых концентратов из руд и отходов" (Номер государственной регистрации: ГР № 0120 ТД 01030, период выполнения 2020-2024 гг.);

- "Радиоэкологические исследования на объектах, содержащих радионуклиды" (Номер государственной регистрации: ГР №0120 ТД 01031, период выполнения 2020-2024 гг.).

В исследовании проведён углубленный анализ научных трудов, посвящённых переработке урановых руд и производственных урановых отходов. Литературный обзор охватывает различные технологические подходы к обработке ураносодержащего сырья, уделяя особое внимание месторождениям Таджикистана.

Урановые залежи, обнаруженные на территории Таджикистана, оказали существенное влияние на обеспечение радиоактивными материалами в после-

военный период СССР. Сегодня на территории страны выявлены перспективные месторождения, способные служить источниками уранового концентрата. В данном диссертационном исследовании изучены процессы извлечения и переработки урановых ресурсов месторождений "Северный Таджикистан", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан", "Северный Таджикистан - 2", "Восточный Памир" и "Танзим".

В ходе исследования проведён углублённый анализ химико-минералогического состава урансодержащих руд месторождения "Центральный Таджикистан", а также детальное изучение изотопного состава сырья месторождения "Танзим". Были исследованы процессы извлечения урана серноокислотным методом с применением различных окислителей, включая пероксид водорода (H_2O_2), диоксид марганца (MnO_2 , пиролюзит) и азотную кислоту (HNO_3). Экспериментально установлено, что наибольшая эффективность в извлечении урана достигается при использовании пероксида водорода. Дополнительно изучена зависимость извлекаемости урана от уровня кислотности среды в серноокислых растворах [204, 299, 300].

Проведён всесторонний анализ кинетики процесса, что позволило построить графические зависимости скорости извлечения урана в температурном диапазоне 293–353 К при временных интервалах от 1 до 6 часов. Были определены показатели энергии активации для различных окислителей: для H_2O_2 – 2,5 кДж/моль, для MnO_2 (пиролюзит) – 4,8 кДж/моль, для HNO_3 – 5,7 кДж/моль, варьируя концентрацию серноокислого раствора. Полученные данные свидетельствуют о том, что извлечение урана из рудных пород протекает в условиях, подчиняющихся диффузионным закономерностям [156].

Проведено детальное исследование механизмов разложения урановой руды месторождения "Центральный Таджикистан" под воздействием серной кислоты различной концентрации, а также оптимизированы параметры процесса. Оптимизированные параметры показаны следующими: максимальная степень извлечения урана достигает 96 процентов при температуре 60°C, длительности обработки руды в течение 4-х часов, концентрации окислителя -

пероксида водорода 50 л/т, серной кислоты 150 кг/т и соотношении твёрдого и жидкого компонентов 1:2.

Изучены сорбционные характеристики термически модифицированного угля месторождения Фан-Ягноб, который продемонстрировал высокую селективность при извлечении урана из растворов [236, 301].

На основе проведённых исследований разработана комплексная схема-технология для переработки ураносодержащих материалов месторождения "Центральный Таджикистан", включающая следующие ключевые этапы: рудоподготовка (включает процессы дробления и гидромеханической очистки материала); сернокислотное разложение (проводится с добавлением окислителей); фильтрация растворов (удаление примесей и подготовка к дальнейшему извлечению); сорбционное извлечение урана (уран захватывается сорбентами, обеспечивая его концентрирование); десорбция (высвобождение урана из сорбента и его перевод в раствор); нейтрализация реакционной среды (стабилизация химических параметров раствора); осаждение диураната (формирование уранового осадка с последующей фильтрацией); получение конечного продукта (термообработка осадка, приводящая к образованию оксида урана).

Комплексный анализ рудного материала месторождения "Западный Таджикистан" выявил его принадлежность к ураносиликатным породам, с повышенным содержанием диоксида кремния (более 37%). В связи с этим для переработки применялось метод кислотного разложения с использованием серной кислоты. Исследованы кинетика и основные параметры реакции, включая влияние температуры, продолжительности процесса и концентрации кислоты. Расчёты показали, что энергия активации разложения составляет 14,1 кДж/моль, а оптимальные условия процесса определены следующим образом: концентрация H_2SO_4 – 30%, температура обработки – 80°C, длительность реакции – 60 минут. На основе полученных данных разработана комплексная схема-технология извлечения урана из руды, обеспечивающая максимальную эффективность переработки.

Минералогический анализ рудного материала месторождения "Северный Таджикистан - 2" подтвердил наличие уранофана и уранинита как основных урансодержащих минералов. Высокое содержание кварца в составе руды обуславливает повышенную эффективность кислотного разложения в сравнении с карбонатным способом. Тем не менее, сложность обработки силикатной руды ограничивает максимальный уровень извлечения до 75%.

Руда месторождения "Восточный Памир" подвергалась карбонатному выщелачиванию. Оптимизированные параметры выщелачивания показаны следующими: температура 70°C, продолжительность 90 минут и использование 5%-ного раствора карбоната натрия. Данные оптимизированные параметры позволяют достигать наибольшую степень извлечения урана (94,14%). Однако применение сернокислотного метода оказалось менее результативным, обеспечивая лишь 58% перехода урана в раствор.

Исследования физических и химических свойств руд ураносодержащих месторождений Таджикистана позволили также оптимизировать технологии переработки для получения уранового концентрата из местного сырья с максимальными выходами конечного продукта в виде U_3O_8 .

Так как для всех рассматриваемых ураносодержащих месторождений исследовался процесс разложения руд методом сернокислотного выщелачивания, на рисунке 6.1 приводится диаграмма по извлечению урана из руд месторождений, где максимальное извлечение урана (90% и более) показывает руда месторождения "Западный Таджикистан" [221, 229].

В ходе исследования проведена сравнительная оценка эффективности извлечения урана в зависимости от концентрации серной кислоты (рисунок 6.2) и температуры разложения руды (рисунок 6.3). Анализ представленных графиков показывает, что кривые зависимости расположены близко друг к другу, что свидетельствует о сходстве минералогического состава рассматриваемых руд.

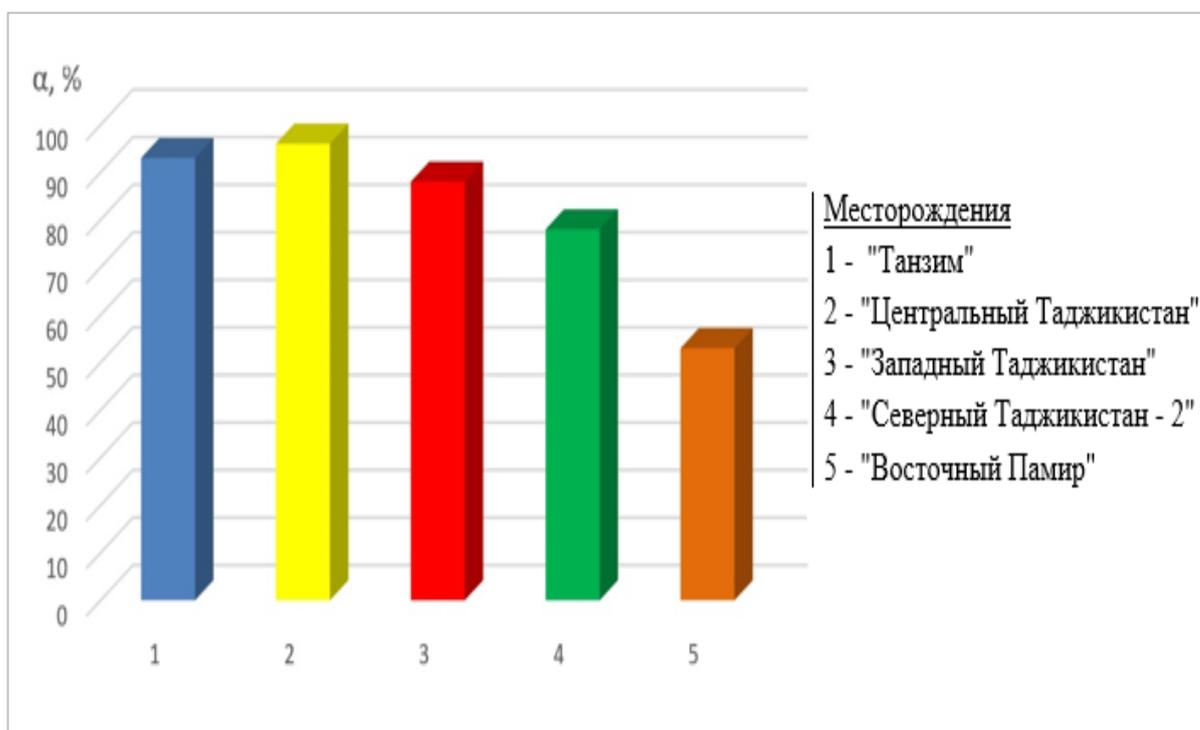


Рисунок 6.1 –Эффективность сернокислотного метода для урановых руд месторождений Таджикистана

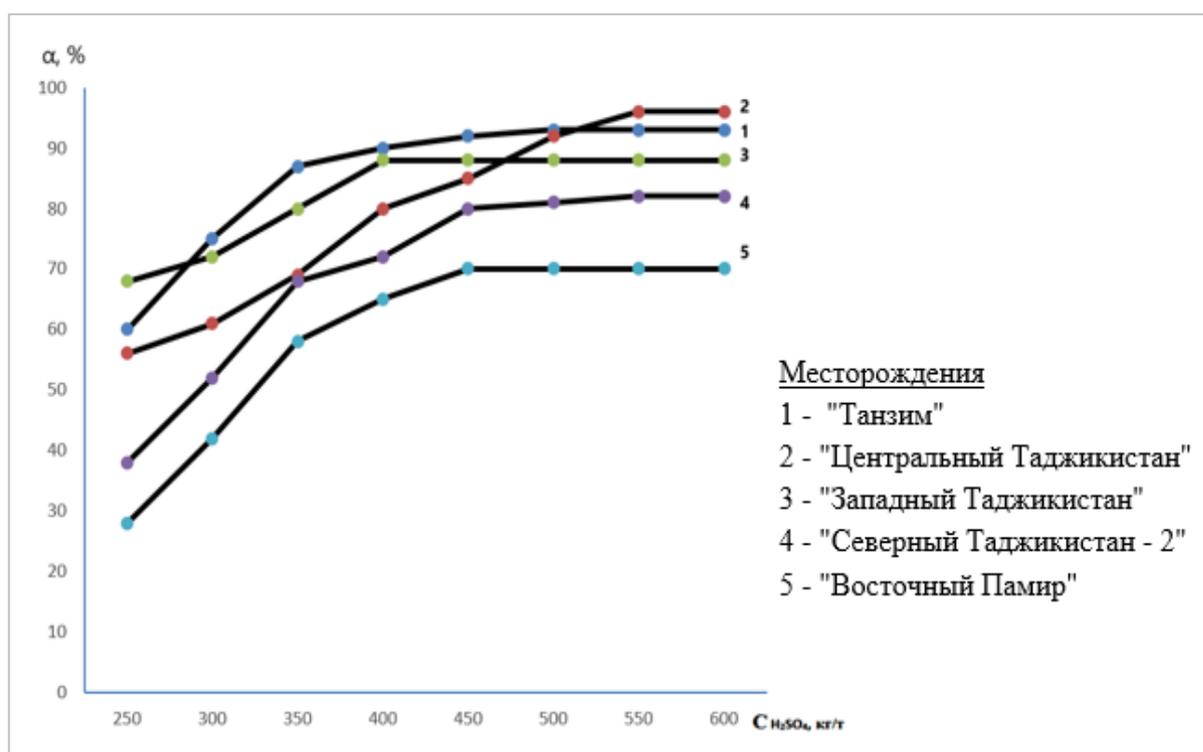


Рисунок 6.2 –Эффективность сернокислотного метода извлечения урана: зависимость от концентрации

Диаграмма, представленная на рисунке 6.4, визуализирует процесс извлечения урана из урансодержащих руд таджикских месторождений методом карбонатного разложения. Наивысший коэффициент извлечения продемонстрировала руда месторождения "Восточный Памир", где уровень извлечения урана превысил 90%.

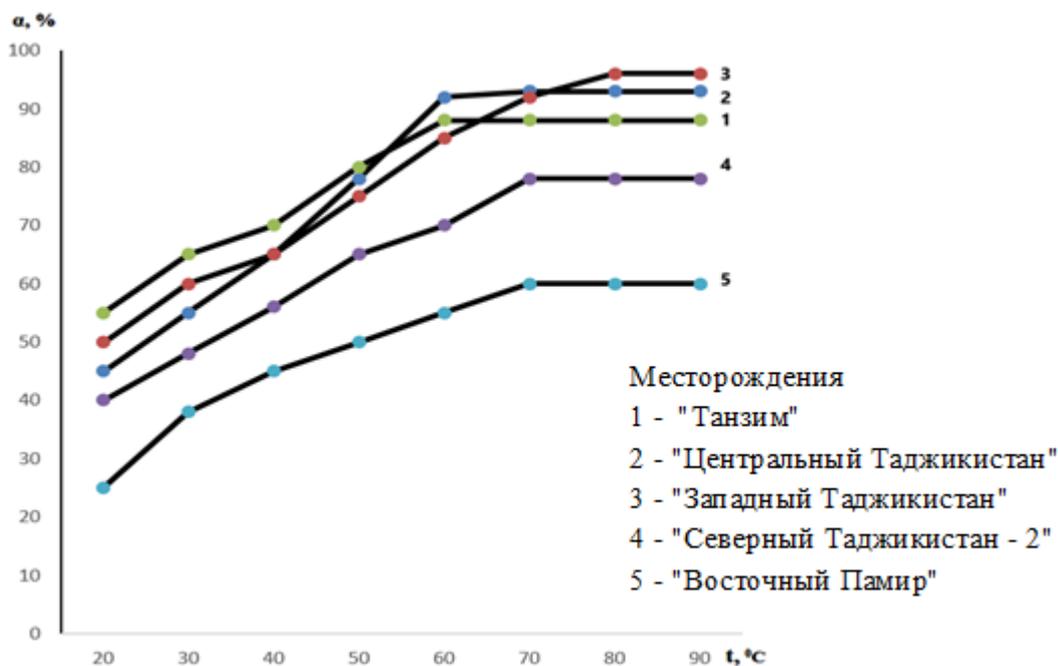


Рисунок 6.3 - Сравнительный анализ извлечения урана из руд месторождений Таджикистана в зависимости от температурного режима

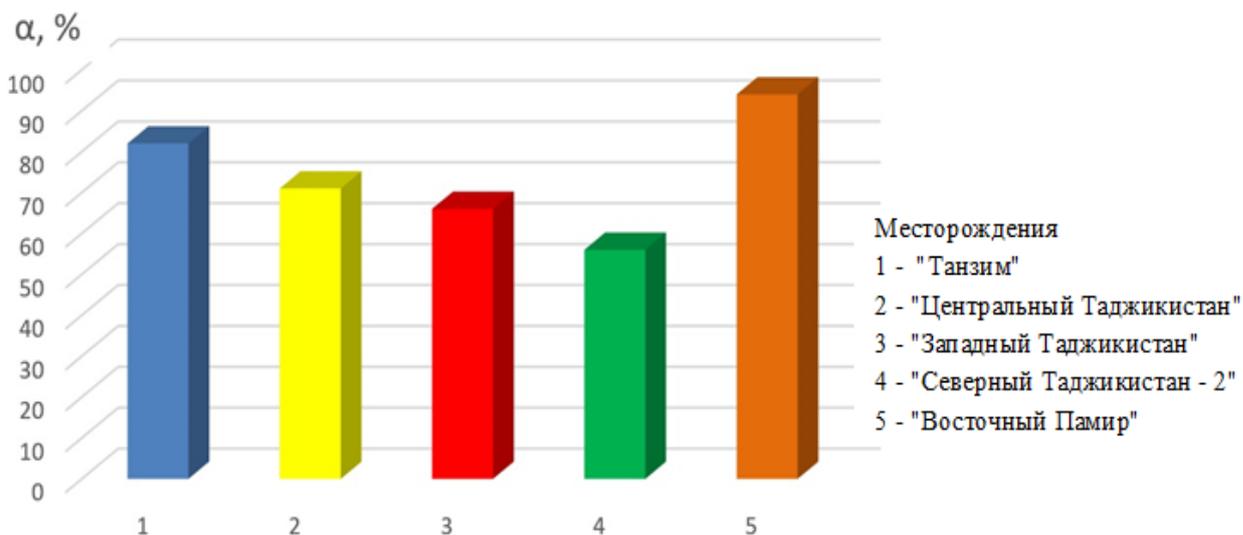


Рисунок 6.4 – Сравнительный анализ извлечения урана из руд месторождений Таджикистана посредством карбонатного метода

В данном диссертационном исследовании научно обосновано, что Таджикистан располагает значительными ресурсами для нужд уранодобывающей и ураноперерабатывающей отрасли. Анализ показал, что ураносодержащие руды месторождений страны обладают высокой перспективностью для извлечения урановых концентратов.

Предложенная технология переработки этих руд рекомендуется для эффективного производства урановых концентратов. В качестве оптимального окислителя при обработке руд предпочтителен пероксид водорода, который превосходит другие окислители по эффективности.

В роли сорбентов предлагается использовать местные природные материалы, такие как скорлупа косточек абрикоса, сосновые и арчовые шишки, микрогель, а также термообработанный уголь, способствующие качественной очистке урановых растворов. Также подтверждено, что сырьевая база Таджикистана достаточно велика, а наиболее подходящим методом переработки сырья является гидрометаллургический процесс, поскольку из-за сложного горного рельефа применение подземного и кучного выщелачивания затруднено.

6.2. Возможности вторичной переработки ураносодержащих отходов

Таджикистан унаследовал значительные объемы ураносодержащих отходов, накопленных в хвостохранилищах вследствие деятельности урановой промышленности. Эти отходы представляют собой потенциальный источник урана, пригодного для вторичной переработки. Одним из наиболее перспективных методов извлечения урана является сернокислотное выщелачивание, которое обеспечивает эффективный переход урана в раствор. Для этого были исследованы урановые хвостохранилища на севере Таджикистана: «Карты 1-9», «Табосар», «Фабрика бедных руд», «Гафуров» и «Адрасман».

В ходе исследований хвостов хвостохранилища «Карты 1-9» было выявлено, что их основным компонентом является кварц (69,4%), а содержание

урана варьируется в пределах 0,008-0,021%. Экспериментальные исследования продемонстрировали, что наибольшая степень извлечения урана достигается при концентрации серной кислоты, равной 100–180 кг на одну тонну хвостового ураносодержащего материала, температурном режиме 65–70°C и времени кислотного разложения 6 часов, обеспечивая процентное извлечение до 93,9 процентов. Для указанного процесса определена энергия активации (6.0 кДж/моль), что указывает на протекание процесса в условиях, подчиняющихся кинетическим закономерностям.

Для хвостохранилищ г. Истиклол, включая хвостохранилища Табошара, сформированные в 1945-1965 годах, также был изучен процесс выщелачивания. Эксперименты показали, что при концентрации урана 0,009–0,025% наиболее эффективные параметры включают концентрацию серной кислоты 50–100 г/л, отношение твёрдых компонентов к жидкости 2:1, температурный режим 65–70°C и время контакта хвостового материала с кислотой 3–6 часов, что позволяет достичь 96%-ного извлечения урана.

Исследование хвостохранилища "Фабрика бедных руд" выявило неоднородное распределение урана, с зонами, содержащими уран до 0,0145%. Исследования показали, что использование сернокислотного метода в сочетании с оптимизированными параметрами позволяет значительно повысить уровень извлечения. В частности, при проведении опытов в стационарных условиях с перемешиванием удалось достичь 68,4% извлечения урана из раствора, а при использовании воздушного перемешивания показатели могут быть еще выше.

Анализ переработки отходов хвостохранилища "Гафуров" выявил, что для песков с низким содержанием урана (около 0,030%) наилучшие результаты достигаются при использовании 30–40 кг серной кислоты на каждую тонну хвостового материала. В этих условиях в раствор переходит 80% урана, а увеличение продолжительности выщелачивания до 12 часов позволяет довести извлечение до 90 процентов.

Для хвостохранилища "Адрасман" применялся карбонатный метод с использованием натрий карбоната (Na_2CO_3) в количестве 100–400 кг/т. Процесс

осуществлялся при температуре 80°C, соотношении твёрдого к жидкому 1:2, и длился 6 часов. После завершения выщелачивания твёрдый остаток подвергался трёхкратному промыванию водой при соотношении 1:1. С увеличением дозировки соды уровень извлечения урана возрастал, достигая 82% при 400 кг/т реагента. Однако оптимальным считается 72-процентное извлечение при расходе реагента 200 кг/т, поскольку оно обеспечивает баланс между эффективностью и экономичностью процесса.

Разработанная технологическая схема переработки урансодержащих отходов включает стадии кислотного выщелачивания, нейтрализации растворов аммиачной водой, фильтрации и осаждения диураната аммония. Образованный осадок подвергается термическому воздействию при 600–900°C, что приводит к формированию U_3O_8 в качестве конечного запланированного соединения. Данный метод обладает высокой эффективностью, обеспечивая 90-99-процентное извлечение урана.

Результаты исследований показали, что переработка урансодержащих отходов является перспективным направлением для расширения сырьевой базы урановой промышленности Таджикистана. Экономическая эффективность процесса требует дальнейшего анализа, однако высокая степень извлечения урана подтверждает целесообразность его внедрения.

В рамках исследования интересным представлялась также сравнительная оценка извлечения урана из хвостового материала рассматриваемых хвостохранилищ (рисунок 6.5).

Как видно из рисунка 6.5, наибольшие извлечения урана из хвостовых материалов были получены для хвостохранилища "Фабрика бедных руд", а минимальные извлечения – для Адрасманского хвостохранилища.

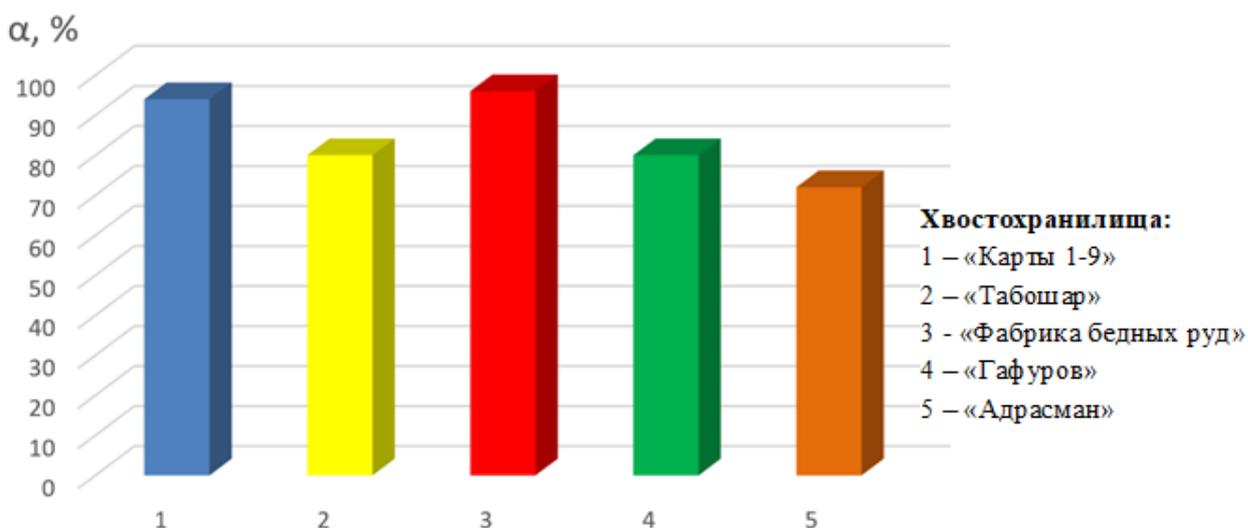


Рисунок 6.5 – Сравнительный анализ извлечения урана из хвостового материала хвостохранилищ Таджикистана

Дополнительно, проведённые исследования позволяют сделать вывод о влиянии различных параметров на эффективность процесса извлечения урана. В частности, выявлено, что увеличение концентрации серной кислоты до 200 г/л не приводит к значительному увеличению степени извлечения, что указывает на наличие оптимального диапазона концентраций. Кроме того, анализ показал зависимость эффективности процесса от времени контакта: при его увеличении до 10 часов извлечение урана возрастает на 5–7%. Однако целесообразность подобного подхода требует дальнейшего экономического обоснования.

Одним из значимых факторов, влияющих на переработку урансодержащих отходов, является выбор метода осаждения урана из раствора. Исследования показали, что использование аммиачной воды для осаждения урана позволяет получить высококачественный концентрат диурата аммония, который в дальнейшем легко подвергается термической обработке с получением U_3O_8 . Альтернативные методы осаждения, включая применение в процессе известкового раствора или натриевого гидроксида, приводят к потерям урана в образующемся осадке, поэтому этапы очистки необходимо проводить несколько раз, что неэффективно.

Соответственно, исследования диссертационной работы свидетельствуют об эффективности извлечения урана из отходов урановых хвостохранилищ методом сернокислотного выщелачивания и последующего осаждения урана аммиачной водой. В дальнейшем предполагается проведение промышленных испытаний разработанных технологий для оценки их экономической эффективности и внедрения в промышленную практику. Учитывая высокий потенциал урансодержащих отходов, их переработка может внести значительный вклад в развитие урановой промышленности Таджикистана и снижение экологической нагрузки на регионы, где расположены хвостохранилища.

В Таджикистане очистка урансодержащих вод, образующихся в процессе добычи и переработки урановых руд, является одной из проблем, требующих технологического решения. Эффективное извлечение урана из этих вод позволяет снизить их экологическую опасность и получить дополнительный источник стратегического сырья.

Исследования показали, что применение ионообменных смол типа АМ(п) при сернокислотном выщелачивании позволяет достичь степени сорбции урана до 99%. Оптимальная скорость подачи раствора составляет 12,3 мл/мин. Десорбция урана с насыщенного сорбента наиболее эффективна при использовании 15%-ного раствора серной кислоты при температуре 50-60°C, обеспечивая степень десорбции 99,4%. Полученный диуранат аммония обладает высокой степенью очистки и пригоден для дальнейшей переработки.

Перспективным направлением является использование термообработанных углей месторождения Фан-Ягноб. Они демонстрируют высокую эффективность при извлечении урана из шахтных вод, достигая степени извлечения 90-95%. Насыщенный ураном сорбент может быть подвергнут обжигу с последующим кислотным выщелачиванием, что позволяет выделить уран в форме закиси-оксида.

Дополнительные исследования проведены с применением микрогелей на основе пектиновых полисахаридов, полученных из корзинок подсолнечника. Данный метод позволяет достигнуть извлечения урана на уровне 90-95%

при рН 7. Термическая обработка сорбента после его максимального насыщения приводит к образованию зольного остатка, который также максимально насыщен ураном. Извлечение урана из зольного остатка проводится классическими методами.

Кроме того, изучены сорбционные возможности природных сорбентов, в частности, исследования посвящены сорбенту – скорлупе косточек абрикоса. Этот метод не требует высоких эксплуатационных вложений, его можно использовать в отдалённых регионах страны. Данный метод позволяет при уровне рН, равном 8,0 достигать 86.9-процентного извлечения урана. Возможные способы переработки насыщенной ураном скорлупы включают обжиг с последующим растворением урана или десорбцию с использованием серно-кислотных растворов.

Сравнительная оценка степени извлечения урана из шахтных и технических вод Таджикистана различными сорбентами приведена на рисунке 6.6.

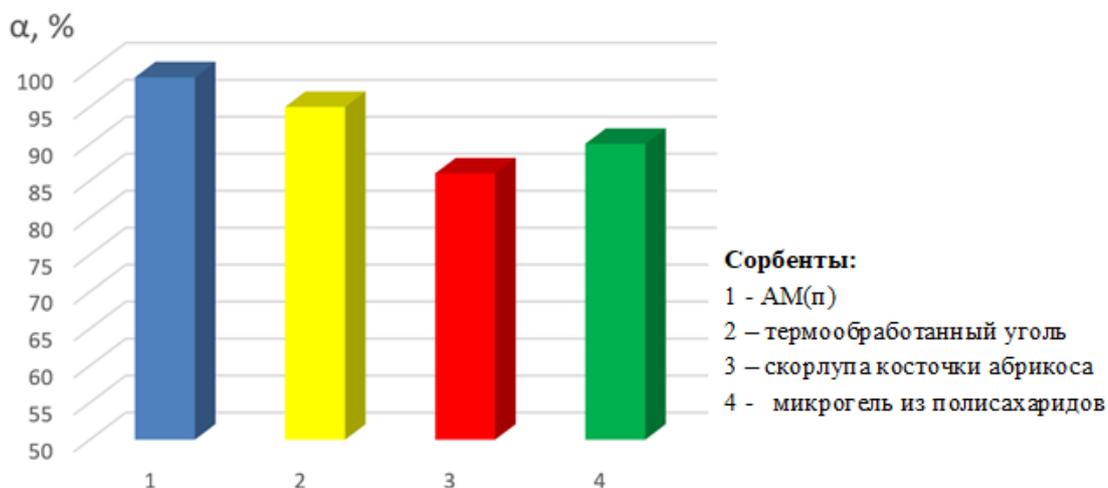


Рисунок 6.6 - Сравнительный анализ сорбционных характеристик различных сорбентов (1-4), использованных для извлечения урана из шахтных и технических вод Таджикистана

Проведённый предварительный технико-экономический расчёт показал, что внедрение разработанных технологий переработки шахтных и техниче-

ских вод позволит получить экономический эффект в размере 119 146 долларов США. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию сорбционных и осадительных процессов, а также их адаптацию к промышленным масштабам.

Таким образом, разработанные методы извлечения урана из урансодержащих вод Таджикистана представляют собой перспективное направление, обеспечивающее экологическую безопасность и экономическую выгоду. Их применение позволит снизить радиоактивную нагрузку на окружающую среду и эффективно использовать вторичные источники урана.

Проведенное исследование охватывает широкий спектр вопросов, связанных с добычей, переработкой и утилизацией урановых руд, а также влиянием уранодобывающей промышленности на окружающую среду. Основные обсуждения можно разделить на несколько ключевых аспектов:

По технологическим основам получения урана рассмотрены основные методы переработки урановых руд, включая кислотное и щелочное выщелачивание, фторирование и микробиологические методы. Проанализированы различные типы урановых месторождений, их морфология и технологическая применимость. Подробно изучены гидрометаллургические процессы, такие как кучное и подземное выщелачивание. Освещена история развития урановой отрасли в Таджикистане и перспективы вторичной переработки отходов уранового производства.

Проведено комплексное исследование урансодержащих руд месторождений Таджикистана, таких как «Танзим», «Центральный Таджикистан», «Западный Таджикистан», «Восточный Памир» и «Северный Таджикистан - 2». Для руд указанных месторождений проводился анализ химико-минералогических составов, получены соответствующие характеристики и выделены основные минералы, слагающие руды. В основном урансодержащими минералами изученных руд месторождений являются коффиниты, ураниниты и настураны. Учитывая минералы состава руд, методы их переработки были оптимизированы под каждый из видов руд: для силикатных руд рекомендовано

сернокислотное выщелачивание, для карбонатных – карбонатный метод. Исследован термодинамический анализ сернокислотного выщелачивания, показавший влияние температуры, концентрации реагентов и примесей на процесс извлечения урана. Определены пути минимизации радиоактивных отходов и методы их безопасного хранения.

Изучены технологические параметры кислотного и карбонатного выщелачивания урановых руд для различных месторождений Таджикистана. Определены оптимальные условия выщелачивания, позволяющие достичь высокой степени извлечения урана (до 95,6%). Проведен анализ влияния температуры, времени и pH раствора на эффективность процесса. Разработаны рекомендации по применению окислителей и сорбентов для повышения экономической эффективности технологии.

Проведено исследование различных методов сорбционного извлечения урана, включая использование ионообменных смол, активированных углей и природных адсорбентов. Оценена эффективность термообработанных углей из месторождения Фан-Ягноб и микрогелей, созданных на основе пектиновых полисахаридов корзинок подсолнечника. Показаны возможности извлечения урана из природных ураносодержащих вод и промышленных отходов, а также оптимизированы способы утилизации насыщенных сорбентов, учитывающие экономическую целесообразность и экологическую безопасность.

6.3. Экологические аспекты производства урановых концентратов

Влияние урановых отходов на окружающую среду и здоровье населения остается актуальной проблемой в Республике Таджикистан. В данной работе проводится сравнительный анализ радиологической обстановки на хвостохранилищах Дегмай и Истиклол с целью выявления особенностей загрязнения, определения основных источников радиационной опасности и оценки возможных мер по снижению негативного воздействия.

Хвостохранилище Дегмай является одним из крупнейших объектов уранового наследия в Таджикистане. Основные показатели радиационной обстановки включают:

- максимальная мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) – 12 мкЗв/ч в центральной части хвостохранилища;
- уровень радона в атмосферном воздухе вблизи объекта достигает 2 500 Бк/м³ в зимний период;
- среднегодовые концентрации радона в жилых районах Гозиён не превышают 50 Бк/м³, что соответствует допустимым нормам;
- содержание урана в почвах вблизи объекта – 25-39 Бк/кг.

Площадка Табошар в городе Истиклол – другой крупный объект уранового наследия, включающий хвостохранилища, рудные отвалы и бывшие комбинаты обогащения урана. Основные показатели радиационной обстановки:

- средний уровень фоновой радиации составляет 140–150 нЗв/ч, но на отдельных участках (рудник Табошар) он достигает 467 нЗв/ч;
- на отвале штольни № 6 около школы № 5 зафиксирован уровень > 2000 нЗв/ч;
- загрязнение грунта радионуклидами превышает фоновые уровни, особенно в районах складирования хвостового материала;
- уровень радона в воздухе и почве превышает аналогичные показатели Дегмая.

Сравнительный анализ радиологических показателей, таких как максимальный уровень МАЭД, фоновая радиация, уровень радона в воздухе, содержание урана в почве для хвостохранилищ Дегмай и Истиклол, приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Сравнительная таблица радиологических показателей

Показатель	Хвостохранилища	
	Дегмай	Истиклол
Максимальный уровень МАЭД, мкЗв/час	12	2
Фоновая радиация, мкЗв/час	0,15-0,20	0,14-0,15
Уровень радона в воздухе, Бк/м ³	До 2 500	>2 500 Бк/м ³
Уран в почве, Бк/кг	25-39	До 574

Анализ данных показывает, что наиболее загрязненные участки требуют проведения рекультивационных работ и строгого контроля радиационного фона. Наиболее эффективными методами являются:

- рекультивация хвостохранилищ с использованием защитного слоя грунта;
- мониторинг уровней радона и других радионуклидов в почвах и воде;
- создание ограничительных зон с ограниченным доступом на наиболее загрязненных участках.

Сравнительный анализ радиологической обстановки на хвостохранилищах Дегмай и Истиклол показывает, что уровень загрязнения существенно варьируется в зависимости от объекта. В Дегмае наиболее высокие уровни МАЭД зафиксированы в центральных частях хвостохранилища, тогда как в Истиклоле значительное загрязнение связано с рудными отвалами и складированием хвостового материала. Для снижения радиационного воздействия необходимы срочные рекультивационные мероприятия, постоянный мониторинг и контроль за уровнем загрязнения в окружающей среде.

В работе проведены исследования по воздействию уранодобывающей промышленности на окружающую среду. Изучены радиационные характеристики урановых хвостохранилищ, выявлены зоны с повышенными уровнями

радиации. Проанализированы концентрации радона в атмосферном воздухе и их влияние на близлежащие населенные пункты. Проведен мониторинг загрязнения почвы, воды и воздуха в районах уранодобычи. Разработаны рекомендации по рекультивации загрязненных территорий, включая снижение пылевого загрязнения и улавливание радона.

ВЫВОДЫ

1. Применение методов химического анализа, дифференциально-термического (ДТА) и рентгенофазового (РФА) исследований позволило детально изучить химико-минералогический состав урановых руд, добываемых из месторождений Таджикистана - "Танзим", "Восточный Памир", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан" и "Северный Таджикистан - 2" [2-А, 12-А, 15-А, 16-А, 18-А, 23-А, 26-А, 29-А, 36-А, 39-А, 40-А, 42-А, 45-А, 47-А].

2. Подтверждена эффективность промышленной переработки урано-содержащих руд указанных месторождений. Определены оптимальные концентрации серной кислоты и натриевого карбоната, способствующие эффективному процессу выщелачивания. Установлены кинетические характеристики и термодинамические параметры реакций, обеспечивающие максимальное извлечение урана [2-А, 12-А, 15-А, 16-А, 17-А, 18-А, 23-А, 38-А, 40-А, 42-А, 45-А, 48-А, 49-А, 54-А, 59-А].

3. Проведён анализ кинетики выщелачивания урана при различных температурных условиях (293, 313, 333 К) и временных интервалах (1–10 часов). Рассчитаны значения энергии активации процессов, позволяющие установить механизмы реакции и определить наиболее рациональные технологические параметры для максимального извлечения урана [2-А, 12-А, 16-А, 18-А, 23-А, 46-А].

4. Разработаны базовые схемы-технологии переработки урановых руд, добываемых из месторождений "Танзим", "Восточный Памир", "Центральный Таджикистан", "Западный Таджикистан" и "Северный Таджикистан - 2". Разработаны технологические процессы, направленные на эффективное извлечение урана из руд указанных месторождений. Показана их перспективность с 99-процентным извлечением урана на этапе осаждения [2-А, 9-А, 16-А, 17-А, 18-А, 23-А, 28-А, 47-А].

5. Определены термодинамические характеристики процессов при серно-кислотном выщелачивании урановых руд месторождений Таджикистана [20-А, 25-А, 27-А, 28-А, 31-А].

6. Показана возможность выделения урана из отходов урановых хвостохранилищ Таджикистана. Разработаны технологические схемы выделения урана из отходов урановых хвостохранилищ Таджикистана [5-А, 11-А, 12-А, 13-А, 14-А, 24-А, 30-А, 35-А, 41-А, 43-А, 50-А, 51-А, 56-А].

7. Разработана обобщённая схема-технология для извлечения из рассольных вод озера Сасык-Куль ураносодержащих соединений. Схема включает несколько этапов: выпаривание, выщелачивание, улавливание выделяющихся хлороводородных газов, сорбцию, десорбцию, осаждение, сушку и прокаливание готового соединения. Подтверждена эффективность извлечения урана из рассольных вод с содержаниями хлорид-ионов [10-А, 12-А, 22-А, 45-А].

8. Исследованы сорбционные методы извлечения урана. Рассмотрены методы сорбции на ионообменных смолах, углях и природных сорбентах. Исследована эффективность термообработанных углей месторождения Фан-Ягноб и микрогелей на основе пектиновых полисахаридов [3-А, 4-А, 6-А, 7-А, 8-А, 19-А, 21-А, 22-А, 44-А, 52-А, 58-А, 60-А, 62-А].

9. Разработана технологическая схема сорбционной очистки ураносодержащих вод с использованием сорбентов на основе скорлупы косточек абрикоса и микрогеля. Доказана высокая эффективность применения сорбентов, полученных из местного сырья, для удаления урана из водных растворов [3-А, 6-А, 19-А, 21-А, 22-А].

10. Проведен углублённый анализ возможностей извлечения урана из природных вод и отходов промышленных урановых производств, оптимизированы характеристики сорбционного процесса для повышения его эффективности. Разработана схема-технология для извлечения урана из шахтных и технических вод отходов урановых производств, включающая ключевые этапы: подкисление, сорбцию, термическую обработку, выщелачивание, осаждение, фильтрацию и высушивание полученного соединения [3-А, 4-А, 6-А].

11. Изучены радиационные характеристики урановых хвостохранилищ, выявлены зоны с повышенными уровнями радиации. Проанализированы концентрации радона в атмосферном воздухе и их влияние на близлежащие населенные пункты. Проведен мониторинг загрязнения почвы, воды и воздуха в районах уранодобычи. Разработаны рекомендации по рекультивации загрязненных территорий, включая снижение пылевого загрязнения и улавливание радона [1-А, 32-А, 33-А, 34-А, 37-А, 53-А, 55-А, 57-А, 61-А].

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Разработанные технологии переработки урансодержащих руд Таджикистана рекомендовано использовать для получения соединений урана, как исходное сырьё для ядерного топлива в уранодобывающей и ураноперерабатывающей промышленности.

2. Разработанные схемы могут внедряться на гидрометаллургических заводах для повышения извлечения урана из различных типов сырья.

3. Разработанную технологию переработки урансодержащих отходов рекомендовано использовать для извлечения соединений урана и других металлов при получении полезных ископаемых из техногенных месторождений.

4. Внедрение схем вторичной переработки урановых отходов способствует более полному использованию минерального сырья, снижению объёма опасных отходов и реализации принципов безотходного производства.

5. Разработан и рекомендован способ извлечения урана из технических и шахтных вод, как дополнительные источники получения урана.

6. Разработан и рекомендован способ очистки урансодержащих вод, наряду с разработкой решений для устранения экологических проблем, связанных с уранодобывающей промышленностью, которую можно использовать в технологии утилизации и переработки техногенных отходов. Сорбционные

схемы, разработанные в работе, могут быть адаптированы для удаления тяжёлых металлов и радионуклидов из технических, шахтных и дренажных вод — не только урановых, но и других горнодобывающих объектов.

7. Применение предложенных методик выщелачивания, кислотного и щелочного разложения, а также термодинамических расчётов — в технологических линиях, связанных с неорганическим сырьём. Использование местных сорбентов в процессах очистки растворов от радионуклидов в химической и радиохимической промышленности.

8. Разработки по радиационному мониторинг загрязнений, радонового фона и разработка мероприятий по снижению радиационного риска в населённых пунктах можно использовать в экологической безопасности и радиационной экология.

9. Данные по выщелачавнию, термодинамики и кинетики рекомендовано включить в банк данных для расчетов и проектирования технологий неорганических веществ.

10. Материалы диссертации рекомендовано использовать как учебные материалы при обучении студентов высших учебных заведений по дисциплин химическая технология, технология неорганических веществ, физическая химия, радиохимия и другие.

ЛИТЕРАТУРА

Список использованных источников:

1. Суражский, Д. Я. Методы поисков и разведки месторождений урана / Д. Я. Суражский. - М., 1960. – 240 с.
2. Прибытков, П. В. Основные принципы классификации промышленных урановых руд / П. В. Прибытков // Атомная энергия. – 1960. – Т. 9. – Вып. 3. – С. 201-207.
3. Шевченко, В. Б. Технология урана / В. Б. Шевченко, Б. Н. Судари-ков. - М.: Атомиздат, 1961. - 340 с.
4. Громов, Б. В. Введение в химическую технологию урана / Б. В. Громов. - М.: Атомиздат, 1976. - 336 с.
5. Туроев, Н. С. Химия и технология урана / Н. С. Туроев. – М.: Руды и металлы, 2006. - 396 с.
6. Харрингтон, С. Технология производства урана / С. Харрингтон. - М.: ИЛ, 1961. - 303 с.
7. Основные черты геохимии урана / В. Л. Барсуков, В. И. Герасимовский, А. И. Германов [и др.]. - М.: Издательство АН СССР, 1963. - 352 с.
8. Черников, А. А. К истории изучения минералов урана отечественными исследователями / А. А. Черников, И. В. Песков, Е. Л. Минина // Записки Всероссийского минералогического общества. - 1997. - Т. 126. - № 4. - С. 111-128.
9. Задов, А. Е. Уранпирохлор из ультращелочного пегматита в Ловозерском массиве / Карбонатиты Кольского полуострова / А. Е. Задов, Н. В. Чуканов, И. В. Пеков. - СПб.: СПбГУ, 1999. - С. 57-58.
10. Маслов, А. А. Технология урана и плутония / А. А. Маслов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. - 97 с.
11. Советский атомный проект. Нижний Новгород. Арзамас-16 / Е. А. Негин [и др.]. – Нижний Новгород: Изд-во «Нижний Новгород», 1995. - 205 с.

12. Методические рекомендации по применению классификации запасов к месторождениям радиоактивных материалов: Министерство природных ресурсов РФ. – М.: Наука, 2005. – 68 с.
13. Урановые месторождения Таджикистана / З. А. Розыков, Э. Г. Гусанов, А. А. Марущенко [и др.]. - Худжанд: ООО «Хуросон», 2001. – 212 с.
14. Пионеры секретного атома (50 лет первенцу атомной промышленности СССР по добыче и переработке урана в Таджикистане, 1945-1995 гг.) (исполнитель: А. Зиновьев) / Ю. Фильцер, В. Ларин, З. Разыков [и др.]. - Чкаловск: ПО «Востокредмет» (Таджикистан), 1995. - 69 с.
15. Технология урана / Н. П. Галкин, Б. Н. Судариков, У. Д. Верятин [и др.]. - М.: Атомиздат, 1964. - 397 с.
16. Чесноков, Н. И. Уранодобывающая промышленность капиталистических стран / Н. И. Чесноков. - М.: Атомиздат, 1979. - 144 с.
17. Спицин, В. И. Исследования в области химии урана / В. И. Спицин. - М.: Наука, 1911. - 211 с.
18. Черняева, И. И. Комплексные соединения урана / И. И. Черняева. - М.: Наука, 1964. – 240 с.
19. Раков, Э. Г. Процессы и аппараты производство радиоактивных и редких металлов / Э. Г. Раков, С. В. Хаустов. - М.: Металлургия, 1993. – 384 с.
20. Дементьев, В. И. Кучное выщелачивание золото и серебра / В. И. Дементьев. - М.: Изд-во ОАО Иргиредмет, 2004.
21. Абсалямов, Х. К. Исследования кучного выщелачивания золотосодержащих руд безцианидными растворителями / Х. К. Абсалямов, Б. К. Кенжалиев, О. Ю. Говядовская // Вестник высшей школы Казахстана. – 1997. - № 4. - С. 5-9.
22. Абсалямов, Х. К. Кучное выщелачивание золотосодержащих окисленных и сульфидных руд / Х. К. Абсалямов, Б. К. Кенжалиев, Б. Б. Бейсембаев. // Международная научно-практическая конференция Комплексное

использование минеральных ресурсов Казахстана»: Тезисы докладов. - Алматы, 1997. - С. 101.

23. Минеев, Г. Г. Кучное и подземное выщелачивание: Учебное пособие / Г. Г. Минеев, Т. С. Минеева. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008.

24. Кучное выщелачивание при разработке урановых месторождений / Под ред. Д. И. Скоробогатова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 151 с.

25. Минеев, Г. Г. Кучное выщелачивание руд: Монография / Г. Г. Минеев, С. Б. Леонов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1997. – 81 с.

26. Кучное и подземное выщелачивание металлов / Г. Д. Лисовский, Д. П. Лобанов, В. П. Назаркин [и др.] / Под ред. С. Н. Волощука. – М.: Недра, 1982. – 113 с.

27. Нестеров, Ю. В. Сырьевая база атомной промышленности. События, люди, достижения / Ю. В. Нестеров, Н. П. Петрухин. – М.: АО Атомредметзолото, 2015. – 288 с.

28. Ветров, В. И. Создание предприятий по добыче и переработке урановых руд / В кн.: Создание первой советской ядерной бомбы / В. И. Ветров, В. В. Кротков, В. В. Куниченко. - М.: Энергоиздат, 1995. - С. 170-198.

29. Ветров, В. И. Сырьевая отрасль ядерной индустрии / В кн.: Ядерная индустрия России / В. И. Ветров, В. В. Кротков, В. В. Куниченко. - М.: Энергоиздат, 2000. - С. 736-800.

30. Круглов, А. К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. - 2-е изд., испр. / А. К. Круглов. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. - 380 с.

31. Живов, В. Л. Уран: геология, добыча, экономика / В. Л. Живов, А. В. Бойцов, М. В. Шумилин / Научный ред. проф. Г. А. Машковцев. - М.: РИС «ВИМС», 2012. - 304 с.

32. Горно-химическая технология добычи урана / В. В. Кротков [и др.]. - М.: ГЕОС, 2001. - 368 с.

33. Шаталов, В. В. История подземного и кучного выщелачивания урана и перспектива дальнейшего развития направления в России / В кн.: Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов. - В 2-х

т. - Т.1: Уран / В. В. Шаталов / Под ред. М. И. Фазлуллина. - М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2005. - С. 15-22.

34. Бойцов, А. В. Развитие горнодобывающего уранового производства в России / В кн.: Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов. - В 2-х т. - Т.1: Уран / А. В. Бойцов, В. И. Разумов / Под ред. М. И. Фазлуллина. - М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2005. - С. 35-40.

35. Филиппов, А. П. Редокс-процессы и интенсификация выщелачивания металлов / А. П. Филиппов, Ю. В. Нестеров. - М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2009. - 543 с.

36. Ковда, Г. А. Технология переработки урановых руд в СССР / Советская атомная наука и техника / Г. А. Ковда, Б. Н. Ласкорин, Б. В. Невский. - М.: Атомиздат, 1987.

37. Комплексная переработка урановых руд: Разведка и добыча радиоактивного сырья / Атомная наука и техника в СССР / Б. Н. Ласкорин [и др.]. - М.: Атомиздат, 1977.

38. Переработка бедных урановых руд в СССР / Uranium ore processing / Д. И. Скороваров, Б. Н. Ласкорин, Г. Ф. Иванов [и др.]. - Vienna, 1976. - P. 141-153.

39. Добыча и переработка урановых руд в СССР / Б. Н. Ласкорин, В. А. Мамилов, Ю. А. Корейшо [и др.] / Nuclear power experience. - Vienna. - 1983. - V. 3. - P. 437-449.

40. Добыча урана методом подземного выщелачивания / В. А. Мамилов, Р. П. Петров, Г. Р. Шушания [и др.]. - М.: Атомиздат, 1980. - 248 с.

41. Бахуров, В. Г. Подземное выщелачивание урановых руд / В. Г. Бахуров, С. Г. Вечеркин, И. К. Луценко. - М.: Атомиздат, 1969. - 150 с.

42. Подземное выщелачивание полиэлементных руд / Под ред. акад. Н. П. Лаверова. - М.: Изд-во Академии горных наук, 1998. - 446 с.

43. Халиков, Р. Х. Взаимодействие объектов подземного выщелачивания с водозаборами и способы защиты подземных вод / Р. Х. Халиков, З. А.

Разыков, В. П. Коптелов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2003. – Т. 46. - № 11-12. – С. 76-83.

44. Ядерная энергетика мира: Отчёт за 2005 год // Атомная техника за рубежом. – 2006. - № 8. - С. 27.

45. Последние достижения в области разработки технологии и промышленной переработки урансодержащего сырья / В. В. Шаталов, В. И. Никонов, В. А. Болдырев [и др.] // III Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности»: Сборник докладов. - Алматы: Бастау, 2005. – С. 8-14.

46. Добыча урана методом подземного выщелачивания / Под ред. В. А. Маилова. – М.: Атомиздат, 1980. - 240 с.

47. Жаксыбаева, Г. С. К вопросу подземного выщелачивания урана / Г. С. Жаксыбаева // Вестник КазНТУ. – Алматы. - 2005. - № 6. – С. 86-90.

48. Опыт мониторинга подземного выщелачивания скважинными геофизическими методами на Хиагдинском месторождении урана / К. Ю. Бушков, В. П. Тимофеев, А. Б. Ильченко [и др.] // III Международный симпозиум «Уран: геология, ресурсы, производство». - М.: ФГУП «ВИМС», 2013. – С. 31-32.

49. Инновационная технология управления разработкой месторождений урана методом скважинного подземного выщелачивания / А. А. Дементьев, А. С. Бабкин, А. Д. Истомин [и др.] // III Международный симпозиум «Уран: геология, ресурсы, производство». – М.: ФГУП «ВИМС», 2013. – С. 30-31.

50. Филиппов, А. П. Сернокислотное подземное выщелачивание урана с использованием HNO_2 в качестве окислителя / А. П. Филиппов, В. В. Кротков, Ю. В. Нестеров // III Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности»: Сборник докладов. - Алматы: Бастау, 2005. – С. 71-76.

51. Берикболов, Б. Р. Основные результаты проведения полномасштабного опыта подземного выщелачивания на месторождении Акдала / Б. Р.

Берикболов, Ю. С. Александров, А. Ф. Вершков // III Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности»: Сборник докладов. - Алматы: Бастау, 2005. – С. 127-137.

52. Возвращение реакторов малой мощности // Атомная техника за рубежом. – 2003. - № 3.

53. Гагаринский, А. Ю. Ядерная энергетика и общество: Российское измерение / А. Ю. Гагаринской // Энергия: экономика, техника, экология. – 2007. - № 1. - С. 52-55.

54. Plutonium at the Semipalatinsk Nuclear Test Site (SNTS) / К. К. Kadyrzhanov, S. Khazhekber, V. P. Solodukhin [et al.] // Journal of Radioanalytical and Nuclear chemistry. - 2005. - V. 263. - № 1. - P. 229-234.

55. Реакторные комплексы ИГР, «Байкал-1», ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований / Э. С. Айтхожин, Ж. Р. Жотабаев [и др.]. - Курчатов, 2000. - 75 с.

56. Результаты физических исследований с топливом низкого обогащения и выгорающим поглотителем тепловых нейтронов в реакторе ИВГ. 1М / Ю. В. Алейников, Ю. А. Попов, А. А. Прозоров [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2006. - Вып. 4. - С. 71-74.

57. Mirsaidov, U. From History of Reception of Nature Uranium / U. Mirsaidov, N. Khakimov // International Conference on Fifty Years of Nuclear Power - the Next Fifty Years. - Obninsk, 2004. - Door of Extended Synopses. - M., 2004. - P. 162-163.

58. Кадыржанов, К. К. Ядерно-энергетическая отрасль Республики Казахстан / К. К. Кадыржанов, Ж. Р. Жотабаева. – Курчатов, Республика Казахстан, 2007. – 125 с.

59. Мирсаидов, И. У. Физико-химические основы получения урановых концентратов из отходов и сырьевых материалов / И. У. Мирсаидов. – Душанбе: Дониш, 2014. – 106 с.

60. Хакимов, Н. Физико-химические и технологические основы получения урановых концентратов из отходов гидрметаллургических заводов и

технических вод / Н. Хакимов, Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов. – Душанбе: Дониш, 2012. – 120 с.

61. Мирсаидов, У. М. Отходы уранодобывающего производства в Таджикистане / У. М. Мирсаидов // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 128-130.

62. Урановые хвостохранилища в Центральной Азии: национальные проблемы, региональные последствия, глобальные решения. - Рамочный документ к Международному форуму. - Женева, 2009. - 44 с.

63. Khakimov, N. Physico-Chemical and Manufacturing Basis for Uranium Concentrates Production from Wastes of Hydrometallurgical Plants and Technical waters / N. Khakimov, Kh. M. Nazarov, I. U. Mirsaidov. - Dushanbe, 2012. - 120 p.

64. Оценка состояния бывших урановых объектов и текущей деятельности по их реабилитации / Н. Хакимов, А. Адхамов, И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров // Международный семинар «Урановое наследие Советского Союза в Центральной Азии: проблемы и решения». – Душанбе, 2012. - С. 51-57.

65. Хакимов, Н. Экологический риск при вторичной переработке урановых отвалов Гафуровского хвостохранилища / Н. Хакимов, Х. М. Назаров, У. М. Мирсаидов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2005. - Т. 48. - № 7. - С. 43-48.

66. Хакимов, Н. Кинетика процесса выщелачивания отвалов Гафуровского и Чкаловского хвостохранилищ / Н. Хакимов, Х. М. Назаров // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2005. - Т. 48. - № 8. - С. 87-95.

67. Хакимов, Н. Физико-химические и технологические основы переработки отходов уранодобывающей промышленности: дис. ... канд. техн. наук / Н. Хакимов. – Душанбе, 2006.

68. Баротов, Б. Б. Физико-химические и технологические основы получения урановых концентратов из местных сырьевых материалов Таджикистана: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б. Б. Баротов. – Душанбе, 2011. – 28 с.

69. Мирсаидов, И. У. Физико-химические и технологические основы получения урановых концентратов из местных сырьевых ресурсов Таджикистана: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. У. Мирсаидов. – Душанбе, 2016. – 48 с.

70. Физико-химические и технологические основы переработки урансодержащих отходов / Ф. А. Хамидов, Б. Б. Баротов, Н. Хакимов [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. – 2016. - № 3. – С. 84-89.

71. Мирсаидов, И. У. Опытные-промышленные испытания сорбционных свойств местных сырьевых материалов при очистке урансодержащих руд / И. У. Мирсаидов, Ф. А. Хамидов, Н. Рахматов // XII Нумановские чтения «Состояние и перспективы развития органической химии в Республике Таджикистан. – Душанбе, 2015. – С. 72-73.

72. Физико-химические и технологические основы переработки урансодержащих отходов Таджикистана / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, Ф. А. Хамидов, Х. М. Назаров // Республиканская научно-практическая конференция «Проблемы материаловедения в Республике Таджикистан», посвящённая Дню химика и 80-летию со дня рождения академика Международной инженерной академии Вахобова Анвара Вахобовича. - Душанбе, 2016. – С. 224-226.

73. Извлечение уранового концентрата из различных сырьевых ресурсов Таджикистана / И. У. Мирсаидов, Б. Б. Баротов, Н. Н. Рахматов [и др.] // Там же. – С. 226-228.

74. Физико-химические основы получения урановых концентратов из местных сырьевых материалов Таджикистана / У. М. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Ф. А. Хамидов, И. У. Мирсаидов // XVII Международная конференция «Сахаровские чтения 2017 года: экологические проблемы XXI века. – Минск, Беларусь, 2017. – С. 96-97.

75. Радиологический мониторинг хвостохранилищ Таджикистана и выделение уранового концентрата из отходов урановой промышленности /

У. М. Мирсаидов, Ф. А. Хамидов, С. М. Бахронов, С. В. Муминов // Там же. – С. 97.

76. Камалов, Д. Д. Извлечение урана из отходов урановой промышленности, термические и термодинамические характеристики получения урановых соединений: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. Д. Камалов. – Душанбе, 2008.

77. Переработка рентабельных отвалов для добычи урана / У. М. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров, Д. Д. Камалов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2005. – Т. 48. - № 7. – С. 55-61.

78. Пути повышения извлечения урана из Гафуровского и Чкаловского хвостохранилищ на стадии выщелачивания / У. М. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров, Д. Д. Камалов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2005. – Т. 48. - № 7. – С. 103-109.

79. Рахматов, Н. Н. Физико-химические основы получения урановых концентратов из супесчаных почв и шахтных вод: автореф. дис. ... канд. хим. наук / Н. Н. Рахматов. – Душанбе, 2016. – 21 с.

80. Физико-химическое состояние урана в шахтных урансодержащих водах и супесчаных почвах / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Ф. Дж. Саломов [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2013. - Т. 56. - № 9. - С. 725-729.

81. Рахматов, Н. Н. Кинетика процесса выщелачивания супесчаных урансодержащих почв / Н. Н. Рахматов, И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров // Материалы XII Нумановских чтений. – Душанбе, 2015. – С. 80-83.

82. Извлечение урана из сернокислотных растворов супесчаных почв с промышленным сорбентом АМ(п) / Н. Н. Рахматов, И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов // Материалы XII Нумановских чтений. – Душанбе, 2015. – С. 83-84.

83. Рахматов, Н. Н. Физико-химическое состояние урана в супесчаных почвах / Н. Н. Рахматов, И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров // Материалы XII Нумановских чтений. – Душанбе, 2015. – С. 84-86.

84. Тиллобоев, Х. И. Механизм миграции радионуклидов в почве и хранилищах радиоактивных отходов / Х. И. Тиллобоев, М. И. Сабуров, З. Х. Тиллобоева, Р. Муродова // V Международная научно-практическая конференция «Экологические особенности биоразнообразия». – Худжанд, Таджикистан, 2013. - С. 163-165.

85. Биогеохимическое опробование в системе «хвостохранилища-почва-растения» / Х. И. Тиллобоев, М. И. Сабуров, И. У. Усманов, М. А. Дадобоев / IX Международная практическая конференция «Современные достижения науки». – Чехия, 2013.

86. Тиллобоев, Х. И. Использование гидрохимических данных для решения экологических проблем города Худжанда / Х. И. Тиллобоев, Ф. Х. Очилова, З. Х. Бободжонова // Международная научно-практическая конференция, посвящённая 55-летию д.х.н., проф., чл.-корр. АН РТ М. А. Куканиева. – Душанбе, 2015. - С. 171-173.

87. Тиллобоев, Х. И. Гидрохимическое обследование загрязнение окружающей среды / Х. И. Тиллобоев, М. М. Юнусов, М. И. Сабуров / Международная научно-практическая конференция, посвящённая 55-летию д.х.н., проф., чл.-корр. АН РТ М. А. Куканиева. – Душанбе, 2015. - С. 173-174.

88. Тиллобоев, Х. И. Гидрохимическое обследование загрязнение окружающей среды / Х. И. Тиллобоев, М. М. Юнусов, М. И. Сабуров / Международная научно-практическая конференция, посвящённая 1150-летию персидско-таджикского алхимика и философа Абубакра Мухаммад ибн Закария Рази. – Душанбе, 2015. - С. 172-173.

89. Тиллобоев, Х. И. Радиоактивные изотопы естественная составляющая загрязнение природной среды / Х. И. Тиллобоев, М. М. Юнусов / Международная научно-практическая конференция, посвящённая «Десятилетию действий вода для жизни». – Чкаловск, Таджикистан, 2015. - С. 40-43.

90. Естественные радионуклиды в почвах на территории ареала хвостохранилища Адрасман / М. З. Ахмедов, Х. М. Назаров, Ш. А. Рахимбердиев, У. М. Мирсаидов // Доклады НАН Таджикистана. - 2023. – Т. 66. - № 5-6. - С. 331-336.

91. Экологические проблемы радиационной опасности урановых хвостохранилищ Согдийской области Таджикистана / Х. М. Назаров, М. З. Ахмедов, Т. Г. Хайров [и др.] // Международная конференция «Инженерные исследования, инновации и инвестиции в области энергетики и промышленности». – Душанбе, 2023. – С. 167-173.

92. Ахмедов, М. З. Оценка радиоэкологической ситуации на урановых хвостохранилищах Северного Таджикистана / М. З. Ахмедов // Известия НАН Таджикистана. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. - 2023. - № 2. (191). – С. 141-146.

93. Assessment of the potential radiation hazard of the Adrasman tailing dump (Tajikistan) for the Population living around it / U. Mirsaidov, Kh. Nazarov, B. D. Boboev [et al.] // Journal of Health and Environmental Research. – 2022. – V. 8. - № 2. – P. 151-158.

94. Ахмедов, М. З. Обзор радиационной безопасности в Таджикистане / М. З. Ахмедов // Известия НАН Таджикистана. - 2023. - № 1 (190). – С. 117-122.

95. Алексахин, Р. М. Ядерная энергия и биосфера / Р. М. Алексахин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 215 с.

96. Szado, A. Radioecology and Environmental Protection / A. Szado. – Budapest, 1993.

97. Бондаренко, А. П. Основы радиационной экологии: Учебно-методическое пособие / А. П. Бондаренко. - Павлодар, 2007. – 100 с.

98. Белозерский, Г. Н. Радиационная экология / Г. Н. Белозерский. - М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 384 с.

99. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль – М.: Гидрометеиздат, 1984. - 560 с.

100. Лазановская, И. Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / И. Н. Лазановская, Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова. – М.: Высшая школа, 1998. – 287 с.
101. Комплексные оценки качества поверхностных вод / Под ред. А.М. Никанорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 139 с.
102. Archtr, V. Lung cancer among uranium miners in the United States / V. Archtr, Y. Wandoner // Health Phys. - 1973. - V. 25. - № 4. - P. 351.
103. Мониторинг водной миграции урана и радона / Х. М. Назаров, К. А. Эрматов, С. М. Бахронов, У. М. Мирсаидов // XVIII Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века»: Материалы конференции. – В 3-х ч. – Минск, 2018. - С. 246.
104. Будников, Г. К. Тяжёлые металлы в экологическом мониторинге водных систем / Г. К. Будников // Соросовский образовательный журнал. – 1998. - № 5. - С. 23-29.
105. Линник, Н. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах / Н. Линник, Б. И. Набиванец. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. - 270 с.
106. Мур, Дж. В. Тяжёлые металлы в природных водах / Дж. В. Мур, С. Рамамурти. – М.: Мир, 1987. - 140 с.
107. Tessier, A. Metal speciation and bioavailability in aquatic systems / A. Tessier, D. R. Turner // Publ. J. Wiley. – 1995. – 696 p.
108. Источники загрязнения реки Сырдарья естественными и искусственными радионуклидами / Х. М. Назаров, Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов, Х. Муртазоев // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2005. - Т. 48. - № 9-10. - С. 18-23.
109. Назаров, Х. М. Радиоэкологическая обстановка в окрестности водохранилища Кайраккум / Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев, Н. Хакимов // Республиканская научно-практическая конференция «Роль молодёжи в решении важнейших проблем в процессе глобализации»: Сборник статей и тезисов. – Душанбе, АН РТ, 2014. - С. 160-169.

110. Радиационный мониторинг на берегах Кайракумского водохранилища / Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев, Н. Хакимов, Ш. Абдуллоев // Международный семинар «Урановое наследие Советского Союза в Центральной Азии: проблемы и решения». – Душанбе, АЯРБ, 2012. - С. 10-16.

111. Экологическая обстановка Кайракумского водохранилища / Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев, Н. Хакимов, Х. Муртазаев // Республиканская научно-практическая конференция «Единение наций и развитие науки и техники». – Чкаловск, ГМИТ, 2009. - С. 91-94.

112. Исследование качества поверхностных вод реки Сырдарья (в пределах Согдийской области) / З. А. Разыков, Дж. Н. Шерматов, Д. Д. Ходжибаев, Х. М. Назаров // Международный научно-практический семинар «Интеграция результатов Международного проекта «Водная гармония», Евразийское образование»: Сборник статей. – Черкассы: Вертикаль, 2015. - С. 291-294.

113. Правильный отбор проб и пробоподготовка – гарантия получения достоверных результатов анализа воды / З. А. Разыков, Дж. Н. Шерматов, Д. Д. Ходжибаев, Х. М. Назаров // Международный научно-практический семинар «Интеграция результатов Международного проекта «Водная гармония», Евразийское образование»: Сборник статей. – Черкассы: Вертикаль, 2015. - С. 295-298.

114. Концентрация тяжёлых металлов в реке Сырдарье Северного Таджикистана / З. А. Разыков, Дж. Н. Шерматов, Д. Д. Ходжибаев, М. М. Юнусов / Международная научно-практическая конференция «Технологии водоподготовки, биотехнологии и экологические аспекты»: Сборник тезисов. – Киев, Украина, 2013. - С. 36-37.

115. Разыков, З. А. Мониторинг физико-химических показателей воды реки Сырдарья в 2013-2014 гг. (на территории Республики Таджикистан) / З. А. Разыков, Д. Д. Ходжибаев // XXI век. Техносферная безопасность, - 2017. - Т. 2. - № 1. - С. 38-43.

116. Разыков, З. А. Содержание тяжёлых металлов реки Сырдарья по сравнению с другими реками мира / З. А. Разыков, М. М. Юнусов, Д. Д. Ходжибаев // Вестник Таджикского национального университета, Серия естественных наук. - 2017. - № 1/3. - С. 206-209.

117. Разыков, З. А. Исследование качества поверхностных вод р. Сырдарья (в пределах Согдийской области) / З. А. Разыков // Международный научно-практический семинар «Водная гармония». – Черкассы: Вертикаль, 2015. - С. 291-294.

118. Разыков, З. А. Международная деятельность ГМИТ по водным проблемам / З. А. Разыков, Х. М. Назаров // Республиканская научно-практическая конференция «Проблемы использования водных ресурсов и пути их решения». – Бустон, Таджикистан, 2018. - С. 109-112.

119. Назаров, Х. М. Аккумуляции тяжёлых металлов в Кайраккумском водохранилище / Х. М. Назаров, З. А. Разыков, Д. Д. Ходжибаев // Международная конференция «Вилояти Сугд: захирахои об ва истифодаи онҳо». – Худжанд, 2018. - С. 372-380.

120. Влияние донных отложений на формирование качества воды реки Сырдарья / З. А. Разыков, Х. М. Назаров, Д. Д. Ходжибаев, В. М. Миряхъяев // Международная научно-практическая конференция «Логистика и мультимодальные перевозки: проблемы и пути их решения». – Бустон, ГМИТ, 2018. - С. 269-270.

121. Ходжибаев, Д. Д. Динамика распределения тяжёлых металлов в реке Сырдарья в пределах Республики Таджикистан: дис. ... канд. техн. наук / Д. Д. Ходжибаев. - Душанбе: Эргграф, 2018. - 120 с.

122. Фомин, Г. С. Вода, контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по Международным стандартам: Энциклопедический справочник, 2-ое изд. / Г. С. Фомин. – М., 1995. - С. 462-472.

123. Серия отчётов по безопасности. Анналы МКРЗ, Публикация 103, Рекомендации. Международная комиссия по радиологической защите. – Вена, МАГАТЭ, МКРЗ, 2007.

124. Нормы радиационной безопасности (НРБ-06) СП2.6.1.001.06. – Душанбе: Дониш, 2006. - 165 с.

125. Содержание изотопов ^{210}Po и ^{210}Pb в воде искусственного озера г. Истиклола Республики Таджикистан и их бионакопление в организме рыб / Х. М. Назаров, В. М. Миряхьяев, Х. И. Тиллобоев [и др.] // Радиационная гигиена. - 2019. - Т. 12. - № 2 (спецвыпуск). - С. 50-53. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-10-2-50-53.

126. Назаров, Х. М. Миграция урана в системе «Дренажные воды-почва» на территории хвостохранилища №1-2 г. Табошар / Х. М. Назаров, Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2009. - Т. 52. - № 3. - С. 224-227.

127. Тиллобоев, Х. И. Бионакопление изотопов урана в водных объектах северного Таджикистана / Х. И. Тиллобоев, М. Юнусов / XIII Международная научно-практическая конференция «Экология. Радиация. Здоровье». – Семей, 2017. - С. 174-175.

128. Тиллобоев, Х. И. Опыт биогеохимических исследований в окружающей среде / Х. И. Тиллобоев, М. Юнусов, М. Собиров / XIII Международная научно-практическая конференция «Экология. Радиация. Здоровье». – Семей, 2017. - С. 154-155.

129. Тиллобоев, Х. И. Аспекты изучения и оценка качества вод водохранилища г. Гулистон / Х. И. Тиллобоев, М. М. Юнусов / Международный семинар «Управление водными ресурсами и современные технологии очистки воды». – Бустон, Таджикистан, 2018. - С. 123-125.

130. Бободжонова, З. Х. Изучение распространения и миграции радионуклидов в водной среде / З. Х. Бободжонова, Х. И. Тиллобоев, М. М. Юнусов // Маводи конференсияи чумхурияви илми-назарияви тахти унвони «Масъалаҳои рушди илм дар мактабҳои оли». – Бустон, Таджикистан, 2019. - С. 45-49.

131. Тиллобоев, Х. И. Методика измерения радона в водной среде и рекомендации по уменьшению его концентрации в воде / Х. И. Тиллобоев, М.

М. Юнусов, З. Х. Бободжонова // Маводи конференсияи байналмилалӣ илми-назариявӣ «Омилҳои гидроиклимӣ истифодаи захираҳои оби Осиёи Марказӣ» бахшида ба 30-солагии Истиклолияти давлатии ҚТ ва Даҳсолаи байналмилалӣ амал «Об барои рушди устувор, солҳои 2018-2028». – Хучанд, Таджикистан, 2019. - С. 371-373.

132. Тиллобоев, Х. И. Подземные воды как индикатор загрязнения водных объектов / Х. И. Тиллобоев / Маводи конференсияи байналмилалӣ илми-назариявӣ таҳти унвони “Омилҳои гидроиклимӣ истифодаи захираҳои оби Осиёи Марказӣ” бахшида ба 30-солагии Истиклолияти давлатии Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Даҳсолаи байналмилалӣ амал “Об барои рушди устувор, солҳои 2018-2028”. – Хучанд, Таджикистан, 2019. - С. 375-378.

133. Качество воды реки Зеравшан на территории северного Таджикистана / М. З. Ахмедов, Х. М. Назаров, А. М. Мирзоев [и др.] // Водные ресурсы, энергетика и экология. – Душанбе. – 2022. - № 2. – Ч. 2. – С. 158-161.

134. Качество воды родников, расположенных вокруг горного массива Моголтау / Ф. И. Умаров, К. А. Эрматов, Х. М. Назаров [и др.] // XV Нумановские чтения. – Душанбе, Институт химии АН РТ, 2019. – С. 159-162.

135. Технология очистки урансодержащих шахтных и дренажных вод / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, М. З. Ахмедов [и др.] // Сборник научных трудов сотрудников Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН РТ «Радиоэкологический мониторинг биосреды и радиационная безопасность Таджикистана». - Душанбе: Агентство по ядерной радиационной безопасности АН РТ, 2010. - С. 91-102.

136. Характеристика подпочвенных вод и радиационный фон на поверхности хвостохранилищ Северного Таджикистана / Б. Б. Баротов, М. З. Ахмедов, И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2009. – Т. 52. - № 2. – С. 105-106.

137. Разработка технологических основ очистки урансодержащих шахтных и дренажных вод от урана / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров [и др.] // XV Нумановские чтения. – Душанбе, 2009. - С. 226-228.

138. Хакимов, Н. Очистка шахтных и дренажных вод от урана / Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов, М. З. Ахмедов // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии». – Душанбе, 2009. - С. 238-239.

139. Мирсаидов, И. У. Технология очистки урансодержащих шахтных и дренажных вод / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, М. З. Ахмедов // Известия АН Республики Таджикистан. – 2009. - № 2 (135). - С. 63-71.

140. Ахмедов, М. З. Физико-химические и технологические основы очистки сточных вод: дис. ... канд. хим. наук / М. З. Ахмедов. – Душанбе, 2010. – 100 с.

141. Хакимов, Н. О возможности извлечения урана из шахтных вод месторождения Киик-Тал Таджикистана / Н. Хакимов, Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2005. - Т. 48. - № 9-10. - С. 100-104.

142. Хакимов, Н. Экологические проблемы извлечения урана из шахтных вод месторождения Киик-Тал Таджикистана / Н. Хакимов, Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов // Международная конференция «Сахаровские чтения 200г года: «Экологические проблемы 21 века». - Минск, 2007. - С. 169.

143. Мирсаидов, И. У. Исследование сорбционных свойств скорлупы урюка / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2007. - Т. 50. - № 1. - С. 46-50.

144. Конструкционные особенности аппарата для сорбции урана из шахтных и технических вод / С. Гафуров, Н. Хакимов, Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов // Известия АН Республики Таджикистан. Отд. физ.-мат., хим. и геол. наук. - 2007. - № 3 (128). - С. 78-82.

145. Мирсаидов, И. У. Использование местных материалов в качестве сорбента для извлечения урана из сточных шахтных и технических вод горнодобывающих предприятий / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов // Горный журнал. - 2011. - № 12. - С. 60-62.

146. Мирсаидов, И. У. Кинетика процесса сорбции урана скорлупой урюка / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Б. Б. Баротов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2007. - Т. 50. - № 6. - С. 532-535.

147. Физико-химические характеристики бифункционального сорбента из растительного сырья / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Н. Рахматов [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2013. - Т. 56. - № 8. - С. 634-638.

148. Изучение сорбционных свойств шишек сосны / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2013. - Т. 56. - № 10. - С. 810-815.

149. Технология очистки урансодержащих шахтных и дренажных вод / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов, М. З. Ахмедов // Известия АН Республики Таджикистан. - 2009. - № 2 (135). - С. 63-71.

150. Сорбция ионов урана из шахтных и дренажных вод с помощью шишек арчи в динамическом режиме / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, М. Хикматов [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. - 2014. - № 3 (156). - С. 64-69.

151. Мирсаидов, И. У. Использование местных сырьевых материалов для адсорбции урана из вод отходов горнодобывающей промышленности Таджикистана: Сборник научных трудов сотрудников Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН РТ / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов. - Душанбе: АЯРБ АН РТ, 2010. - С. 116-120.

152. Хакимов, Н. Очистка шахтных и дренажных вод от урана / Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов, М. З. Ахмедов // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии». – Душанбе, 2009. - С. 238-239.

153. Сорбция урана активированными углями / Х. М. Назаров, А. М. Баротов, И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов // Международная научно-практическая конференция «Комплексный подход к использованию и переработке угля». – Душанбе, 2013. - С. 42-43.

154. Физико-химические основы выделения урановых концентратов из отходов урановой промышленности / И. У. Мирсаидов, Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов [и др.] // Международная научно-практическая конференция, посвящённая 1150-летию персидско-таджикского алхимика и философа Абубакра Мухаммад ибн Закария Рази. – Душанбе, 2015. - С. 172-173.

155. Очистка урансодержащих вод с применением активированных бентонитовых глин / Д. Р. Рузиев, И. У. Мирсаидов, М. З. Ахмедов [и др.] // Там же. - С. 73-74.

156. Природные сорбенты для очистки урансодержащих вод / Х. М. Назаров, Н. Н. Рахматов, И. У. Мирсаидов [и др.] // Там же. - С. 74-75.

157. Мирсаидов, И. У. Опытнo-промышленные испытания сорбционных свойств местных сырьевых материалов при очистке урансодержащих руд / И. У. Мирсаидов, Ф. А. Хамидов, Н. Н. Рахматов // Там же. - С. 72-73.

158. Патент ТЖ 109. Способ извлечения урана из шахтных вод / Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров. - Заявка № 0700104 от 04.05.2007 г.

159. Малый патент ТЖ 678. Способ очистки шахтных и дренажных вод от урана / Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов, М. З. Ахмедов, Н. Н. Рахматов. – Заявка № 1400867. Заявл. 02.07.2014. Зарег. 13.03.2015.

160. Сорбционные свойства скорлупы ореха / Н. Н. Рахматов, Х. М. Назаров, А. В. Аксёнов [и др.] // V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов». – Иркутск, 2015. -С. 155-159.

161. История организации и развития промышленного производства на Комбинате № 6. 1945-1965 гг. – Чкаловск: Фонды ГП «Востокредмет».

162. Хан, Г. А. Опробование, контроль и автоматизация процессов обогащения / Г. А. Хан. - М.: Наука, 1958. - 350 с.

163. Скриниченко, М. Л. Радиометрическое обогащение бедных урановых руд / М. Л. Скриниченко, А. П. Татарников, А. И. Горшков // Междуна-

родная конференция МАГАТЭ по ядерной энергетике и её топливному циклу. IAEA-CN-36/321. - Зальцбург, 1977.

164. Черносивтов, Ю. Л. Требования промышленности к качеству минерального сырья / Ю. Л. Черносивтов. - М.: Атомиздат, 1959. - 210 с.

165. Богатырёв, В. Л. Иониты в смешанном слое / В. Л. Богатырёв. – Л.: Химия, 1968. - 280 с.

166. Шмидт, В. С. Экстракция аминами / В. С. Шмидт. - М.: Атомиздат, 1970. - 165 с.

167. Исследование и разработка сорбционной технологии извлечения и разделения урана и ванадия / З. А. Разыков, Г. Л. Суетин, Н. Хакимов [и др.] // VII Всероссийская конференция: «Ванадий - химия, технология, применение». – Чусовой, Россия, 2000. - С. 123.

168. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. - М.: Госхимиздат, 1961.

169. Лащинский, А. А. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: Справочник / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский. - М.-Л.: Машгиз, 1963.

170. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. - Том I, II и III / В. И. Анурьев. - М.: Машиностроение, 1978.

171. Канторович, З. Б. Основы расчёта химических машин и аппаратов / З. Б. Канторович. - М.: Машгиз, 1960.

172. Разыков, З. А. Экология уранодобывающего предприятия / З. А. Разыков. – Худжанд, 1999. - 184 с.

173. Зеликман, А. Н. Теория гидрометаллургических процессов / А. Н. Зеликман, Г. М. Вольдман, Л. В. Белявская. – М.: Metallurgy, 1975. – 505 с.

174. Раков, Э. Г. Химия и технология неорганических фторидов / Э. Г. Раков. – М.: Изд-во МХТИ им. Менделеева, 1990. – 162 с.

175. Исследование взаимодействия двуокиси кремния с бифторидом аммония / В. Д. Братишко, Э. Г. Раков, Б. Н. Судариков [и др.] // Труды МХТИ им. Менделеева. - 1969. - Вып. 60. - С. 111-115.

176. Михайлов, М. А. Сухие методы синтеза некоторых комплексных фторидов / М. А. Михайлов, Ю. Н. Складнев, Д. Г. Эпов // Известия Сибирского отделения АН СССР. Серия Химических наук. - 1968. - № 4. - С. 64-66.

177. Мельниченко, Е. И. Фторидная переработка редкометалльных руд Дальнего Востока / Е. И. Мельниченко. - Владивосток: Дальнаука, 2002. - 267 с.

178. Демьянова, Л. П. Фторидный способ переработки кварцсодержащего сырья Приамурья с получением высококремнистых продуктов: дис. ... канд. техн. наук / Л. П. Дьякова. – Томск, 2009. - 121 с.

179. Экспериментальное изучение физико-химических условий переработки силикатных и алюмосиликатных пород методом фторидной металлургии / В. С. Римкевич, Е. И. Мельниченко, Ю. Н. Маловицкий [и др.] // XV Российское совещание по экспериментальной минералогии. - Сыктывкар, 2005. - С. 494-496.

180. Ласкорин, Б. Н. Химия урана / Б. Н. Ласкорин. – М.: Наука, 1981. – 504 с.

181. Ласкорин, Б. Н. Химия урана / Б. Н. Ласкорин / Под ред. Б. Ф. Мясоедова. – М.: Наука, 1989. – 466 с.

182. Технология переработки урановых руд / Советская атомная наука и техника: [сб. статей] / Б. Н. Ласкорин [и др.] / Пред. ред. коллегии К. И. Щелкин. – М.: Атомиздат, 1967. – С. 222-240.

183. Сорбенты на основе силикагеля в радиохимии. Химические свойства. Применение. / Б.Н. Ласкорин [и др.] / Под общ. ред. Б. Н. Ласкорина. – М.: Атомиздат, 1977. – С. 251-298.

184. Химические методы разделения изотопов урана / Б. Н. Ласкорин, А. М. Бабенко, Е. А. Филиппов, А. Ф. Трубников / Успехи химии. – 1975. – Т. 44. – Вып. 5. – С. 761-781.

185. Комплексная переработка урановых руд: Разведка и добыча радиоактивного сырья / Атомная наука и техника в СССР / Б. Н. Ласкорин [и др.]. – М.: Атомиздат, 1977.

186. Переработка бедных урановых руд в СССР / Д. И. Скороваров, Б. Н. Ласкорин, Г. Ф. Иванов [и др.] // Uranium ore processing. – Vienna, 1976. – С. 141-153.

187. Химия естественных радионуклидов и вопросы защиты окружающей среды / Химия урана / В. В. Шаталов, Б. Н. Ласкорин. – М.: Наука, 1989. – С. 17-24.

188. Проблемы развития безотходных производств. Серия: Охрана окружающей среды / Б. Н. Ласкорин, Б. В. Громов, А. П. Цыганков, В. Н. Сенин. – М.: Стройиздат, 1981. – 207 с.

189. Каплан, Г. Е. Промышленные методы переработки бедных урановых руд / Г. Е. Каплан, Б. Н. Ласкорин, Б. В. Невский // Атомная энергия. – 1959. – Т. 6. – Вып. 2. – С. 113-123.

190. Ласкорин, Б. Н. Сорбционная извлечения урана из пульпы и растворов / Б. Н. Ласкорин // Атомная энергия. – 1960. - Т. 9. – № 4. – С. 281-296.

191. Рагимли, М. А. Сорбция урана из карбонатсодержащих растворов карбоксилированным волокнистым сорбентом / М. А. Рагимли, А. Н. Нуриев // Конденсированные среды и межфазные границы. – Воронеж. - 2013. - № 4 (15). – С. 438-445.

192. Пирматов, Е. А. Ступенчатое урансодержащих пульпы и сорбционное извлечение урана / Е. А. Пирматов, А. Т. Шоинбаев, З. З. Исакова // Известия научно-технического общества «КАХАК». – Алматы. – 2011. - № 1 (32). – С. 81-87.

193. Селективное извлечение урана из сложных солевых систем на неорганических сорбентах / Ю. В. Островский, Г. М. Заборцев, А. Б. Александров, А. Л. Хлытин // Радиохимия. – 2010. – Т. 5. -№ 1. – С. 60-62.

194. Жаброва, Г. М. Закономерности сорбции и ионного обмена на амфотерных окисях и гидроксидях / Г. М. Жаброва, Ю. В. Егоров // Успехи химии. – 1961. – Т. 30. - № 6. – С. 764-776.

195. Андрианов, А. М. Сорбция урана промышленным образцом гидроксида титана / А. М. Андрианов // Радиохимия. – 1977. - № 19. – Вып. 5. – С. 784-786.

196. Исследование процесса сорбции урана из подземной воды с использованием шунгита, фосфогипса и продуктов их модификации / А. Т. Садуакасова, В. И. Самойлов, В. И. Зеленин, Н. А. Куленова // Комплексное использование минерального сырья. – 2016. - № 2. – С. 51-56.

197. Сорбция урана из озёрной воды с применением природных сорбентов и продуктов их модификации / В. И. Самойлов, В. И. Зеленин, А. Т. Садуакасова, Н. А. Куленова // Комплексное использование минерального сырья. – 2016. - № 3. – С. 91-96.

198. Способ извлечения урана из подземной воды / А. Т. Садуакасова, В. И. Зеленин, В. И. Самойлов, М. А. Адылканов // Вестник ВКГТУ. – Усть-Каменогорск. - 2015. - № 1. – С. 45-48.

199. Исследование процесса сорбционного извлечения из подземной воды / А. Т. Садуакасова, В. И. Самойлов, В. И. Зеленин, Н. А. Куленова // XI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. – Przemysł: «Nauka i studia», 2015. – P. 11-16.

200. Шушков, Д. А. Сорбция радиоактивных элементов цеолитсодержащими породами / Д. А. Шушков, И. И. Шуктомова // Известия Коми научного журнала УрО РАН. – Сыктывкар. - 2013. - № 1. – С. 69-73.

201. Гончарук, В. В. Очистка радиоактивно загрязнённых вод природными сорбентами / В. В. Гончарук, Б. И. Корнилович, В. В. Лукашина // Химия и технология воды. – 1996. - № 2 (18). – С. 131-139.

202. Модифицированные природные цеолиты и цеолитсодержащие композиции – эффективные сорбенты радионуклидов и других вредных веществ / В. В. Кротков, Ю. В. Нестеров, И. Г. Абдулманов [и др.] // Экология и промышленность России. – 1997. - № 10. – С. 4-6.

203. Рачкова, Н. Г. Роль сорбентов в процессах трансформации соединений урана, радия и тория в подзолистой почве / Н. Г. Рачкова, И. И. Шуктомова. – СПб.: Наука, 2006. – 146 с.

204. Возможности переработки урансодержащих руд месторождения "Центральный Таджикистан" / С. К. Ходжиев, Х. М. Назаров, Б. Б. Баротов [и др.] / Доклады АН Республики Таджикистан. - 2017. - Т. 60. - № 3-4. - С. 168-172.

205. Методика количественного химического анализа. Рентгеноспектральное флуоресцентное определение фтора, натрия, магния, алюминия, кремния, фосфора, калия, кальция, скандия, ванадия, хрома, марганца, железа, кобальта, никеля, стронция, циркония, ниобия в горных породах, рудах и продуктов их переработки. Методика №439-РС. – М.: МПР РФ. Федеральный научно-методический центр лабораторных исследований и сертификации минерального сырья "ВИМС". - 2000.

206. Стандарт отрасли. Управление качеством аналитических работ. Методики количественного химического анализа. Разработка, аттестация, утверждение. ОСТ РФ 41-08-205-04.

207. Бахтиаров, А. В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии / А. В. Бахтиаров. – Л.: Недра, 1985. - 144 с.

208. Афонин, В. П. Рентгенофлуоресцентный силикатный анализ / В. П. Афонин, Т. Н. Гуничева, Л. Ф. Пискунова. – Новосибирск: Наука, 1984.

209. Отраслевой стандарт комплексной системы Управления качеством аналитической работы «Классификация методов анализа минерального сырья по точности результатов». ОСТ 41-08-205-99.

210. Отраслевой стандарт комплексной системы Управления качеством аналитической работы «Оперативный лабораторный контроль воспроизводимости результатов количественных анализов минерального сырья». ОСТ 41-08-214-82.

211. Phisico-Chemical basics of processing of uranium-containing ores of the «Western Tajikistan» deposit / I. U. Mirsaidov, B. B. Barotov, M. D. Boboyorov, U. M. Mirsaidov // Applied Solid State Chemistry. – 2019. - № 1. – P. 53-56.

212. Характерные особенности урансодержащих руд месторождения «Восточный Памир» / А. Ш. Насруллоев, С. С. Рахматшоев, Дж. Н. Эшов [и др.] / Доклады НАН Таджикистана. - 2024. - Т. 12. - № 3-4. - С. 34-35.

213. Шестак, Я. Теория термического анализа: Физико-химические свойства твёрдых неорганических веществ = [Thermophysical properties of solids: Their measurements and theoretical thermal analysis] / Я. Шестак / Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 456 с.

214. Егунов, В. П. Введение в термический анализ: Монография / В. П. Егунов. - Самара, 1996. - 270 с.

215. Дифференциально-термический анализ урановых руд Таджикистана / М. Д. Бобоёров, К. О. Бобоев, Б. Б. Баротов [и др.] // Доклады НАН Таджикистана. - 2022. - Т. 65. - № 9-10. - С. 643-646.

216. Характерные особенности урановых руд месторождений Таджикистана / М. Д. Бобоёров, К. О. Бобоев, Б. Б. Баротов [и др.] // Известия НАН Таджикистана. - 2022. - № 4 (189). - С. 90-96.

217. Термодинамический анализ протекающих процессов при серно-кислотном выщелачивании руд месторождений «Западный Таджикистан» и «Центральный Таджикистан» / М. Д. Бобоёров, Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов [и др.] // Известия НАН Таджикистана. - 2020. - №1 (178). - С. 84-88.

218. Термодинамический анализ протекающих процессов при разложении урансодержащих руд серной кислотой / К. О. Бобоев, М. Д. Бобоёров, Дж. Н. Эшов [и др.] // Известия НАН Таджикистана. - 2022. - №1 (186). - С. 88-92.

219. Термодинамический анализ протекающих процессов при разложении урансодержащих руд месторождений «Танзим» / М. Д. Бобоёров, Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов [и др.] // Доклады НАН Таджикистана. - 2022. - Т. 65. - № 9-10. - С. 653-657.

220. Таҳлили термодинамикии равандҳои химиявӣ ҳангоми таҷзияи кислотагии маъдани урандори қони «Помири Шарқӣ» / А. Ш. Насруллоев, С. С. Раҳматшоев, Б. Б. Баротов, И. Мирсаидзода / Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. – 2024. - № 2/3 (126). - С. 88-91.
221. Бобоев, М. Д. Физико-химические основы переработки урансодержащих руд Таджикистана сернокислотными методами: автореф. дис. ... канд. хим. наук / М. Д. Бобоев. – Душанбе, 2023. – 31 с.
222. Сернокислотная добыча урана из рудного месторождения «Центральный Таджикистан» / С. К. Ходжиев, Х. М. Назаров, Б. Б. Баротов [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. – 2017. – Т. 60. - № 4. - С. 71-75.
223. Возможность переработки урансодержащей руды месторождения «Центральный Таджикистан» / С. К. Ходжиев, Х. М. Назаров, М. М. Хочиён [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2017. - Т. 60. - № 3-4. - С. 168-172.
224. Исследование процесса дегидратации гексагидроуранилнитрата / А. Бадалов, Д. Д. Камалов, И. У. Мирсаидов, Н. Р. Эшбеков // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2005. - Т. 48. - № 8. - С. 22-25.
225. Термодинамические характеристики процесса термического разложения нитрата уранила / Д. Д. Камалов, И. У. Мирсаидов, Б. О. Хомидов, А. Бадалов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2005. - Т. 48. - № 9-10. - С. 12-17.
226. Бобоев, Б. Д. Физико-химические основы миграции урана в системе «Дренажные воды - почва» на примере хвостохранилищ № 1-2 г. Табошара Республики Таджикистан: дис. ... канд. хим. наук / Б. Д. Бобоев. - Душанбе, 2010.
227. Опыт исследования законсервированного хвостохранилища / З. А. Разыков, Э. Г. Гусаков, Н. И. Беззубов, Л. М. Павлюк // Цветные металлы. - 2003. - № 3. – С. 82-83.

228. Термодинамический анализ сернокислотного разложения отходов урановой промышленности на территории «Карта 1-9» г. Бустон / С. М. Бахронов, М. З. Ахмедов, М. Д. Бобоёров [и др.] // Доклады НАН Таджикистана. – 2023. – Т. 66. - № 1-2. – С. 97-102.

229. Бобоев, К. О. Технологические основы переработки урановых руд месторождения «Северный Таджикистан-2» и отходов хвостохранилища Адрасман: дис. ... уч. степ. д-ра филос. (PhD) / К. О. Бобоев. – Душанбе, 2024. – 150 с.

230. Сернокислотное выщелачивание урана из руд месторождения «Центральный Таджикистан» / С. К. Ходжиев, Х. М. Назаров, Б. Б. Баротов [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. - 2018. - № 4 (169). – С. 71-75.

231. Кинетика процесса выщелачивания урансодержащей руды месторождения «Октябрьский» Таджикистана / К. О. Бобоев, М. Д. Бобоёров, Б. Б. Баротов, А. М. Мирзоев // XVII Нумановские чтения «Результаты инновационных исследований в области химических и технических наук в XXI веке». – Душанбе, 2022. – С. 50-52.

232. Кинетика процесса выщелачивания урансодержащих руд месторождения «Восточный Памир» / А. Ш. Шарифзода (А. Ш. Насруллоев), С. С. Рахматшоев, М. Д. Бобоёров [и др.] // Доклады НАН Таджикистана. - 2025. - Т. 65. - № 9-10. - С. 653-657.

233. Назаров, Х. М. Осаждение диураната аммония из десорбата / Х. М. Назаров, Н. Хакимов, Б. Б. Баротов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2011. - Т. 54. - № 8. - С. 657-660.

234. Мирсаидов, И. У. Исследование сорбционных свойств скорлупы урюка / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2007. - Т. 50. - № 1. - С. 46-50.

235. Мирсаидов, И. У. Использование местных материалов в качестве сорбента для извлечения урана из сточных шахтных и технических вод гор-

нодобывающих предприятий / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов // Горный журнал. - 2011. - № 12. - С. 60-62.

236. Малый патент Республики Таджикистан № ТЖ 1044. Способ извлечения урана из шахтных вод / М. Д. Бобоёров, Б. Б. Баротов, И. У. Мирсаидов [и др.] . – 05.07.2019.

237. Малый патент Республики Таджикистан № ТЖ 1223. Способ извлечения урана из шахтных вод / К. О. Бобоев, М. Д. Бобоёров, И. Мирсаидзода [и др.]. - 21.10.2020.

238. Извлечение урана из природных урансодержащих вод сложного солевого состава / З. А. Разыков, Г. К. Бакулина, Д. Т. Ниязматова [и др.] // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2002. - Т. 45. - № 1-2. - С. 60-65.

239. Технология извлечения урана из рассола с высоким содержанием хлор-иона / У. М. Мирсаидов, Н. Хакимов, Б. Б. Баротов [и др.] // Сборник научных трудов сотрудников Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан. - Душанбе, 2010. - С. 138-143.

240. Мирсаидов, И. У. Исследование сорбционных свойств скорлупы урюка / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2007. - Т. 50. - № 1. - С. 46-50.

241. Мирсаидов, И. У. Кинетика процесса сорбции урана скорлупой урюка / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Б. Б. Баротов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2007. - Т. 50. - № 6. - С. 532-535.

242. Мирсаидов, И. У. Экологические проблемы урановой переработки отходов промышленности Таджикистана / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов // Международная конференция «Сахаровские чтения: Экологические проблемы 21 века». – Минск, Белоруссия, 2007. - С. 168.

243. Мирсаидов, И. У. Экологические проблемы извлечения урана из шахтных вод месторождения Киик-Тал Таджикистана / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов // Международная конференция «Сахаровские чтения: Экологические проблемы 21 века». – Минск, Белоруссия, 2007. - С. 169.

244. Патент TJ 109. Способ извлечения урана из шахтных вод / Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров. - Заявка № 0700104 от 04.05.2007.

245. Технология очистки урансодержащих шахтных и дренажных вод / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов, М. З. Ахмедов // Известия АН Республики Таджикистан. - 2009. - № 2 (135). - С. 63-71.

246. А. с. Республики Таджикистан № TJ 0184. Природный сорбент и индикатор для урана / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров, Б. Б. Баротов. - Свидетельство о регистрации интеллектуального продукта. - 16.09.2009.

247. Мирсаидов, И. У. Использование местных сырьевых материалов для адсорбции урана из вод отходов горнодобывающей промышленности Таджикистана / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов // Сборник научных трудов сотрудников Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН РТ. – Душанбе: АЯРБ АН РТ, 2010. – С. 116-120.

248. Мирсаидов, И. У. Использование местных материалов в качестве сорбента для извлечения урана из сточных шахтных и технических вод горнодобывающих предприятий / И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, Н. Хакимов // Горный журнал. - 2011. - № 12. – С. 60-62.

249. International Atomic Energy Agency. The Long Term Stabilization of Uranium Mill Tailings. — Vienna: IAEA TECDOC 1403, 2004.

250. International Atomic Energy Agency. Best Practice in Environmental Management of Uranium Mining. — Vienna: IAEA Nuclear Energy Series NF T 1.2, 2010.

251. International Atomic Energy Agency. The Environmental Behaviour of Uranium. — Vienna: IAEA Technical Reports Series, 2023.

252. OECD NEA / IAEA. Managing Environmental and Health Impacts of Uranium Mining. — Paris: OECD NEA, 2014.

253. Salbu, B., Stegnar, P. (eds.). Legacy of Uranium Mining Activities in Central Asia: Contamination, Impact and Risks. — Aas, Norway: Norwegian University of Life Sciences, 2011.

254. Voitsekhovich, O., Jakubick, A., Waggitt, P. Monitoring and Remediation of the Legacy Sites of Uranium Mining in Central Asia. — In: Uranium, Mining and Hydrogeology, Springer, Berlin, 2008.
255. Skipperud, L. et al. Environmental Impact Assessment of Radionuclide and Metal Contamination at Former Uranium Sites Taboshar and Digmai, Tajikistan. — Journal of Environmental Radioactivity, 2013.
256. UN Committee / NRC. Potential Environmental Effects of Uranium Mining and Processing Operations. — Washington: National Academies Press, 2011.
257. US Research Council. Uranium Mining, Processing, and Reclamation. — In: Health and Environmental Impacts, 2011.
258. European Commission / EBRD. Environmental Remediation in Central Asia. — EU regional report, 2019.
259. Rudakov, D. Predictive Assessment of Uranium Ore Tailings Impact on Groundwater and Surface Water Contamination. — Journal of Contaminant Hydrology, 2023.
260. Yin, M. Uranium Re adsorption on Uranium Mill Tailings and Leaching Dynamics. — Hydrometallurgy, 2021.
261. Australian Govt Supervising Scientist Branch. Review of Worldwide Practices for Disposal of Uranium Mill Tailings. — Canberra, 2021.
262. US EPA. Radioactive Waste from Uranium Mining and Milling. — Washington, DC: EPA Fact Sheet, 2018.
263. USGS, E. R. Landa. Uranium Mill Tailings: Nuclear Waste and Natural Laboratory. — U.S. Geological Survey, 2004.
264. Hobbs, C. et al. Radioactive Waste Risks in Central Asia. — UNDP/KCL GAR Report, 2011.
265. Reuters Staff. Unstable nuclear waste dams threaten fertile Central Asia heartland. — Reuters, Apr 2024.
266. Kunze, C. et al. Long term Experiences and Innovations in Mine Remediation. — Dresden Symposium WISSYM, 2019.

267. NTI. Uranium Tailings in Central Asia: The Case of the Kyrgyz Republic. — NTI report, 2009.
268. Leninabad Mining and Chemical Combine. History and environmental legacy of Soviet uranium processing in Tajikistan. — Leninabad, 1945–1992.
269. Vakulovsky, S. M., Tertyshnik, E. G., Kabanov, A. I. Radionuclide transport in the Yenisei River. — arXiv, 2012.
270. Kvashnina, K. O. et al. The chemical state of complex uranium oxides. — arXiv, 2013.
271. Паспорта радиоактивных хвостохранилищ. Агентство по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан. — Душанбе, 2004. — 6 с.
272. Оценка потенциальной радиационной опасности бывших урановых объектов для населения г. Истиклол Республики Таджикистан / Х. М. Назаров, К. А. Эрматов, Дж. А. Саломов [и др.] // Радиационная гигиена. — 2018. - Т. 11. - № 2. — С. 83-89.
273. Радиологический мониторинг хвостохранилищ посёлка Адрасман Республики Таджикистан / М. М. Хакдодов, С. М. Бахронов, Ф. З. Шафиев, Ф. А. Хамидов // Водные ресурсы, энергетика и экология. - 2023. — Т. 3. - № 2. — С. 115-122.
274. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него / Х. М. Назаров, К. А. Эрматов, С. М. Бахронов [и др.] // Радиационная гигиена. — 2019. — Т. 12. - № 1. — С. 115-121.
275. Исследование радиологической ситуации уранового хвостохранилища Дегмай, Республики Таджикистан / И. Мирсаидзода, Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов [и др.] // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. — 2024. - № 2/3 (126). - С. 43-47.
276. Petrova, T. M. et al. The magnetite as adsorbent for hazardous species: review. — arXiv, 2011.

277. Maity, T. et al. Efficient Extraction of Uranyl Ions using Graphene/CNT PAMAM Nanocomposites. — arXiv, Jan 2025.
278. PMC / NCBI. Radon Concentration Survey in Settlements Located near Uranium Mining Sites. — PMC, 2025.
279. Bioremediation of radioactive waste using bacteria, plants and fungi. — Wikipedia review, 2024.
280. Stone, R. Kyrgyzstan's Race to Stabilize Buried Ponds of Uranium Waste. — Science, 2005.
281. Skipperud, L. Uranium Activity Ratio in Water and Fish from Pit Lakes in Kazakhstan and Tajikistan. — Journal of Environmental Radioactivity, 2013.
282. Broder, J., Merkel, A. Uranium, Mining and Hydrogeology. — Springer, 2007.
283. Bauer, S. Tracing the Atom: Nuclear Legacies in Russia and Central Asia. — Taylor & Francis, 2022.
284. Kunze, C. et al. Strategic Master Plan – Environmental Remediation of Uranium Legacy Sites in Central Asia. — IAEA Conference Side Event, 2017.
285. JNKKT Project. Joint Norwegian Kazakhstan Kyrgyzstan Tajikistan: Uranium Legacy Management. — ISTC/UNDP report, 2006–2010.
286. UNDP. Uranium Legacy Remediation in Central Asia – Phase III. — UNDP Program Document, 2020.
287. WNA (World Nuclear Association). Uranium Tailings Safety and Risk. — WNA Working Papers, 2024.
288. Chambers, B. et al. Long term radon and dust emissions from uranium tailings sites. — WNA/IAEA study, 2001.
289. Environmental Earth Sciences – Journal: Transboundary Zarafshan River Pollution (Tajikistan Uzbekistan). — 2015.
290. Barber, D. S. Navruz Experiment: radionuclides in Central Asia rivers. — Journal of Radioanal. Nucl. Chemistry, 2005.
291. European Bank for Reconstruction and Development. Environmental Remediation Account for Central Asia. — EBRD report, 2023.

292. EPA. Management of Uranium Mine Waste: Best Practices. — EPA Report, 2019.
293. USGS. Mapping uranium waste distribution in former USSR republics. — USGS bulletin, 2008.
294. ResearchGate team. RESCA and JNKKT projects outcomes for Central Asia. — 2015 report.
295. E3S Conf. Economics of reclamation of uranium tailings in Central Asia. — Conference paper, 2021.
296. Springer. Environmental Protection Against Radioactive Pollution, NATO workshop proceedings, 2002.
297. Радиологической мониторинг хвостохранилища Дегмай, Республики Таджикистан с определением мощности амбиентного эквивалента дозы и тяжёлых металлов в почве и воде / И. Мирсаидзода, Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов [и др.] // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. – 2024. - № 2/3 (126). - С. 48-53.
298. Исследование радиологической ситуации урановых отходов г. Истиклол, Республики Таджикистан / И. Мирсаидзода, Б. Б. Баротов, Ф. А. Хамидов [и др.] // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. – 2024. - № 2/3 (126). - С. 22-27.
299. Особенности выделения урановых концентратов из руд и урансодержащих вод Таджикистана / У. М. Мирсаидов, Х. М. Назаров, С. К. Ходжиев, Н. Н. Рахматов. – Душанбе: Дониш, 2019. - 190 с.
300. Физико-химические свойства урановых руд месторождения «Центральный Таджикистан» / Х. М. Назаров, С. К. Ходжиев, М. Д. Бобоёров, У. М. Мирсаидов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2018. - Т. 61. - № 2. – С. 183-189.
301. Бобоёров, М. Д. Кинетика разложения урансодержащих руд Таджикистана / М. Д. Бобоёров // Доклады НАН Таджикистана. – 2022. – Т. 65. - № 3-4. – С. 228-232.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

-монография

1-А. **Баротов, Б.Б.** Радиоэкологическая ситуация в Республики Таджикистан. / И. Мирсаидзода, М.З. Ахмедов, **Б.Б. Баротов**, Х.М. Назаров, Ф.А. Хамидов. – Душанбе: Дониш, 2021. – 114 с.

2-А. **Баротов, Б.Б.** Технологические особенности переработки ураносодержащих сырья Таджикистана / И. Мирсаидзода, **Б.Б. Баротов**, Х.М. Назаров, М.Д. Бобоёров. – Душанбе: Дониш, 2024. – 123 с.

-статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан:

3-А. **Баротов, Б.Б.** Кинетика процесса сорбции урана скорлупой урюка / Х.М. Назаров, И.У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, Н. Хакимов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2007. – Т. 50. - № 6. – С. 532-535.

4-А. **Баротов, Б.Б.** Извлечение урана из шахтных и технических вод отходов урановой промышленности / Х.М. Назаров, И. У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, Н. Хакимов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2007. – Т. 50. - № 8. – С. 703-706.

5-А. **Баротов, Б.Б.** Скорлупа урюка как индикатор урана / И.У. Мирсаидов, О.В. Бобошина, Н. Хакимов, **Б.Б. Баротов** // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2007. – Т. 51. - № 12. – С. 824-825.

6-А. **Баротов, Б.Б.** Осаждение диураната аммония из десорбата / Х.М. Назаров, Н. Хакимов, **Б.Б. Баротов** // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2011. - Т. 54. - № 8. - С. 657-660.

7-А. **Баротов, Б.Б.** возможностях извлечения урана из рапы озера Сасык-куль Таджикистана / Н. Хакимов, Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов, Б. Б. Баротов, У. Мирсаидов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2011. –Т.54. -№9. –С. 769-773.

8-А. **Баротов, Б.Б.** Поиск и возможности переработки отходов урановой промышленности / Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов, Б. Б. Баротов,

М. З. Ахмедов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2011. – Т. 54. - № 10. – С. 837-839.

9-А. **Баротов, Б.Б.** Перспективы переработки урансодержащих отходов горной промышленности Таджикистана / И. У. Мирсаидов, Н. Хакимов, Х. М. Назаров, **Б.Б. Баротов**, У. Мирсаидов // Известия АН Республики Таджикистан. – 2013. - Т. 56. - № 3. – С. 222-227.

10-А. **Баротов, Б.Б.** Физико-химические и технологические основы переработки урансодержащих отходов / Ф.А. Хамидов, **Б.Б. Баротов**, Н. Хакимов [и др.] // Известия АН Республики Таджикистан. – 2016. - № 3. – С. 84-89.

11-А. **Баротов, Б.Б.** Возможности переработки урансодержащих руд месторождения "Центральный Таджикистан" / С.К. Ходжиев, Х.М. Назаров, **Б.Б. Баротов** [и др.] / Доклады АН Республики Таджикистан. - 2017. - Т. 60. - № 3-4. - С. 168-172.

12-А. **Баротов, Б.Б.** Сернокислотная добыча урана из рудного месторождения «Центральный Таджикистан» / С. К. Ходжиев, Х. М. Назаров, **Б.Б. Баротов**, М. Д. Бобоев, У. М. Мирсаидов / Известия АН РТ. – 2017. - Т. 60. - № 4. - С. 71-75.

13-А. **Barotov, V.V.** Phisico-Chemical basics of processing of uranium-containing ores of the «Western Tajikistan» deposit / I. U. Mirsaidov, **V.V. Barotov**, M. D. Boboyorov, U. M. Mirsaidov / Applied Solid State Chemistry. – 2019. - № 1. – P. 53-56.

14-А. **Баротов, Б.Б.** Термодинамический анализ протекающих процессов при сернокислотном выщелачивании руд месторождений «Западный Таджикистан» и «Центральный Таджикистан» / М. Д. Бобоёров, **Б.Б. Баротов**, Ф. А. Хамидов, Ш. Р. Муродов, У.М. Мирсаидов / Известия НАН Таджикистана. - 2020. - № 1 (178). - С. 84-88.

15-А. **Баротов, Б.Б.** Выделение урановых концентратов из рассолов, дренажных и технических вод / У. М. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, К. О. Бобоев, И. Мирсаидзода (И. У. Мирсаидов), Дж.Н. Эшов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2021. - Т. 64. - № 3-4. – С. 219-223.

16-А. **Баротов, Б.Б.** Физико-химические основы сернокислотного разложения урансодержащих руд Таджикистана / М. Д. Бобоёров, **Б.Б. Баротов**, И. Мирсаидзода (И. У. Мирсаидов), К. О. Бобоев, У. М. Мирсаидов // Доклады АН Республики Таджикистан. – 2021. - Т. 64. - № 1-2. – С. 92-96.

17-А. **Баротов, Б.Б.** Оценка возможности переработки урановых отходов хвостохранилища Адрасман / Х.М. Назаров, И. Мирсаидзода (И. У. Мирсаидов), **Б.Б. Баротов**, К.О. Бобоев, У. М. Мирсаидов // Известия НАН Таджикистана. - 2020. - № 2 (182). - С. 84-89.

18-А. **Баротов, Б.Б.** Дифференциально-термический анализ урановых руд Таджикистана / М.Д. Бобоёров, К.О. Бобоев, **Б.Б. Баротов** [и др.] / Доклады НАН Таджикистана. - 2022. - Т. 65. - № 9-10. - С. 643-646.

19-А. **Баротов, Б.Б.** Характерные особенности урановых руд месторождений Таджикистана / М.Д. Бобоёров, К.О. Бобоев, **Б.Б. Баротов** [и др.] / Известия НАН Таджикистана. - 2022. - № 4 (189). - С. 90-96.

20-А. **Баротов, Б.Б.** Термодинамический анализ протекающих процессов при разложении урансодержащих руд серной кислотой / К. О. Бобоев, М. Д. Бобоёров, Дж.Н. Эшов, **Б.Б. Баротов**, У.М. Мирсаидов / Известия НАН Таджикистана. - 2022. - № 1 (186). - С. 88-92.

21-А. **Баротов, Б.Б.** Термодинамический анализ протекающих процессов при разложении урансодержащих руд месторождения «Танзим» / М. Д. Бобоёров, **Б.Б. Баротов**, Ф.А. Хамидов, Ш. Р. Муродов, У. М. Мирсаидов // Доклады НАН Таджикистана. - 2022. - Т. 65. - № 9-10. - С. 653-657.

22-А. **Баротов, Б.Б.** Особенности анализа урана в урансодержащих рудах и отходах / К. О. Бобоев, М. Д. Бобоёров, **Б.Б. Баротов**, И. Мирсаидзода // Доклады НАН Таджикистана. – 2022. – Т. 66. - № 3-4. – С. 218-222.

23-А. **Баротов, Б.Б.** Таҳлили термодинамикии равандҳои хими-явӣ ҳангоми таҷзияи кислотагии маъдани урандори кони «Помири Шарқӣ» / А. Ш. Насруллоев, С.С. Рахматшоев, **Б.Б. Баротов**, И. Мирсаидзода // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. – 2024. - № 2/3 (126). - С. 70-73.

24-А. **Баротов, Б.Б.** Исследование радиологической ситуации уранового хвостохранилища Дегмай, Республики Таджикистан / И. Мирсаидзода, **Б.Б. Баротов**, Ф.А. Хамидов, М.А. Зоитова, В.А. Умаров / Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. – 2024. - № 2/3 (126). - С. 43-47.

25-А. **Баротов, Б.Б.** Радиологической мониторинг хвостохранилища Дегмай, Республики Таджикистан с определением мощности амбиентного эквивалента дозы и тяжёлых металлов в почве и воде / И. Мирсаидзода, **Б.Б. Баротов**, Ф. А. Хамидов, М.А. Зоитова, Ш.Б. Каримова / Вестник Бо-хтарского государственного университета имени Носира Хусрава. – 2024. - № 2/3 (126). - С. 48-53.

26-А. **Баротов, Б.Б.** Исследование радиологической ситуации урановых отходов г. Истиклол, Республики Таджикистан / И. Мирсаидзода, **Б.Б. Баротов**, Ф. А. Хамидов, Ф.З. Шафиев, Ф. С. Мухиддинова, В. Я. Саидов / Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. – 2024. - № 2/3 (126). - С. 6-13.

27-А. **Баротов, Б.Б.** Получение уранового концентрата из отходов «Фабрики бедных руд» г. Истиклола / С.С. Рахматшоев, **Б.Б. Баротов**, Х.М. Назаров, И. Мирсаидзода (И. У. Мирсаидов), А. С. Курбонов, Т. Г. Хайров / Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. - 2024. - № 2/3 (126). - С. 63-66.

28-А. **Баротов, Б.Б.** Характерные особенности урансодержащих руд месторождения «Восточный Памир» / А.Ш. Насруллоев, С.С. Рахматшоев, Дж.Н. Эшов, **Б.Б. Баротов**, М.Д. Бобоёров, У.М. Мирсаидов // Доклады НАН Таджикистана. - 2024. - Т.12. - № 3-4. - С. 34-35.

29-А. **Баротов, Б.Б.** Радиологический мониторинг на некоторых исторических и туристических объектах Таджикистана / И. Мирсаидзода, **Б.Б. Баротов**, Ш.Р. Муродов, Ф. Мухиддинова, У.М. Мирсаидов // Известия НАН Таджикистана. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. – 2024. – № 2 (195). – С. 93-99.

30-А. **Баротов, Б.Б.** Кинетика процесса выщелачивания урано-содержащих руд месторождения «Восточный Памир» / А.Ш. Шарифзода (А.Ш. Насруллоев), С. С. Рахматшоев, М.Д. Бобоёров, **Б.Б. Баротов**, У. М. Мирсаидов // Доклады НАН Таджикистана. - 2025. - Т. 65. - № 9-10. - С. 653-657.

- публикации в материалах научных конференций и патенты на изобретение:

31-А. **Баротов, Б.Б.** Извлечение урана из природных урансодержащих руд месторождений Северного Таджикистана / Х.М. Назаров, И.У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, Н. Хакимов // Материалы VI Нумановских чтений. – Душанбе, 2009. - С. 228-231.

32-А. **Баротов, Б.Б.** Uranium extraction from natural uranic ores deposits of Northern Tajikistan / Х.М. Назаров, И. У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, Н. Хакимов // VII Международная конференция «Ядерная и радиационная физика». - Алматы, Казахстан, 2009. - С. 235.

33-А. **Баротов, Б.Б.** Карбонатное выщелачивание урановых руд месторождения «Танзим» / Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, Н. Хакимов, М. З. Ахмедов // Материалы семинаров «2011 год – Международный год химии» и «Радиационная безопасность Таджикистана». – Душанбе, 2011. - С. 27-29.

34-А. **Баротов, Б.Б.** О возможности переработки отходов урановой промышленности Таджикистана / Н. Хакимов, **Б.Б. Баротов**, И. У. Мирсаидов, А. М. Баротов, М. З. Ахмедов // Международный семинар «Урановое наследия Советского Союза в Центральной Азии: проблемы и решения». - Душанбе, 2012. - С. 43-47.

35-А. **Баротов, Б.Б.** Физико-химические и технологические основы получения урановых концентратов из местных сырьевых материалов Таджикистана / Б.Б. Баротов, К. А. Эрматов // Республиканская конференция по ядерно-физическим методам анализа состава биологических, геологических, химических и медицинских объектов. - Душанбе, Таджикистан, 2014. - С. 93-94.

36-А. **Баротов, Б.Б.** Физико-химические основы выделения урановых концентратов из отходов урановой промышленности / Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, Ф. А. Хамидов, Ж. А. Мисратов // Международная научно-практическая конференция, посвящённая 1150-летию учёного-энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра Мухаммада ибн Закария Рази. – Душанбе, 2015. - С. 16-17.

37-А. **Баротов, Б.Б.** Контроль радиационной обстановки окружающей среды Таджикистана автоматизированными системами / О.А. Азизов, Дж.К. Камолзода (Дж. Камалов), **Б.Б. Баротов** // Международная научно-практическая конференция «Перспективы использования ядерной технологии и проблемы радиационной безопасности в государствах Центральной Азии. - С. 136-142.

38-А. **Баротов, Б.Б.** Извлечение уранового концентрата из различных сырьевых ресурсов Таджикистана / И. У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, Н. Н. Рахматов, Ф. А. Хамидов, М. З. Ахмедов // Международная научная конференция «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий», посвящённая 25-летию государственной независимости Республики Таджикистан. – Душанбе, 2016. - С. 84-87.

39-А. **Баротов, Б.Б.** Кинетика процесса разложения урановых руд месторождения «Западный Таджикистан» / М. Д. Бобоёров, **Б.Б. Баротов**, И. У. Мирсаидов, С. М. Бахронов, Ш. Р. Муродов // XV Нумановские чтения «Современное состояние химической науки и использование её достижений в народном хозяйстве Республики Таджикистан». - Душанбе, 2019. - С. 165-167.

40-А. **Баротов, Б.Б.** Физико-химические основы переработки ураносодержащих руд Таджикистана / И. У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, М. Д. Бобоёров, С. К. Ходжиев, У. М. Мирсаидов // XV Нумановские чтения «Современное состояние химической науки и использование её достижений в народном хозяйстве Республики Таджикистан». - Душанбе, 2019. - С. 155-156.

41-А. **Баротов, Б.Б.** Эффективность действия окислителя при окислении урана в зависимости от рН среды / М. Д. Бобоёров, С. К. Ходжиев, **Б.Б. Баротов**, И. У. Мирсаидов // Республиканская научно-теоретическая конференция «Основы развития и перспективы химической науки в Республики Таджикистан», посвящённая 60-летию химического факультета и памяти д.х.н., профессора, академика АН РТ И. У. Нуманова. - Душанбе, 2020. - С. 91-94.

42-А. **Баротов, Б.Б.** Технологические основы переработки ураносодержащих руд Таджикистана / И. Мирсаидова, **Б.Б. Баротов**, М. Д. Бобоёров, К. О. Бобоев, У. М. Мирсаидов // Республиканская научно-практическая конференция «Инновационное развитие науки» с участием международных организаций. – Душанбе, 2020. - С. 101-102.

43-А. **Баротов, Б.Б.** Поиск и оценка возможности переработки урановых отходов и отвалов посёлка Адрасман Республики Таджикистан / У. М. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, К. О. Бобоев, Х. М. Назаров // XXI Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2021 года: Экологические проблемы XXI века». - Минск, Беларусь, 2021. – С. 279-282. <https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-279-282>.

44-А. **Баротов, Б.Б.** Выделение редкоземельных металлов из отходов урановой промышленности Таджикистана / Д.Т. Исозода, Ф.А. Назаров, Х. М. Назаров, **Б.Б. Баротов**, И. Мирсаидзода // Международная научно-практическая конференция «Химическая, биологическая, радиационная и ядерная безопасность: достижения, проблемы и будущие перспективы». – Душанбе, 2023. - С. 48-52.

45-А. **Баротов, Б.Б.** Нормативно-правовые сопровождения надзора за проведением реабилитационных работ загрязненных территорий от добычи урана в Республики Таджикистан / У. М. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, Ф. А. Хамидов, М. З. Ахмедов, И. Мирсаидзода // XXIII Международная конференция «Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI века». – Минск, 2023. – Ч. 2. - С. 151-153

46-А. **Баротов, Б.Б.** Сравнительная оценка сорбционных свойств сорбентов на основе местных сырьевых материалов Таджикистана / А. Ш. Насруллоев, **Б.Б. Баротов**, И. Мирсаидзода, М. Д. Бобоёров // Маҷмуаи мақолаҳои Конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалӣ дар мавзӯи “Нақши химия ва саноати химиявӣ дар саноатикунонии босуръати кишвар” бахшида ба эълон гардидани ҳадафи чоруми миллӣ – саноатикунонии босуръати кишвар ва Бистсолаи омӯзиш ва рушди фанҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илму маориф”. - Душанбе, 2024. - С. 141-143.

47-А. **Баротов, Б.Б.** Экологическое воздействие урановых отходов на окружающую среду Таджикистана / У. М. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, И. Мирсаидзода, Ф. А. Хамидов // Маҷмуаи мақолаҳои Конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалӣ дар мавзӯи “Саноатикунонии рақамӣ ва рушди энергетикӣ аз нигоҳи олимону муҳақиқон”. – Бохтар, 2024. - С. 150-155.

48-А. **Баротов, Б.Б.** Физико-химические основы переработки урансодержащих руд Таджикистана / К.О. Бобоев, М. М. Шокиров, А.Ш.

Насруллоев, **Б.Б. Баротов** // Маҷмуаи мақолаҳои конференсияи илмӣ-амалии оли-мони ҷавон «Илм аз дидгоҳи олимони ҷавон» бахшида ба эълонгардидани соли 2024 “Соли маърифати ҳуқуқӣ”. - Душанбе, 2024. - С. 386-389.

49-А. **Баротов, Б.Б.** Обращение с радиоактивными отходами и обработавшими ядерными установками / У. М. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов**, И. Мирсаидзода, Ф. А. Хамидов // X Международная конференция «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века». – Минск, Республика Беларусь, 2024. - С. 26-32.

50-А. **Баротов, Б.Б.** Радиэкологические проблемы Дигмайского хвостохранилища Таджикистана / Х.М. Назаров, Х. И. Тиллобоев, Б. Д. Бобоев, М. З. Ахмедов, **Б.Б. Баротов** // Международная научно-практическая конференция «Цифровая индустрия и энергетическое развитие глазами учё-ных и исследователей». – Бохтар, ГОУ Институт энергетики Таджикистана, 2024. – С. 172.

51-А. **Баротов, Б.Б.** Получение уранового концентрата из отходов урановых хвостохранилищ г. Истиклола / М. М. Исмадинов, Х. М. Назаров, А. Ш. Насруллоев, Ф.З. Шафиев, **Б.Б. Баротов** // III Международная научно-практическая конференция «Инновационное развитие науки» (ИРН -2024).

52-А. **Баротов, Б.Б.** Гидрогеологические особенности загрязнения водной среды на основе системы мониторинга / Х. И. Тиллобоев, Х. М. Назаров, Б. Д. Бобоев, М. З. Ахмедов, **Б.Б. Баротов** // Международная научно-практическая конференция «Современное состояние обеспечения качества и экологической безопасности продовольственных продуктов в Центральной Азии». – Худжанд, Политехнический институт, Таджикский технический университет им. М. С. Осими, 2024. – С. 192-195.

53-А. **Баротов, Б.Б.** Выделение урана из ураносодержащих вод Таджикистана / **Б.Б. Баротов**, М.Д. Бобоёров, Ш.Н. Ишратов, С.С. Рахма-

туллоев // Международная научно-практическая конференция «Перспективы использования ядерной технологии и проблемы радиационной безопасности в государствах Центральной Азии. – Душанбе, 2025. - С. 62-64.

54-А. **Баротов, Б.Б.** Извлечение урана из отходов урановой промышленности Таджикистана / Б.Б. Баротов, К.О. Бобоев, М.А. Зоитова, У.М. Мирсаидов // Там же. - С. 65-70.

55-А. **Баротов, Б.Б.** Извлечение урана из урансодержащих руд Таджикистана / Б.Б. Баротов, М.Д. Бобоёров, М. Шодмонова, А.Ш. Шарифзода // Там же. - С. 70-73.

-патенты Республики Таджикистан:

56-А. **Баротов, Б.Б.** Малый патент Республики Таджикистан ТД № 108. Способ переработки отходов урановой промышленности / Н. Хакимов, Х. М. Назаров, И. У. Мирсаидов, **Б.Б. Баротов.** – Выдан 04.05.2007.

57-А. **Баротов, Б.Б.** Малый патент Республики Таджикистан ТД № 109. Способ извлечения урана из шахтных вод / Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов, О. В. Бобошина, Х. М. Назаров, **Б.Б. Баротов.** – Выдан 07.05.2007.

58-А. **Баротов, Б.Б.** Авторское свидетельство Республики Таджикистан ТД № 0184. Природный сорбент и индикатор для урана / Н. Хакимов, И. У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, **Б.Б. Баротов.** – Выдано 11.09.2009.

59-А. **Баротов, Б.Б.** Малый патент Республики Таджикистан ТД № 927. Способ выщелачивания урановых руд / У. Мирсаидов, Х. М. Назаров, С. К. Ходжиев, М. К. Ходжиён, **Б.Б. Баротов.** – Выдан 27.08.2018.

60-А. **Баротов, Б.Б.** Малый патент Республики Таджикистан ТД № 1044. Способ извлечения урана из шахтных вод / М. Д. Бобоёров, **Б.Б. Баротов,** И. У. Мирсаидов, Ф. А. Хамидов [и др.]. - Выдан 05.07.2019.

61-А. **Баротов, Б.Б.** Малый патент Республики Таджикистан ТД № 1277. Как контролировать уровни радиации в урановых хвостохранилищах / С. М. Бахронов, Е. Ю. Малышева, М. З. Ахмедов, **Б.Б. Баротов,** С. В. Муминов, У. Мирсаидов. – Выдан 21.01.2022.

62-А. **Баротов, Б.Б.** Малый патент Республики Таджикистан ТД № 1223. Способ извлечения урана из шахтных вод / И. Мирсаидзода, Дж. Х. Халиков, Д. С. Мухиддинов, **Б.Б. Баротов**, Ф. А. Хамидов, М. Д. Бобоёров, К. О. Бобоев. - Выдан 21.10.2020.

63-А. **Баротов, Б.Б.** Малый патент Республики Таджикистан ТД № 1384. Способ извлечение редкоземельных металлов из отходов урановой промышленности / И. Мирсаидзода, Х. М. Назаров, **Б.Б. Баротов**, Ф. А. Назаров [и др.]. - Выдан 05.05.2023.

Кандидатская диссертация соискателя:

1-А. **Баротов, Б. Б.** Физико-химические и технологические основы получения урановых концентратов из местных сырьевых материалов Таджикистана: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б. Б. Баротов. – Душанбе, 2011. – 28 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ҶУМҲУРИИ
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ
ДАВЛАТИИ
ПАТЕНТИ

НАХУСТПАТЕНТИ

№ ТҶ 108

БА ИХТИРОИ

Тарзи коркарди партовҳои саноати уранӣ

Дорандаи нахустпатент Ҳақимов Н., Назаров Х.М., Мирсаидов И.У., Баротов Б.Б.

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Муаллиф(он) Ҳақимов Н., Назаров Х.М., Мирсаидов И.У., Баротов Б.Б.

Аввалияти ихтироъ 04.05.2007

Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза 04.05.2007

Аризаи № 0700103

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои

Ҷумҳурии Тоҷикистон 5 феввали с.2008 ба қайд гирифта шуд

Нахустпатент эътибор дорад аз 4 майи с.2007 то 4 майи с.2017



ДИРЕКТОР

Ш. Нажмудинов

ҶУМҲУРИИ
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ
ДАВЛАТИИ
ПАТЕНТӢ

ГУВОҲНОМА

Шахрванд Баротов Б.Б.

муаллифи ихтирои *Тарзи чудокунии уран аз обҳои чоҳҳо*

Ба ихтироъ мебошад
нахустпатенти № ТҶ 109 дода шудааст.

Дорандаи нахустпатент Ҳақимов Н., Мирсаидов И.У., Бабошина О.В., Назаров Х.М., Баротов Б.Б.

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Ҳаммуаллиф(он) Ҳақимов Н., Мирсаидов И.У., Бабошина О.В., Назаров Х.М.

Аввалияти ихтироъ 07.05.2007

Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза 07.05.2007

Аризаи № 0700104

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

5 феввали с.2008 ба кайд гирифта шуд

Нахустпатент
этибор дорад аз 7 майи с. 2007 то 7 майи с.2017

Ин гувоҳнома хангоми амали гардонидани ҳукуку имтиёзҳое, ки барои муаллифони ихтироот бо қонунгузори чорӣ муқаррар гардидаанд, нишон дода мешавад

ДИРЕКТОР

Ш. Нажмудинов



ҶУМҲУРИИ
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ
ПАТЕНТӢ

НАХУСТПАТЕНТ

№ ТҶ 927

БА ИХТИРОИ

Тарзи ишқоронидани маъданҳои урани

Дорандаи
нахустпатент

Агентии амнияти ядрои ва радиатсионии
Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Муаллиф(он) Мирсаидов У., Назаров Х.М., Ҳочиев С.Қ., Ҳочиён М.Қ.,
Баротов Б.Б.

Аввалияти ихтироъ 13.10.2017

Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза 13.10.2017

Аризаи № 1701150

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои

Ҷумҳурии Тоҷикистон 27 августи с. 2018 ба қайд гирифта шуд

Нахустпатент
этибор дорад аз 13 октябри с. 2017 то 13 октябри с. 2027



ДИРЕКТОР

Ҷ. Ҷумъахонзода

ҶУМҲУРИИ
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ
ПАТЕНТӢ

НАХУСПАТЕНТ

№ ТҶ 1044

БА ИХТИРОИ

ТАРЗИ ҶУДОКУНИИ УРАН АЗ ОБҲОИ КОНИ

Дорандаи
нахустпатент

Агентии амнияти ядрои ва радиатсионии Академияи
илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

Сарзамин

Ҷумҳурии Тоҷикистон

Муаллиф(он)

Бобоёров М.Д., Баротов Б.Б., Мирсаидов У., Хамидов Ф.А.,
Давлатназарова М.Д., Муминов С.В., Исобоев М.Д.

Аввалияти ихтироъ 05.07.2019

Таърихи рузи пешниҳоди ариза 05.07.2019

Аризаи № 1901331

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои

Ҷумҳурии Тоҷикистон 4 декабри с. 2019 ба қайд гирифта шуд

Нахустпатент

эътибор дорад аз 5 июли с. 2019 то 5 июли с. 2029



ДИРЕКТОР

М. Исмоилзода

ҶУМҲУРИИ
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ
ПАТЕНТӢ

НАХУСТПАТЕНТ

№ ТҶ 1223

БА ИХТИРОИ

Тарзи ҷудокунии уран аз обҳои конӣ

Дорандаи нахустпатент Агентии амнияти ядрой ва радиатсионии Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Муаллиф(он) Мирсаидзода И., Халиқов Ҷ.Х., Мухиддинов Д.С., Баротов Б.Б., Ҳамидов Ф.А., Бобоёров М.Д., Бобоев К.О.

Аввалияти ихтироъ 21.10.2020

Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза 21.10.2020

Аризаи № 2001476

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои

Ҷумҳурии Тоҷикистон 20 декабри с. 2021 **ба кайд гирифта шуд**

Нахустпатент эътибор дорад аз 21 октябри с. 2020 **то** 21 октябри с. 2030

ДИРЕКТОР

Исмоилзода М.

ҶУМҲУРИИ
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ
ПАТЕНТӢ

НАХУСТПАТЕНТ

№ ТҶ 1384

БА ИХТИРОИ

*ТАРЗИ ИСТИХРОҶИ МЕТАЛЛҲОИ НОДИРЗАМИНӢ АЗ ПАРТОВҲОИ
САНОАТИ УРАНИӢ*

Дорандаи нахустпатент Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Муаллиф(он) Мирсаидзода Илҳом, Назаров Холмурод Марипович, Баротов Бахтиёр Бурхонович, Назаров Фаридун Абдулхамидович, Бахронов Сочидхон Манонҷонович, Бобоёров Меҳровар Диловарович, Мирзоев Амирҷон Маҳмадалиевич, Исозода Диловаршоҳ Тарик.
Аввалияти ихтироъ 19.08.2022

Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза 19.08.2022

Аризаи № 2201724

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои

Ҷумҳурии Тоҷикистон 05 майи с. 2023 **ба қайд гирифта шуд**

Нахустпатент
эътибор дорад аз 19 августи с. 2022 **то** 19 августи с. 2032

ДИРЕКТОР

Исмоилзода М.

ҶУМҲУРИИ
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ
ПАТЕНТИ

ШАҲОДАТНОМА

Шахрванд Назаров Х.М.

муаллифи ихтирои *Тарзи мониторинги радиатсионӣ дар маҳфузгоҳҳои ураний*

Ба ихтироӣ нахустпатенти № ТҶ 1277 дода шудааст.

Дорандаи нахустпатент Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Ҳаммуаллиф(он) Бахронов С.М., Малишева Е.Ю., Аҳмедов М.З., Баротов Б.Б., Муминов С.В., Мирсаидов У.

Аввалияти ихтироӣ 21.01.2022

Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза 21.01.2022

Аризаи № 2201627

Дар Феҳристи давлатии ихтироӣҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

28 июни с. 2022 ба қайд гирифта шуд

Нахустпатент эътибор дорад аз 21 январи с. 2022 то 21 январи с. 2032

Ин шаҳодатнома ҳангоми амали гардонидани ҳуқуқи имтиёзхое, ки барои муаллифони ихтироот бо қонунгузории ҷорӣ муқаррар гардидаанд, нишон дода мешавад

ДИРЕКТОР

Исмоилзода М.

РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН
ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

УДОСТОВЕРЕНИЕ

Гражданин Назаров Х.М.

Является автором изобретения Способ радиационного мониторинга урановых
хвостохранилищ

На изобретение выдан малый патент №ТД 1277

Патентообладатель Агентство по химической, биологической, радиационной и
ядерной безопасности Национальной академии наук
Таджикистана

Страна Республика Таджикистан

Соавторы Бахронов С.М., Малышева Е.Ю., Ахмедов М.З., Баротов Б.Б.,
Муминов С.В., Мирсаидов У.

Приоритет изобретения 21.01.2022

Дата подачи заявления 21.01.2022

Заявление № 2201627

Зарегистрировано в Государственном реестре 28 июня 2022
изобретений Республики Таджикистан

Малый действителен с 21 января 2022 г. по 21 января 2032 г.
Патент

Настоящее удостоверение предъявляется при реализации прав и льгот,
установленных действующим законодательством





Республика Таджикистан

(19) **TJ** (11) **1277**
(51) **МПК: G01T 1/167;**
G01N 1/28; G01N33/18;

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ
ВЕДОМСТВО

(12) **Описание изобретения**
К МАЛОМУ ПАТЕНТУ

1

(21)2201627
(22) 21.01.2022
(46) Бюл. 185, 2022
(71)(73) Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана (ТJ)
(72) Бахронов С.М. (ТJ); Назаров Х.М. (ТJ); Малышева Е.Ю. (ТJ); Ахмедов М.З. (ТJ); Баротов Б.Б. (ТJ); Муминов С.В. (ТJ); Мирсаидов У. (ТJ)
(54) СПОСОБ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА УРАНОВЫХ ХВОСТОХРАНИЛИЩ
(57) Изобретение относится к охране окружающей среды, в частности, радиэкологическому мониторингу урановых хвостохранилищ отходов уранового производства.

2

Радиэкологический мониторинг включает не только проведение радиологических измерений, их интерпретацию, использование данных для оценки уровней опасности и контроля над воздействием. Радиационный мониторинг хвостохранилищ включает также радоновый анализ поверхности хвостохранилищ, состояние покрытия хвостохранилищ и др.
Отличительным признаком предлагаемого способа является то, что проводится одновременный анализ радона, почв и воды на приборах.



ВАЗОРАТИ РУШДИ ИҚТИСОД ВА САВДОИ
ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
МУАССИСАИ ДАВЛАТИИ
МАРКАЗИ МИЛЛИИ ПАТЕНТУ ИТТИЛОӢ



ШАҲОДАТНОМАИ бақайдгирии маҳсулоти зеҳнӣ

Номгӯй Природный сорбент и индикатор
для урана

Муаллиф (он) Хакимов Н., Мирсаидов И.У.,
Назаров Х.М., Баротов Б.Б.

Рақам ва санаи бақайдгирӣ 0184 ТҶ 16.09.2009 с.
Рақам ва санаи ворид гардидани арзнома

184/09 11.09.2009 с.

Шаҳодатномаи мазкур ба амонат
гузоштани тавсифи маҳсулоти зеҳниро
дар МД ММПИ-и Вазорати рушди иқтисод
ва савдои Ҷумҳурии Тоҷикистон
дар ҳаҷми 2 сах.
тасдиқ мекунад.

ДИРЕКТОР


Назмудинов Ш.З.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор дочернего предприятия
«Специализированный Центр
обращения с радиоактивными
отходами» ГУП «Таджредмет»



Хочиев С.

« 04 » февраля 2025 года

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательских работ Бобоёрова М. Д., Баротова Б.Б., Мирсаидова У.М., Давлатназаровой М.Д., Муминова С.В, Исобоева М.Д. на тему: «Способ извлечения урана из шахтных вод»

Мы, нижеподписавшиеся комиссия в составе: Каюмовой Ф. – инженер-геофизика ДП «Специализированный Центр обращения с радиоактивными отходами» ГУП «Таджредмет» (председатель), члены комиссии: Эрматова К.А. – директор Филиала Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана в Согдийской области и Зиёбековой Р. – лаборантки ДП «Специализированный Центр обращения с радиоактивными отходами» ГУП «Таджредмет», рассмотрели вопрос о внедрении в производственной деятельности ДП «Специализированный Центр обращения с радиоактивными отходами» ГУП «Таджредмет» способ извлечения урана из шахтных вод, разработанный сотрудниками Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана Бобоёровым М.Д. и другими (малый патент №ТJ 1044 зарегистрированный в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан от 4 декабря 2019), о чем составили настоящий акт.

Решением комиссии предложенный Бобоёровым М.Д. способ извлечения урана из шахтных вод принят к внедрению в производственную деятельность ДП «Специализированный Центр обращения с радиоактивными отходами» (протокол № 25/2 от « 03 ». « 02 » 2025 года).

В настоящее время добыча урана сопряжена с рядом экологических и технологических проблем, включая загрязнение шахтных вод и необходимость эффективного извлечения радиоактивных элементов. Предложенный метод, основанный на сорбционных свойствах угля,

представляет собой перспективное и сравнительно простое решение для локального очищения вод и извлечения урана.

Особенно важным преимуществом метода является использование доступного и недорогого сорбента — угля, который обладает высокой сорбционной способностью по отношению к ионам урана при различных значениях рН. Кроме того, технология позволяет проводить процесс при сравнительно низких затратах энергии и минимальном вмешательстве в химический состав шахтных вод, что снижает риск вторичного загрязнения.

В целом, исследование вносит вклад в развитие практических методов очистки шахтных вод и технологии добычи урана. Рекомендуем использовать предложенный подход в пилотных и промышленных условиях с дальнейшей проработкой вопросов регенерации угля и безопасного обращения с радиоактивными отходами.

Вывод: Метод извлечения урана из шахтных вод с помощью угля является перспективным, экономически выгодным и экологически безопасным. Дальнейшие исследования могут сосредоточиться на повышении эффективности сорбента и масштабировании технологии для промышленного применения. Доказана эффективность сорбента термообработанного угля по сравнению с другими местными сырьевыми растительными сорбентами для очистки урансодержащих вод.

Председатель комиссии:

Инженер-геофизик ДП «Специализированный
Центр обращения с радиоактивными отходами»



Ф. Каюмова

Члены комиссии:

к.т.н., директор Филиала Агентства
по ХБРЯ безопасности НАН Таджикистан
а в Согдийской области



К. Эрматов

Лаборантка ДП «Специализированный
Центр обращения с радиоактивными отходами»



Р. Зиёбекова



«Утверждаю»

генеральный директор

«Востокредмет», к.т.н.

Хочиён М.К.

«04» мая 2012 года

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

разработки технологии по извлечению урана из шахтных урансодержащих вод на объектах ГП «Востокредмет»

Мы, нижеподписавшиеся, директор ГМЗ ГП «Востокредмет» Шарипов А.Ш., заведующая лабораторией ГМЗ ГП «Востокредмет» Бабошина О.В., директор Филиала агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан Хакимов Н., главный научный сотрудник Филиала агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан Назаров Х.М. и соискатель АЯРБ АН РТ Баротов Б.Б. составили настоящий акт о том, что 20 апреля 2012 г. на территории месторождения «Киик-Тал» ГП «Востокредмет» были установлены четыре сорбционных колонки с целью внедрения разработки технологии по извлечению урана из шахтных урансодержащих вод.

Способ извлечения урана из шахтных вод, включающий сорбцию урана анионитами, осаждением аммиачной водой, фильтрацией и сушкой, отличающийся тем, что в качестве сорбента используют скорлупу урюка. После протекания процесса сорбции, который контролируется содержанием урана в жидкости до 1-3 мг/л, шахтная вода переводится в другие ёмкости.

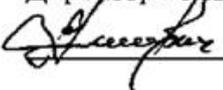
Скорлупу с содержанием 0,12-0,17% или 1,2-1,7 кг/т обжигают на специальной обжиговой печи при температуре 550-600°C. При обжиге объем урансодержащей золы уменьшается в 40-50 раз с содержанием в ней урана 7-8% или 70-80 кг/т. Урансодержащие огарки выщелачивают серной кислотой с добавлением окислителей (азотной кислоты и трехвалентного

железа). После выщелачивания массу фильтруют, получая фильтрат сульфата урана. Далее уран из раствора осаждают аммиачной водой, получают желтый кек урана который прокаливают при температуре 700-850°C в вакууме. Выход продукта 91-92 %. Составы полученного уранового химического концентрата содержание металла - 83,91 %.

Использование разработанной технологии позволяет очищать 35 040 м³ воды в год до одной тонны урана. Стоимость 1 кг урана 170 долларов США. Ожидаемый экономический эффект при добыче одной тонны урана составляет 100 тыс. долларов США.

Таким образом, внедряемые разработки технологии извлечения урана из шахтных вод позволяют использовать доступную природную скорлупу урюка для выделения ценного продукта U₃O₈ и тем самым предотвращают загрязнение водного бассейна данной местности радионуклидами.

От ГП «Востокредмет»

Директор ГМЗ ГП «Востокредмет»
 Шарипов А.Ш.

Заведующая лабораторией ГМЗ
ГП «Востокредмет»
 Бабошина О.В.

От ФАЯРБ АН РТ

 ФАЯРБ АН РТ
Директор ФАЯРБ АН РТ
Хакимов Н.

Главный научный сотрудник
ФАЯРБ АН РТ
 Назаров Х.М.