

На правах рукописи



Зозуля Артем Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОЧНОГО ПОДЗЕМНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СКАЛЬНЫХ УРАНОВЫХ РУД (НА ПРИМЕРЕ
СТРЕЛЬЦОВСКОЙ ГРУППЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ)**

Специальность
25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чита – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Забайкальский государственный университет»

Научный руководитель **Овсейчук Василий Афанасьевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подземной разработки рудных месторождений, ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», (ФГБОУ ВО «ЗабГУ»), г. Чита

Официальные оппоненты: **Юргенсон Георгий Александрович,**
доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (ИПРЭК СО РАН), г. Чита

Логачев Александр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горного дела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (ФГБОУ ВО «ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова»), г. Новочеркасск

Ведущая организация: Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов (АО «ИРГИРЕДМЕТ»), г. Иркутск

Защита состоится «14» сентября 2022 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.299.08 при ФГБОУ ВО «ЗабГУ» по адресу: 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30, зал заседаний Ученого совета.

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

Автореферат разослан «01 » июля

2022 г

Ученый секретарь диссертационного совета,
д-р техн. наук



Г. П. Сидорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Сырьевая база ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение», базирующаяся на запасах урановых руд месторождений Стрельцовского рудного поля, после многолетней работы предприятия очень сильно истощена. В то же время запасы рядовых и бедных по содержанию урана руд весьма значительны. Применение традиционных технологий добычи таких руд низкорентабельно или даже убыточно. Применение же физико-химических геотехнологий для добычи и переработки бедного уранового сырья имеет достаточно большие перспективы. Одно из направлений физико-химической геотехнологии – подземное блочное выщелачивание (БПВ) – с переменным успехом использовалось на рудниках ППГХО в разные периоды его работы. Но серьезного развития это направление так и не получило. Для того чтобы обосновать широкое применение БПВ, необходимо провести более детальное изучение условий его применения, установить зависимости горнотехнологических показателей от природных свойств руд и вмещающих пород, разработать эффективные технологические схемы подготовки разных морфологических типов рудных тел к БПВ, усовершенствовать и упростить методики расчета параметров буровзрывной рудоподготовки и разработать направления повышения извлечения урана в продуктивный раствор.

Степень научной разработанности. Вопросами отработки бедных урановых руд занимались такие российские ученые, как академик Н. П. Лаверов, д-р техн. наук Ж. Алферов, д-р техн. наук И. Г. Абдульманов, д-р техн. наук В. И. Голик, д-р техн. наук В. В. Кротков, д-р техн. наук Д. П. Лобанов, д-р техн. наук В. А. Овсейчук, д-р техн. наук А. Г. Секисов, д-р техн. наук М. Н. Тедеев, В. Ж. Аренс, В. А. Мамилов, Д. И. Скороваров, В. Н. Мосинец и др.

Анализ опыта применения подземного блочного выщелачивания для отработки убогих урановых руд зарубежными и отечественными предприятиями («Висмут» – Германская Демократическая Республика, Лермонтовское рудоуправление, Ленинабадский и Целинный ГОКи в России) показывает, что отработке данной технологией подвергались преимущественно те запасы, которые остались на месторождениях после выемки более богатой части традиционными физико-техническими методами. В категорию запасов, подвергающихся БПВ, попадали руды с неблагоприятными горно-геологическими условиями; запасы в пределах эксплуатационных блоков, оставшихся в результате обрушения камер; запасы краевых частей месторождений с весьма низким содержанием урана; руды низкого качества, но локализованные в высокопроницаемых, трещиноватых породах, минерализация которых представлена легковыщелачиваемыми урановыми минералами окисного ряда. То есть технология подземного блочного выщелачивания выступала не в роли равноправного метода отработки запасов, а в роли вспомогательного подчиненного элемента добычи. Такое положение справедливо для месторождений, где доля убогих руд незначительна. При анализе же сырьевой базы месторождений Стрельцовского рудного поля после отработки богатой составляющей установлено, что запасы бедных и рядовых руд весьма значительны, но в современных экономических условиях

нерентабельны к отработке. Учитывая то, что на ПАО «ППГХО» создана мощная инфраструктурная база горного предприятия, запасы урановых руд позволяют продлить на десятилетия срок существования уранового производства при разработке технологии добычи бедных и рядовых урановых руд, позволяющей вывести это производство на уровень рентабельности. Одной из таких технологий является подземное блочное выщелачивание на базе усовершенствованных методов ведения горных работ.

Таким образом, возникла актуальная научно-техническая задача масштабного внедрения в производство подземного блочного выщелачивания совершенствованием процессов рудоподготовки скальных урановых руд с помощью более совершенных технологических схем, подбора параметров буровзрывных работ (БВР) для получения наиболее эффективного размера куска выщелачиваемой руды и повышения извлечения урана в продуктивный раствор при выщелачивании.

Решение данной научной задачи требует более углубленных исследований физико-механических свойств руд и вмещающих пород, совершенствования методик расчета параметров БВР и процессов выщелачивания замагазинированной руды.

Диссертационная работа выполнена в рамках реализации отраслевой программы Росатома РФ «Повышение эффективности отработки Стрельцовой группы месторождений урана на период до 2025 г.» и Федеральной программы по государственной поддержке ведущих российских вузов «Создание технологии отработки беднобалансовых урановых руд геотехнологическими методами» (Постановление Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218).

Цель работы – повышение эффективности подземного блочного выщелачивания разработкой технологических способов совершенствования процессов буровзрывной рудоподготовки бедных и рядовых урановых руд и повышением извлечения урана в продуктивный раствор.

Идея работы заключается в том, что эффективное управление качеством рудоподготовки горнорудной массы к блочному подземному выщелачиванию буровзрывным способом основывается на установлении зависимости параметров БВР от горно-геологических характеристик рудного сырья, а управление качеством процесса выщелачивания магазинированных руд осуществляется разработанными технологическими операциями предотвращения кольтматации рудной массы и переотложения полезного компонента в виде гидроксида урана.

Для реализации цели работы необходимо решить **следующие задачи**:

- изучить физико-механические, геологические и технологические особенности урановых руд, влияющих на эффективность их рудоподготовки;
- усовершенствовать технологию взрывной рудоподготовки урановых руд для последующего подземного блочного выщелачивания;
- разработать мероприятия по повышению извлечения урана в продуктивный раствор при блочном подземном выщелачивании;
- оценить экономическую эффективность предложенных технологических решений.

Объект исследований – геотехнология обработки бедных и рядовых урановых руд методом подземного блочного выщелачивания.

Предмет исследования – технологические процессы физико-химической геотехнологии при блочном подземном выщелачивании и методы их оптимизации.

Научная новизна:

1. Предложен комплекс достоверного прогнозирования оптимального гранулометрического состава урановых руд, включающий впервые полученные зависимости параметров буровзрывных работ от содержания свободного кремнезема в обрабатываемых рудах различного вещественного состава, что позволяет усовершенствовать методику расчета параметров буровзрывных работ.

2. Установлены аналитические зависимости высоты подэтажа при подготовке крутопадающих рудных тел к блочному подземному выщелачиванию от мощности рудного тела, угла наклона и длины взрывных скважин применительно к горно-геологическим условиям месторождений Стрельцовского рудного поля.

3. Разработана технология формирования рудного «магазина» с применением селективной укладки горнорудной массы разного содержания, позволяющая повысить извлечение урана в продуктивный раствор.

4. Разработана технология устранения механической кольматации при БПВ пневмоимпульсным воздействием на массив от специализированного устройства, генерирующего мощный водо-воздушный импульс через перфорированный трубопровод.

5. Предложена оригинальная методика анализа геолого-технологической ситуации, позволяющая прогнозировать показатели извлечения сырья в эксплуатационных блоках.

Теоретическая значимость исследования состоит в усовершенствовании методики управления качеством обработки бедных и рядовых урановых руд, как одного из основных направлений разработки урановых месторождений с низким содержанием полезного компонента методом подземного блочного выщелачивания на основе выявленных автором зависимостей формирования выщелачиваемой горнорудной массы от горно-геологических характеристик руд и формирования рудного магазина с учетом качественной характеристики руд.

Практическая значимость:

– усовершенствована методика расчета параметров буровзрывных работ от содержания свободного кремнезема и от физико-механических свойств урановых руд, позволяющая достоверно прогнозировать оптимальный гранулометрический состав горнорудной массы;

– разработана схема формирования рудного магазина с послойной укладкой урановой руды с различным содержанием радиоактивного металла, позволяющая повысить извлечение урана в продуктивный раствор;

– предложена технологическая схема предотвращения переотложения выщелоченного урана, включающая селективную укладку горнорудной массы в камере-магазине и подачу рабочего раствора с повышенным содержанием серной кислоты в нижний слой;

– разработана схема устранения механической кольматации в процессе выщелачивания замагазинированной руды посредством использования специа-

лизированного устройства, генерирующего мощный воздушный или водо-воздушный импульс на горный массив.

Методология и методы исследований. Методологической основой исследований по теме диссертационной работы является сумма знаний, полученных при разработке урановых месторождений с применением физико-химических геотехнологий (подземного блочного выщелачивания).

Методология: выявление зависимостей между горно-геологическими и технологическими показателями и влияния их на подготовку сырья к подземному блочному выщелачиванию; установление зависимости эффективности выщелачивания бедных и рядовых урановых руд подземным блочным выщелачиванием от горно-геологических и технологических показателей рудного сырья; установление соответствия результатов опытно-промышленных работ расчетным параметрам подземного блочного выщелачивания.

Методы исследования: анализ литературных источников и опыта работ родственных предприятий по блочному выщелачиванию урановых месторождений; исследование физико-механических характеристик пород и руд; анализ влияния параметров буровзрывных работ на гранулометрический состав магазинируемой руды; анализ влияния на выщелачиваемость руд содержания в них урана и размера куска выщелачиваемой руды; математико-статистические методы обработки исходных данных с применением пакетов прикладных программ Correlay, Statistica, Microsoft Excel 10.0, Gold Surfer.; технико-экономический анализ; математическое компьютерное моделирование процессов выщелачивания; лабораторные и полупромышленные испытания.

Научные положения, выносимые на защиту:

Первое защищаемое положение. Достоверное прогнозирование оптимального гранулометрического состава урановых руд при блочном подземном выщелачивании обеспечивается расчетом параметров буровзрывных работ по усовершенствованной методике, учитывающей выявленные зависимости этих параметров от физико-механических и горнотехнических свойств горных пород и руд.

Второе защищаемое положение. Предотвращение переотложения урана при блочном подземном выщелачивании достигается размещением рядовой по содержанию урана (более 0,050 %) руды в нижних слоях «магазина», а бедной – в верхних. Перевод в подвижное состояние переотложенного урана в замагазинированной руде осуществляется подачей рабочего раствора с заданной концентрацией серной кислоты через пробуренные горизонтальные скважины, обсаженные перфорированными полиэтиленовыми трубами.

Третье защищаемое положение. Впервые разработана технология устранения кольматации при блочном подземном выщелачивании пневмоимпульсным воздействием на массив от специализированного устройства, генерирующего мощный воздушный или водо-воздушный импульс к перфорированным трубопроводам. Из сопл под высоким давлением подается сжатый воздух, разрушающий возникшие механические связи между кусками замагазинированной руды.

Достоверность научных выводов, положений и рекомендаций обоснована корректно поставленными задачами исследования, достаточным количе-

ством отобранных проб и проведенных анализов, подтверждением итогами опытно-промышленных испытаний лабораторных результатов, высокой сходимостью теоретических показателей и результатов экспериментов, применением при проведении испытаний современных технических средств, использованием при обработке информации сертифицированных компьютерных программ, высоким экономическим эффектом от внедрения разработок в производство.

Реализация результатов исследований:

1. Результаты исследований внедрены в производство ПАО «ППГХО» (акт внедрения № 100-01 от 22.02.2022 г.).

2. Результаты исследований используются при подготовке горных инженеров в Забайкальском государственном университете (по специальности 21.05.04 – Горное дело, специализация – Подземная разработка месторождений полезных ископаемых) при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Физико-химическая геотехнология», «Управление качеством руд при добыче полезных ископаемых», «Особенности разработки урановых месторождений», «Проектирование рудников» (акт внедрения от 18.02.2022 г.).

Годовая расчетная экономическая эффективность реализации новых технологических решений составит 237 млн руб. в год.

Личный вклад автора состоит в определении цели и задач исследования, разработке методик исследований, сборе и анализе информации, проведении исследовательских работ по установлению логических связей между горно-геологическими и технологическими параметрами рудного сырья при рудоподготовке и подземном блочном выщелачивании, разработке технологических решений, позволяющих повысить эффективность подземного блочного выщелачивания с выведением технологии на уровень рентабельности, разработке методик прогнозирования результатов разработки для проектирования и планирования горных работ.

Апробация полученных результатов. Основные положения докладывались на Международных научно-практических конференциях «Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов» (ЗабГУ, г. Чита, 2016-2020 г.г.), XLV Научно-практической конференции молодых исследователей ЗабГУ «Молодежная научная весна» (г. Чита, 2018), XVIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Геонауки 2018: актуальные проблемы изучения недр» (г. Иркутск, 2018), Международной научно-практической конференции «Физико-химическая геотехнология – инновации и тенденции развития» (11–12 февраля 2020 г., г. Чита; 20–21 октября 2020 г., г. Чита; 20–21 октября 2020 г., г. Москва).

Публикации. По результатам выполненных работ опубликовано 14 статей, в том числе 8 – в рецензируемых изданиях, из них 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки, входящем в международную реферативную базу данных и систем цитирования Scopus; получен один патент РФ на изобретение.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 202 страницы машинописного текста,

включая 76 рисунков, 14 таблиц, список использованной литературы из 108 наименований и 7 приложений.

В первой главе приведен анализ горно-геологических условий локализации уранового оруденения месторождений Стрельцовского рудного поля и опыта отработки бедных урановых руд методом подземного блочного выщелачивания, поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена технологии совершенствования буровзрывных работ при подготовке камер под подземное блочное выщелачивание, представлены результаты научно-исследовательских работ, посвященных изучению зависимостей параметров БВР от физико-механических и горнотехнических характеристик вмещающих пород и руд месторождений Стрельцовского рудного поля.

В третьей главе рассмотрен вопрос повышения извлечения урана в раствор за счет изменения рН среды и предложена схема рудоподготовки сырья под СПВ.

Четвертая глава освещает вопрос повышения эффективности БПВ за счет предотвращения кольтматации и достоверного планирования показателей извлечения урана в раствор.

Автор благодарен за консультативную и практическую помощь при проведении исследований, анализе материалов, формулировании научных положений научному руководителю д-ру техн. наук, профессору В. А. Овсейчуку, всему коллективу кафедры подземной разработки месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», канд. техн. наук А. А. Морозову и коллективу ЦНИЛ ПАО «ППГХО» за помощь в проведении исследований и организации опытно-промышленных работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

По результатам проведенных исследований сформулированы научные положения, выносимые на защиту:

Первое защищаемое научное положение. Достоверное прогнозирование оптимального гранулометрического состава урановых руд при блочном подземном выщелачивании обеспечивается расчетом параметров буровзрывных работ по усовершенствованной методике, учитывающей выявленные зависимости этих параметров от физико-механических и горнотехнических свойств горных пород и руд.

Подготовка блока для выщелачивания бедных урановых руд на руднике ПАО «ППГХО» показана на рисунке 1.

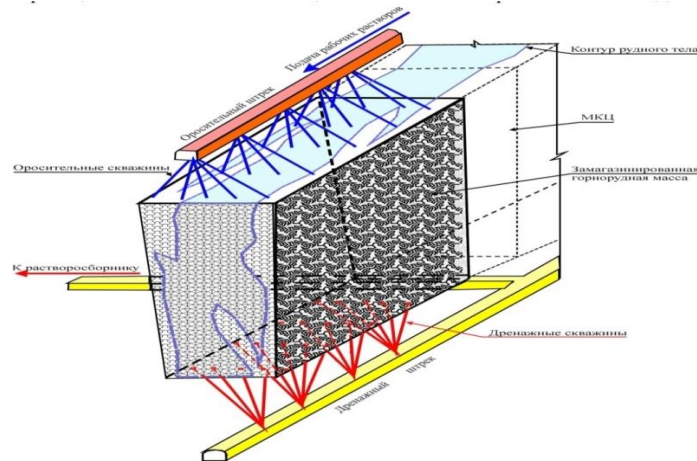


Рисунок 1 – Подготовка блока под подземное выщелачивание

Технологическая схема подземного выщелачивания скальных урановых руд приведена на рисунке 2.

Главным критерием возможности отработки запасов той или иной системой разработки является коэффициент экономической эффективности – отношение всех затрат на стадиях подготовки и отработки блока к ценности извлекаемого компонента. Расчеты показывают, что при коэффициенте извлечения, равном 0,6, способ блочного подземного выщелачивания находится на уровне рентабельности (рисунок 3).

Исходя из опыта применения БПВ на рудниках ПАО «ППГХО», установлено, что совершенствование рудоподготовки руд к выщелачиванию лежит в плоскости нахождения оптимальных параметров БВР, обеспечивающих эффективный размер куска выщелачиваемой руды.

Качественные показатели выхода класса крупности зависят от количественных характеристик физико-механических свойств горных пород. На рисунке 4 приведены рекомендуемые зоны распределения эффективной работы взрывчатых веществ для горных пород, состав которых определяется содержанием кремнезема (SiO_2).

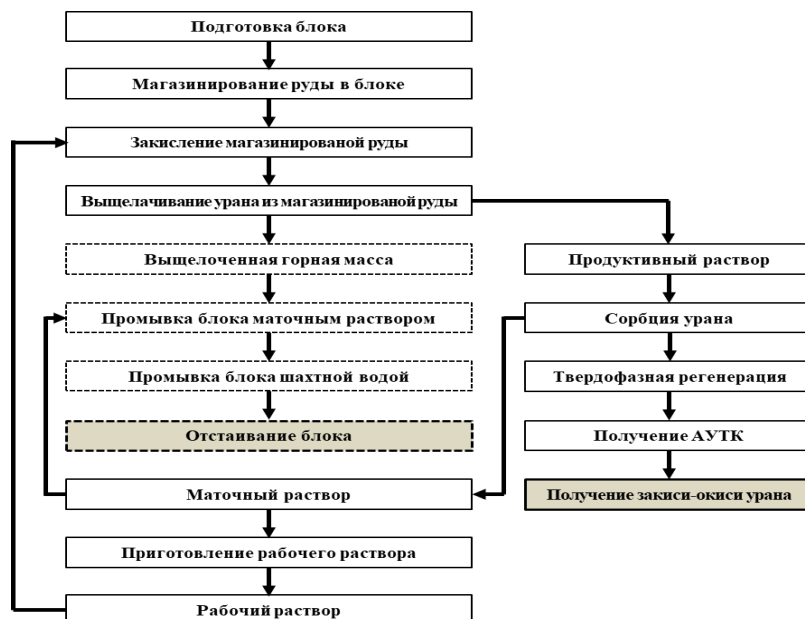


Рисунок 2 – Технологическая схема подземного выщелачивания

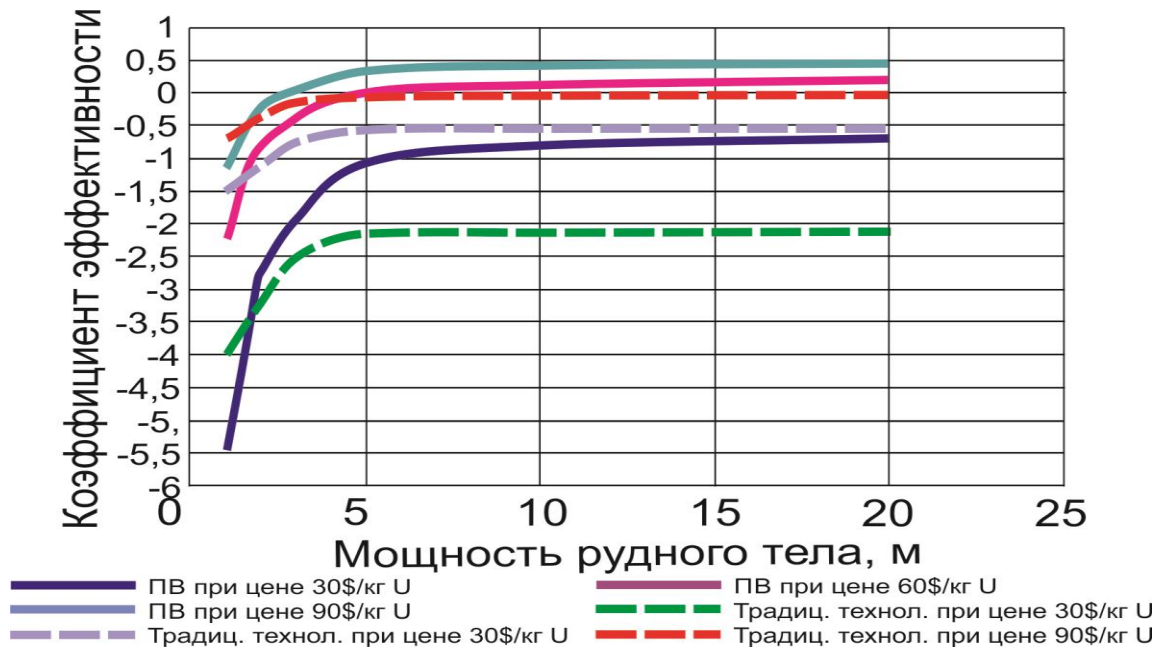


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента экономической эффективности от мощности рудного тела

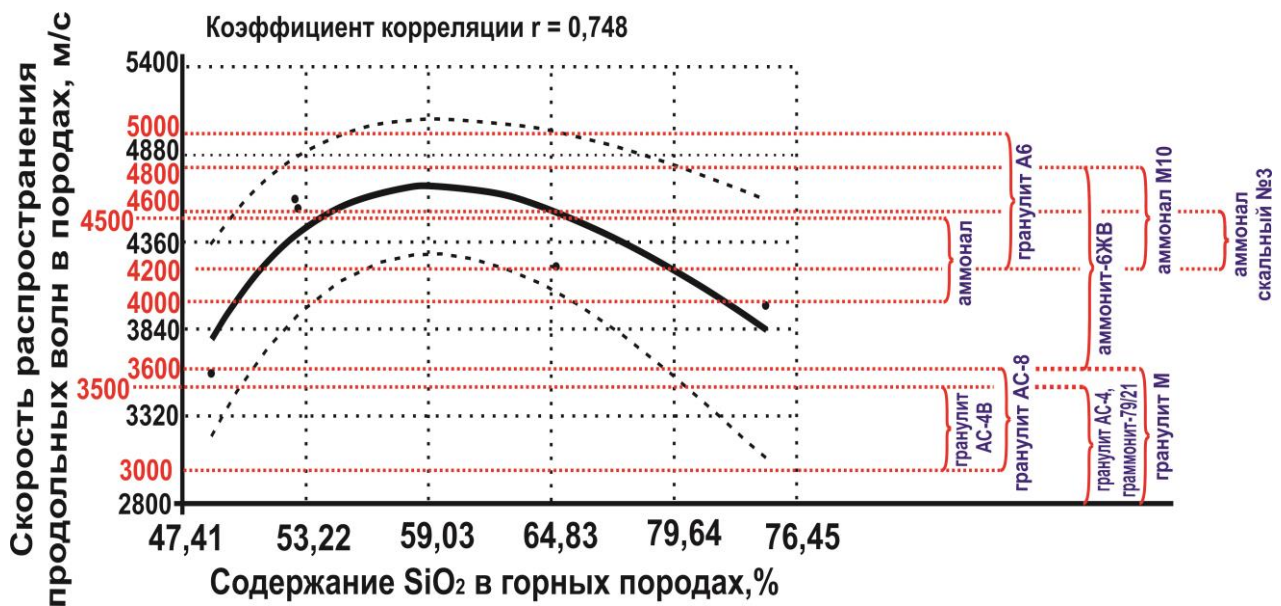


Рисунок 4 – Определение типа взрывчатого вещества для разных типов пород

Для этих целей проведены детальные исследования физических и механических свойств руд и вмещающих их пород по ГОСТ 21153.0-75 (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-механические свойства горных пород

Значение предела прочности при одноосном сжатии, МПа	Значение предела прочности при одноосном растяжении, МПа	Коэффициент Пуассона, ед.	Средняя плотность образца, г/см ³	Истинная плотность образца, г/см ³	Водопоглощение, %	Скорость распространения продольных волн, м/с	Скорость распространения поперечных волн, м/с	Содержание кремнезема, %
Фельзит								
174,8	16	0,18	2,33	2,6	3,4	4225	2590	79,35
Трахидатит								
186,9	17,8	0,24	2,47	2,68	1,56	4495	2766	75,13
Андезит								
197,2	15	0,26	2,68	2,79	0,95	4926	2699	52,85
Базальт								
154	12,9	0,25	2,65	2,77	1,15	5065	2880	52,72
Конгломерат								
72	6,9	0,28	2,44	2,69	3,78	3432	2240	48,73

Установлено, что общим показателем, характеризующим породы, вмещающие урановое оруденение месторождений Стрельцовского рудного поля, является их силикатная составляющая, представленная содержанием двуокиси кремния – SiO₂. Зависимость физико-механических свойств горных пород от содержания в них двуокиси кремния описывается формулами:

- предел прочности при одноосном сжатии

$$\sigma_{\text{сж}} = -2315,12 + \frac{310030,08}{C_{\text{SiO}_2}} - \frac{9366516,6}{C_{\text{SiO}_2}^2}, \text{ МПа}; \quad (1)$$

- предел прочности при одноосном растяжении

$$\sigma_{\text{р}} = -103,49 + \frac{15510,28}{C_{\text{SiO}_2}} - \frac{492631,79}{C_{\text{SiO}_2}^2}, \text{ МПа}; \quad (2)$$

- коэффициент Пуассона

$$\mu^2 = 0,05109 + 0,0017 C_{\text{SiO}_2} - 0,00003 C_{\text{SiO}_2}^2, \text{ ед.}; \quad (3)$$

- истинная плотность пород

$$\rho_{\text{ист.}} = -0,02648 + \frac{312,16188}{C_{\text{SiO}_2}} - \frac{8711,58550}{C_{\text{SiO}_2}^2}, \text{ кг/м}^3; \quad (4)$$

- средняя плотность пород

$$\rho_{\text{ср.}} = -3,2753 + \frac{671,8841}{C_{\text{SiO}_2}} - \frac{19046,8994}{C_{\text{SiO}_2}^2}, \text{ кг/м}^3; \quad (5)$$

- скорость распространения продольных волн

$$v_{\text{прод.}} = -23020,88 + \frac{3368627,17}{C_{\text{SiO}_2}} - \frac{100574342,09}{C_{\text{SiO}_2}^2}, \text{ м/с}. \quad (6)$$

Проведены расчеты параметров БВР для получения оптимального размера куска для БПВ по методике Тюпина – Овсейчука [патент (52) СПК Е21В 43/28 (2018.08)], в результате чего установлена зависимость величины зоны регулируемого дробления и расстояния между скважинами (концами скважин) (рисунки 5, 6).

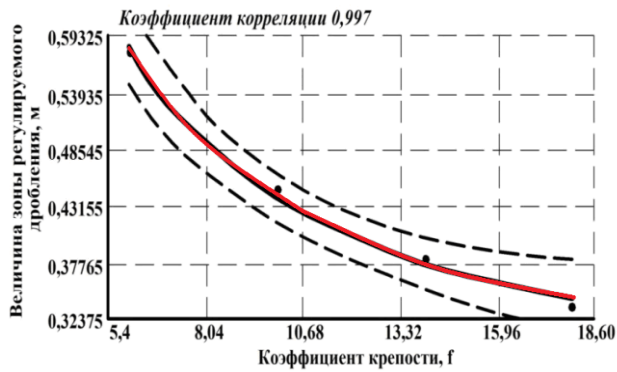


Рисунок 5 – Зависимость величины зоны регулируемого дробления горного массива R_p от коэффициента крепости пород f для скважин диаметром 0,110 м

Зависимости описываются формулами:

- величина зоны регулируемого дробления горного массива R_p от коэффициента крепости пород f для скважин диаметром 0,110 м

$$R_p = 0,22271 + \frac{2,17491}{f}; \quad (7)$$

- расстояние между концами скважин в группе, гарантирующее заданную степень дробления (a_{\max}) от коэффициента крепости пород f для скважин диаметром 0,110 м

$$a_{\max} = 0,95201 + \frac{7,84952}{f}. \quad (8)$$

Кроме этого, выявлены зависимости удельного расхода ВВ и количества скважин от коэффициента крепости руд и мощности рудного тела (рисунки 7, 8).

Полученные зависимости параметров БВР от физико-механических свойств пород и руд значительно облегчают задачу прогнозирования этих параметров при рудоподготовке к БПВ.

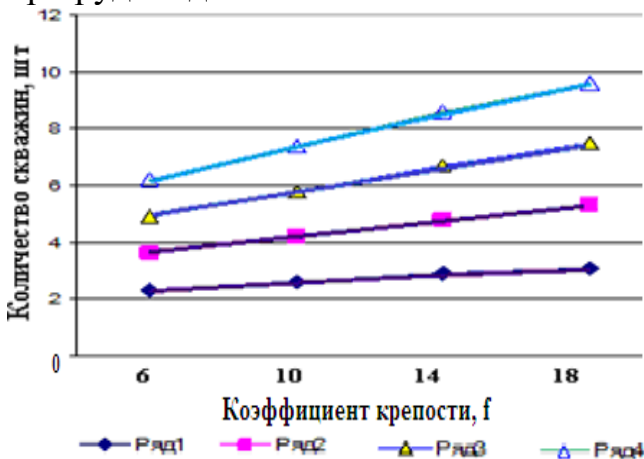


Рисунок 7 – Зависимость количества скважин, необходимых для получения кондиционного куска, от мощности рудного тела и коэффициента крепости руд: ряд 1 – $m=5$ м, 2 ряд – $m=10$ м, 3 ряд – $m=15$ м, 4 ряд – $m=20$ м

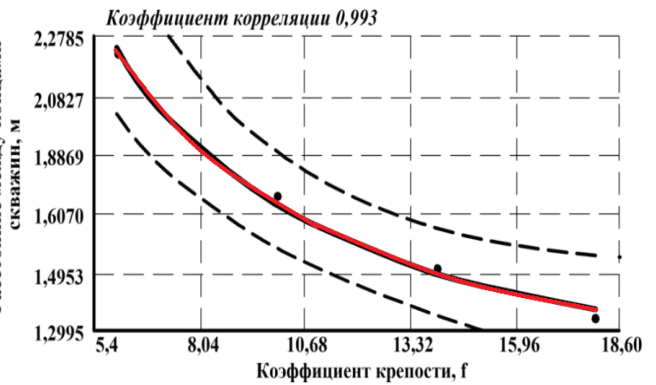


Рисунок 6 – Зависимость расстояния между скважинами (концами скважин) в группе, обеспечивающего заданную степень дробления (a_{\max}) от коэффициента крепости пород f

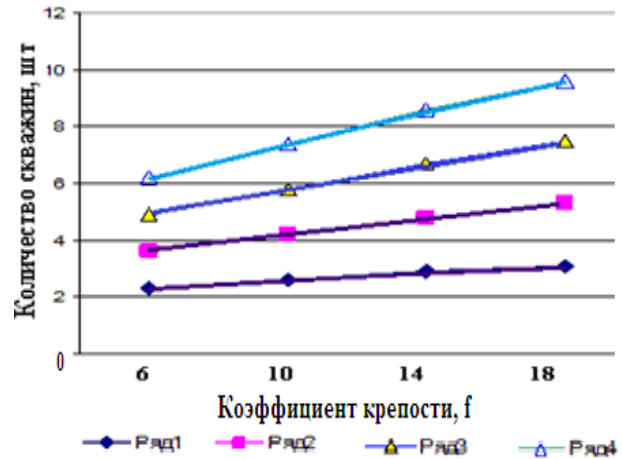


Рисунок 8 – Зависимость удельного расхода ВВ (q) при рудоподготовке к ПВ от мощности рудного тела и коэффициента крепости руд: ряд 1 – $m=5$ м, 2 ряд – $m=10$ м, 3 ряд – $m=15$ м, 4 ряд – $m=20$ м

Оптимальный размер куска выщелачиваемой руды (d_c) определяется на основании опытных работ по выщелачиванию в зависимости от содержания

урана, гранулометрического и вещественного состава руд. Критерием является максимальный коэффициент извлечения урана в раствор. Зависимость извлечения урана при выщелачивании от петрографического состава руд, выраженного через содержание кремнезема, представлена формулой

$$\xi_{\text{кв.}} = \frac{C_{\text{SiO}_2}}{0,402 + 0,00145 C_{\text{SiO}_2} + 0,00007 C_{\text{SiO}_2}^2}, \text{ ед.} \quad (9)$$

Последовательность расчета параметров БВР, обеспечивающих необходимую степень дробления, состоит из следующих этапов:

1. Расчет зоны регулируемого дробления посредством использования эмпирической формулы (7).

2. Число скважин в группе, гарантирующее заданную степень дробления массива, определяется из зависимостей, представленных на рисунке 7.

3. Величина ЛНС (линия наименьшего сопротивления) определяется по зависимостям, представленным на рисунке 5.

4. Расстояние между группами (веерами) скважин, м

$$a_n = m_0 w, \quad (10)$$

где $m_0 = 0,8 \dots 1,2$ – относительное расстояние между комплектами скважин.

Интервал замедления (i , м/с) рассчитывают по выражению

$$i = \frac{(1,02 - 1,17) \cdot 10^7 \sigma_{\text{сж}} W}{\gamma c_p}, \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности руды при сжатии, МПа;

c_p – скорость распространения продольных волн в массиве, м/с;

γ – удельный вес руды, кН/м³.

5. Величины физико-механических показателей определяются по эмпирическим формулам (1)...(6).

6. Удельный расход ВВ (q) при рудоподготовке определяется по рисунку 8.

Обобщая изложенное, можно сделать вывод, что физико-механические свойства горных пород и руд предопределяются их силикатной составляющей, представленной содержанием двуокиси кремния – SiO_2 . Зависимости основных физико-механических свойств горных пород и руд от содержания SiO_2 могут быть использованы для расчета параметров БВР в конкретных горно-геологических условиях. Это позволит значительно повысить эффективность буровзрывной подготовки к подземному блочному выщелачиванию.

Второе защищаемое научное положение. Предотвращение переотложения урана при блочном подземном выщелачивании достигается размещением рядовой по содержанию урана (более 0,050 %) руды в нижних слоях «магазина», а бедной – в верхних. Перевод в подвижное состояние переотложенного урана в замагазинированной руде осуществляется подачей рабочего раствора с заданной концентрацией серной кислоты через пробуренные горизонтальные скважины, обсаженные перфорированными полиэтиленовыми трубами.

В процессе моделирования подземного выщелачивания установлено, что при отбойке руды в камере образуются три зоны гранулометрических составов: зона переизмельчения, зона оптимума и зона выхода негабарита (рисунок 9).

Растекание растворов по этим зонам будет тем значительнее, чем выше высота камеры. В зоне с более крупным дроблением ожидается почти отвесное распределение фронта растекания растворов. Соответственно, чем мельче фракция, тем ближе фронт к горизонтали.

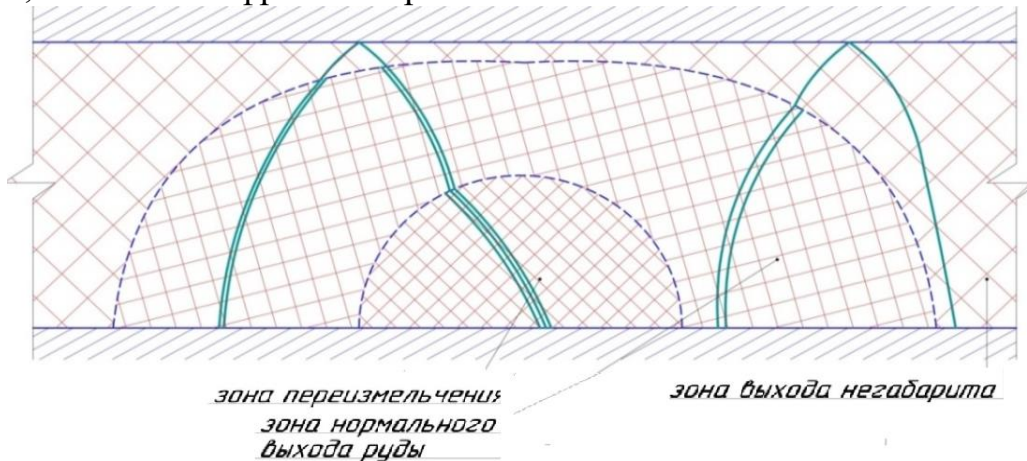


Рисунок 9 – Образование зон классов крупности при магазинировании

Распределение классов крупности возможно прогнозировать на стадии буровзрывных работ, если при определении линии наименьшего сопротивления (W) и расстояния между концами скважин (a) во внимание принять диаметр зоны регулируемого дробления (R_p)

$$\begin{cases} a = 2R_p \cdot K_{II} \\ W = R_p \sqrt[3]{2,5K_{\perp}^2 n''} \end{cases} \quad (12)$$

где K_{II} – коэффициент, учитывающий взаимодействие зарядов по линии скважин;
 n'' – предельное число зарядов, при котором наблюдается их взаимодействие и усиление действия взрыва;

K_{\perp}^2 – коэффициент усиления действия взрыва (за счет взаимодействия зарядов в группе).

Обработка экспериментальных результатов показала, что процесс выщелачивания металла из рудных кусков описывается уравнением диффузии вещества из пластины при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} C = C_0 \text{ при } 0 < x < h \text{ и } t = 0; \\ C = 0 \text{ при } x = h \text{ или } x = 0 \text{ и } t > 0. \end{cases} \quad (13)$$

При этом величина концентрации металла в процессе выщелачивания на глубине проникновения x определяется из соотношения

$$C_{(x,t)} = \frac{4C_0}{\pi \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{2j+1} \sin \frac{2j+1}{h} e^{-(\frac{2j+1}{h})^2 K_{\Phi}}, \frac{\Gamma}{\text{см}^2}, \quad (14)$$

где C_0 – исходное содержание металла в руде, $\Gamma/\text{см}^2$;

t – время, сут;

x – глубина проникновения растворителя, см;

h – средний размер куска, см;

j – поток диффундирующего вещества через 1 см^2 поверхности, г/см².

Средняя концентрация оставшегося полезного компонента $C_{\text{ср}}$ определяется из выражения:

$$\frac{C_{\text{ср.}}}{C_0} = \frac{8}{\pi^2 e^{-\frac{\pi^2 K_{\text{эф.}} t'}{h^2}}} \quad (15)$$

где $K_{\text{эф.}}$ – коэффициент диффузии (эффективный), см²/сут.

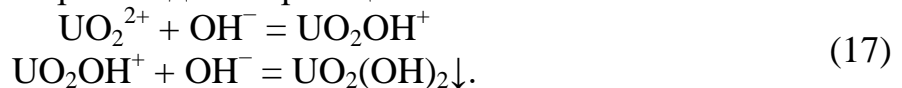
Преобразуя формулу (23), можно получать $K_{\text{эф.}}$ для горнорудных материалов различных месторождений

$$K_{\text{эф.}} = \frac{h^2 \ln(8C_0)}{-22,56 t \ln C_{\text{ср.}}} \quad (16)$$

Предлагаемая методика расчетного определения эффективного коэффициента диффузии позволит прогнозировать геотехнологические свойства руды при предварительной оценке новых рудных залежей на предмет эффективности использования подземного или кучного выщелачивания.

Одной из причин невысокой эффективности БПВ являются процессы перераспределения выщелоченного урана при движении фронта продуктивных растворов сверху вниз в камере за счет снижения кислотности растворов. При этом потери составляют до 18...20 %.

Потери урана происходят за счет образования нерастворимого гидроксида уранила, выпадающего в осадок. Прогресс перехода урана в продуктивный раствор при выщелачивании скальных руд показан на рисунке 10, при этом образование гидроксида урана происходит по реакциям:



На рисунке 10 показана зависимость концентрации ионов урана от кислотности среды.

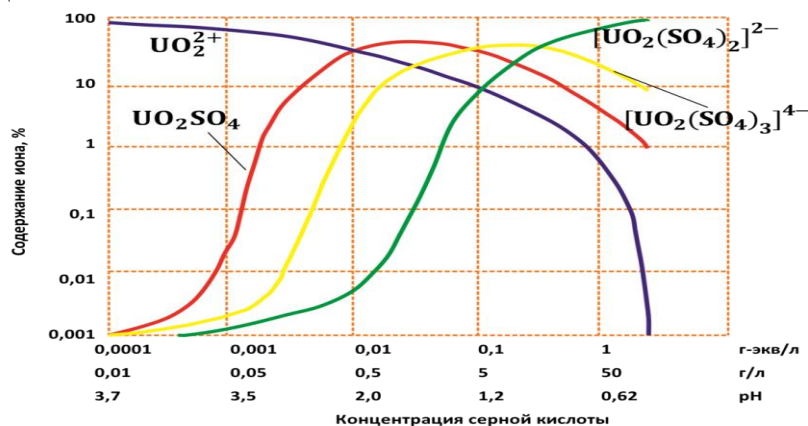


Рисунок 10 – Зависимости концентрации образовавшихся ионов урана от кислотности среды

Гидроксид уранила, образующийся при реакциях выщелачивания, накапливается в нижней части камеры. Установлено, что количество отложенного уранила зависит от кислотности среды и высоты камеры (рис. 11). При повышении кислотности раствора происходит растворение выпавшего в осадок гидроксида уранила.

С целью предотвращения выпадения урана в осадок в виде гидроксида уранила предложено техническое решение, заключающееся в заложении внутри камеры-магазина дополнительного горизонта орошения. Для этой цели внутрь «магазина» пробуривается буровым станком БП-100 горизонтальная скважина и обсаживается перфорированной трубой с помощью системы одновременной обсадки РД-133. Через пробуренные скважины в камеру подается рабочий раствор с повышенным содержанием серной кислоты. Концентрация серной кислоты, необходимой для перевода урана в подвижное состояние, определяется по результатам определения рН среды.

Повышенное содержание урана в нижней части камеры (относительно среднего) обусловлено естественным гравитационным переносом растворенных урановых радикалов по мере фильтрации сверху вниз, где с течением времени возникнет зона повышенной продуктивности. Кроме того, основным фактором, обосновывающим данное решение, является то, что пониженная кислотность нижних слоев приведет к образованию большого количества оксид-иона урана (UO_2^{2-}), преобразующегося в гидроксид уранила.

График (рисунок 12) иллюстрирует прогнозируемый прирост потерь полезного компонента по мере продвижения продуктивного фронта сверху-вниз и позволяет оценить пространственное положение выпавшего в осадок гидроксида уранила.

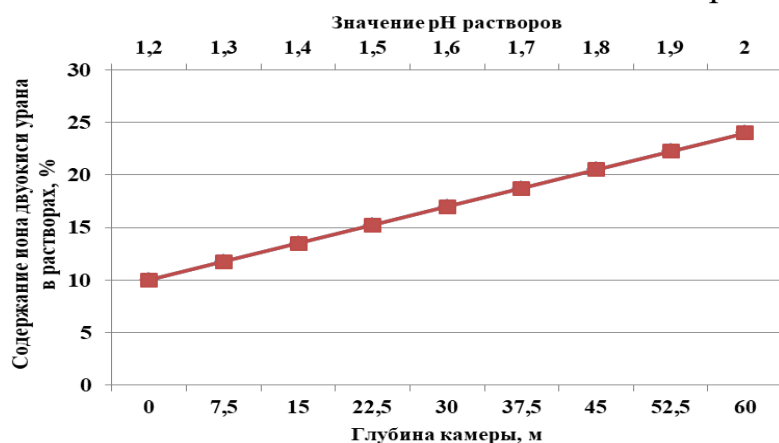


Рисунок 11 – График переотложения $UO_2(OH)_2$ в зависимости от глубины камеры-магазина

Оценивая эффективность применения указанной технологии, сравним ее с вариантом без промежуточного подкисления. Для оценки количества металла, выпадающего в осадок, на примере камеры высотой 60 м и слоя высотой 20 м проведем расчеты (рисунок 13). Графики функции a и b описываются системой уравнений

$$\begin{cases} \langle P_{уд.} \rangle = 10 + 0,23 H, \% \text{ при } 0 \leq H < (H_{кам.} - H_{сл.}); \\ \langle P_{уд.} \rangle = 0,67 + 0,23 H, \% \text{ при } (H_{кам.} - H_{сл.}) \leq H < H_{кам.}, \end{cases} \quad (18)$$

где $H_{сл.}$ – высота слоя дополнительного орошения, м.

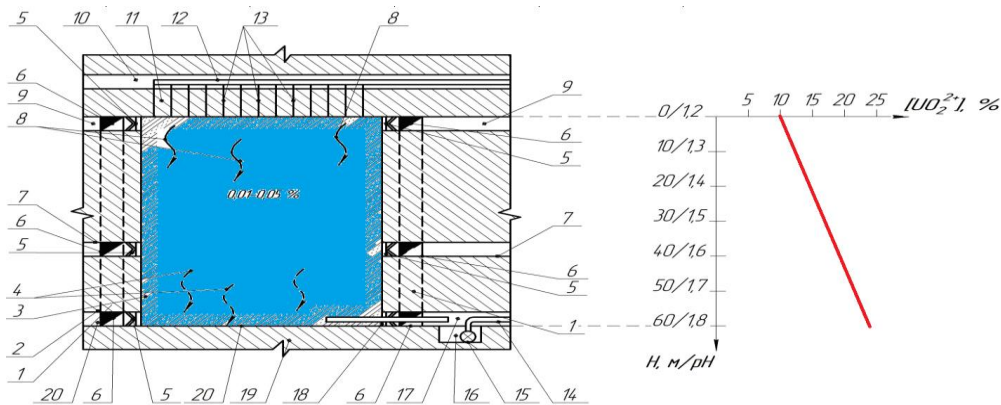


Рисунок 12 – Вертикальный разрез эксплуатационного блока БПВ с графиком образования оксид-ионов урана в зависимости от высоты камеры:

1 – блоковый восстающий; 2 – междукамерный целик; 3 – массив замагазинированной горнорудной массы; 4 – линии тока ПР; 5 – герметичная перемычка; 6 – сбойка с восстающим; 7 – подэтажный горизонт; 8 – линии тока ВР; 9 – буровой горизонт; 10 – оросительный горизонт; 11 – потолочина; 12 – оросительный трубопровод; 13 – оросительные скважины; 14 – магистральный трубопровод; 15 – насосный агрегат; 16 – растворосборник; 17 – дренажный штрек; 18 – дренажная перемычка; 19 – днище камеры; 20 – камера БПВ

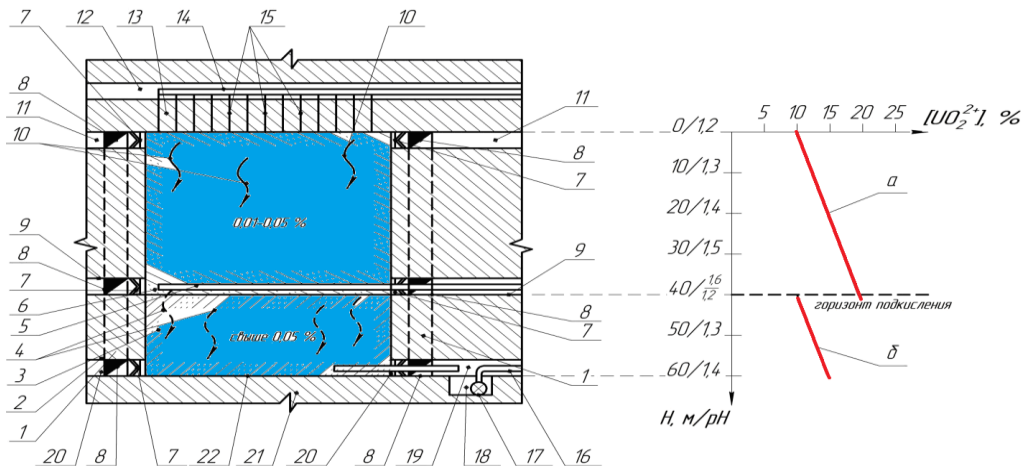


Рисунок 13 – Вертикальный разрез эксплуатационного блока БПВ с графиком образования оксид-ионов урана в зависимости от высоты камеры и подкисляемого слоя:

1 – блоковый восстающий; 2 – междукамерный целик; 3 – массив замагазинированной горнорудной массы с пониженным содержанием урана; 4 – линии тока ПР; 5 – перфорированный трубопровод подкисления; 6 – массив замагазинированной горнорудной массы с повышенным содержанием урана; 7 – герметичная перемычка; 8 – сбойка с восстающим; 9 – подэтажный горизонт; 10 – линии тока раствора; 11 – буровой горизонт; 12 – оросительный горизонт; 13 – потолочина; 14 – оросительный трубопровод; 15 – оросительные скважины; 16 – магистральный трубопровод; 17 – насосный агрегат; 18 – растворосборник; 19 – дренажный штрек; 20 – дренажная перемычка; 21 – днище камеры; 22 – камера БПВ

Для получения численного значения величины потерь при применении технологии дополнительного подкисления при высоте слоя 40 м для камеры высотой 60 м необходимо получить сумму определенных интегралов от данной системы уравнений, которая составит

$$P_{уд.} = \int_0^{40} (10 + 0,23 H) dH + \int_{40}^{60} (0,67 + 0,23 H) dH = 827,4 \% \cdot м. \quad (19)$$

Таким образом, применение дополнительного горизонта подкисления дает возможность снизить потери полезного компонента на 18,4 % (таблица 2).

Таблица 2 – Полученные результаты потерь урана по камере № 1/3 блоку 4Д-701

Без горизонта орошения		
Расчетные показатели	При извлечении 75 %	При извлечении 33,5 %
Добыто урана, кг	23550	15643
Потери в виде $UO_2(OH)_2 \downarrow$, кг	3980	2643
С применением горизонта орошения		
Расчетные показатели	При извлечении 75 %	При извлечении 33,5 %
Добыто урана, кг	24282	16129
Потери в виде $UO_2(OH)_2 \downarrow$, кг	3248	2157
Прирост извлечения, кг	732	486

Технико-экономическое сравнение вариантов показывает, что наименьшие потери урана в относительном выражении при условиях высоты камеры 60 м составляют 30 м. Значения потерь для различных высот подкисляемого слоя приведены на гистограмме (рисунок 14).

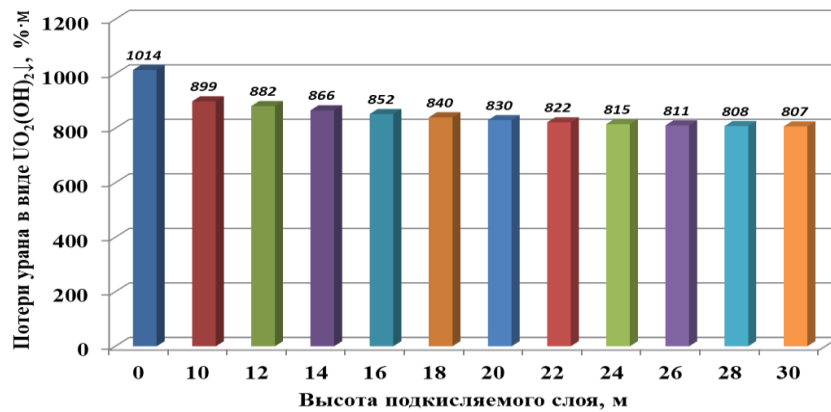


Рисунок 14 – Распределение потерь урана в виде $UO_2(OH)_2$ в зависимости от высоты подкисляемого слоя

График функции, описывающий зависимость выпадения урана в осадок (удельные потери) от высоты камеры-магазина для стандартных условий, выражается уравнением:

$$\langle P_{уд.} \rangle = 10 + 0,23 H, \% \quad (20)$$

где H – расстояние, пройденное кислотным (продуктивным) фронтом от горизонта орошения, м.

Общие удельные потери в камере количественно выражаются интегралом от данной линейной функции:

$$P_{уд.} = \int (10 + 0,23 H) dH, \% \cdot м. \quad (21)$$

Для стандартных условий данную зависимость выражает определенный интеграл

$$P_{уд.} = \int_0^{60} (10 + 0,23 H) dH = 1014 \% \cdot м.$$

В абсолютных показателях, учитывающих геометрические параметры камеры (ширину и мощность), коэффициент разрыхления горнорудной массы,

истинную плотность горных пород, содержание урана в руде (по блоку) и заданный коэффициент извлечения, величина потерь определяется по формуле

$$П = П_{уд.} \frac{ВL}{100 k_p} q_{ист.} \frac{c_U}{100} k_{извл.}, \text{ кг}, \quad (22)$$

где $В$ – мощность камеры, м;

L – ширина пролета камеры, м;

k_p – коэффициент разрыхления горнорудной массы, ед.;

$q_{ист.}$ – истинная плотность горных пород, кг/м³;

c_U – среднее содержание урана в руде (по блоку), кг/кг;

$k_{извл.}$ – коэффициент извлечения полезного компонента, ед.

Коэффициент извлечения можно рассчитать из выражения

$$k_{извл.} = \frac{\bar{Y}_{ПР} \sum Q_{ПР}}{З_{бл.}}, \text{ ед.}, \quad (23)$$

где $\bar{Y}_{ПР}$ – среднее содержание урана в ПР, кг/м³;

$\sum Q_{ПР}$ – общий объем продуктивных растворов, полученный за период эксплуатации, м³;

$З_{бл.}$ – запасы урана в блоке, кг.

С учетом (23) в упрощённом виде имеем

$$П = П_{уд.} \frac{З_{бл.}}{100 Н} k_{извл.}, \text{ кг} \quad (24)$$

или

$$П = П_{уд.} \frac{\bar{Y}_{ПР} \sum Q_{ПР}}{100 Н}, \text{ кг}. \quad (25)$$

Схема рудоподготовки камеры к выщелачиванию приведена на рисунке 15, где богатая руда размещается в нижней части магазина, бедная – в верхней.

Распределение горнорудной массы по сортам в процессе подземной рудоподготовки приведено на рисунке 16.

Опытные работы, проведенные на опытно-промышленном участке ЦНИЛ ПАО «ППГХО», показали повышение извлечения урана на 15...20 % за счет предотвращения его переотложения.

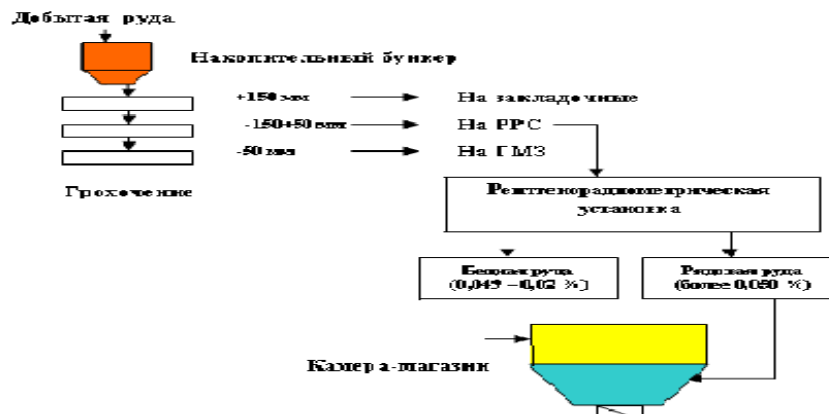


Рисунок 15 – Схема рудоподготовки камеры к выщелачиванию

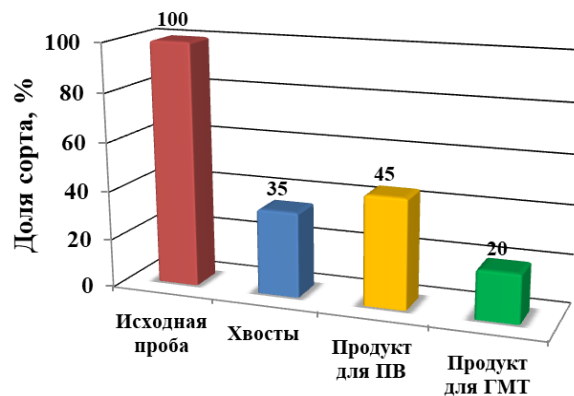


Рисунок 16 – Распределение горнорудной массы по сортам в процессе подземной рудоподготовки

Третье защищаемое положение. Впервые разработана технология устранения кольматации при блочном подземном выщелачивании пневмоимпульсным воздействием на массив от специализированного устройства, генерирующего мощный воздушный или водо-воздушный импульс к перфорированным трубопроводам. Из сопл под высоким давлением подается сжатый воздух, разрушающий возникшие механические связи между кусками замагазинированной руды.

Одной из причин снижения эффективности подземного блочного выщелачивания является кольматация замагазинированной руды в процессе движения растворов и протекания химических реакций. При этом кольматация может быть механической, химической и газовой. Все эти виды кольматации могут являться причиной снижения эффективности выщелачивания.

Для борьбы с кольматацией отдельных участков камеры-магазина предлагается использование гидропневмоликвидатора завесаний ГПЛЗ-2 (разработанного ИПКОН АН СССР и Читинским филиалом ВНИПИГорцветмет), который применяют для исключения завесаний при выпуске руды из блока. В нашем случае принцип его работы будет заключаться в подаче под высоким давлением водо-воздушной смеси через полимерные высокопрочные трубы в места, наиболее подверженные кольматации (рисунок 17). Для этого из подэтажных выработок и восстающих следует произвести бурение скважин в разрыхленную руду с их одновременной обсадкой трубами. Высокую эффективность подобного способа бурения показала система одновременной обсадки скважин ООС-145. Помимо сотрясательного воздействия на массив, комплекс ГПЛЗ будет дополнительно стимулировать накислоороживание массива, что благоприятно сказывается на процессе выщелачивания. Таким образом, решается сразу две задачи: борьба с кольматацией и дополнительная аэрация камеры.

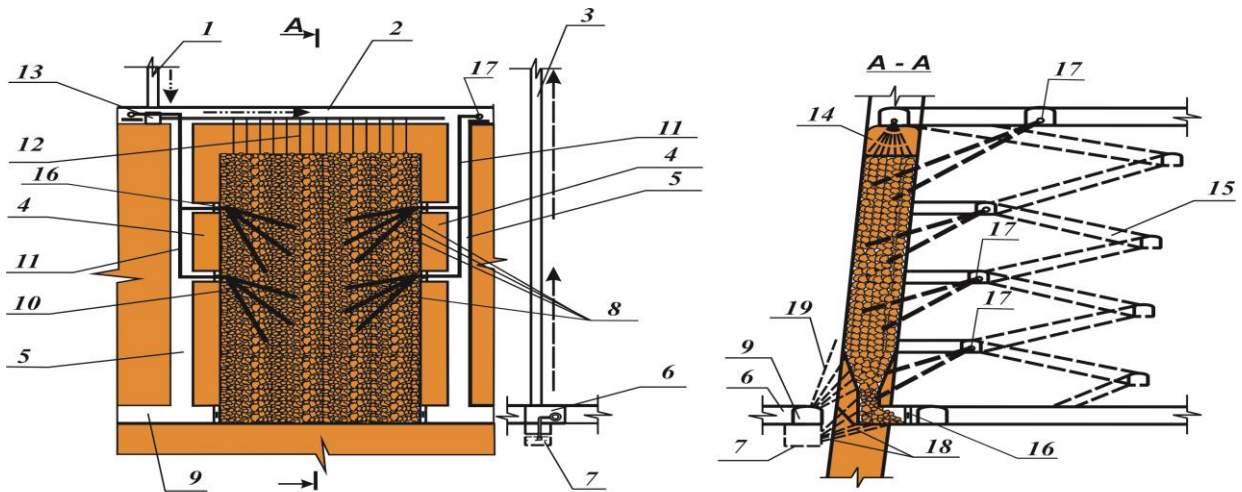


Рисунок 17 – Схема работы комплекса ГПЛЗ-2:

1 – закачная скважина; 2 – оросительный шптрек; 3 – откачная скважина; 4 – МКЦ; 5 – материально-ходовой восстающий; 6 – насосная; 7 – растворосборник; 8 – воздухоподающие трубы; 9 – дренажный шптрек; 10 – камера-магазин; 11 – воздухоподающая труба; 12 – скважины орошения; 13 – гаситель напора; 14 – потолочина; 15 – участковый съезд; 16 – изолирующая перемычка; 17 – камера ГПЛЗ; 18 – дренажные скважины; 19 – контрольные скважины

Для предотвращения заиливания расположенного в горизонтальной плоскости перфорированного трубопровода в зоне переизмельчения рудной массы, образуемой при отбойке, предлагается технология свабирования таких участков с последующей эрлифтной прокачкой (рисунок 18).

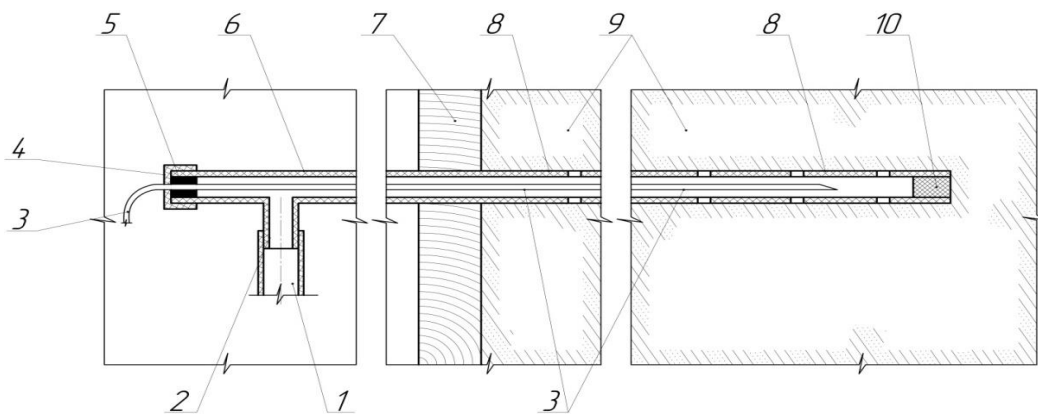


Рисунок 18 – Конструкция системы эрлифтной прокачки трубопровода промежуточного подкисления камеры БПВ:

1 – шланг отвода рабочих растворов; 2 – отводной патрубков; 3 – шланг подачи сжатого воздуха; 4 – крышка; 5 – уплотнитель; 6 – оголовок; 7 – герметичная перемычка; 8 – перфорированный трубопровод; 9 – горнорудная масса; 10 – заглушка перфорированного трубопровода

Для успешного решения проблемы повышения эффективности подземного выщелачивания необходим достоверный анализ геолого-технологической ситуации, позволяющий прогнозировать показатели извлечения сырья в эксплуатационных блоках.

При аппроксимации экспериментальных данных, приведенных в таблицах 3, 4, получены прямые зависимости в виде систем уравнений для каждого эксплуатационного блока.

Таблица 3 – Приведение зависимости содержания U от концентрации H_2SO_4 для руд, представленных трахидацитами и андезито-базальтами в условиях камеры № 2 блока 4Д-701

Коэффициент	Уравнение функции		
	$y = A + B \ln x$	$y = A + B \lg x + C(\lg x)^2$	$y = \frac{x}{A + Bx}$
A	30,19579	34,2736	0,02794
B	23,11954	67,87835	0,00936
C	0	-22,94725	0

На рисунке 19 приведена зависимость содержания урана от кислотности выщелачивающих растворов в камере 2 блока 4Д-701, на рисунке 20 – камеры № 1/3 блока 4Д-701.

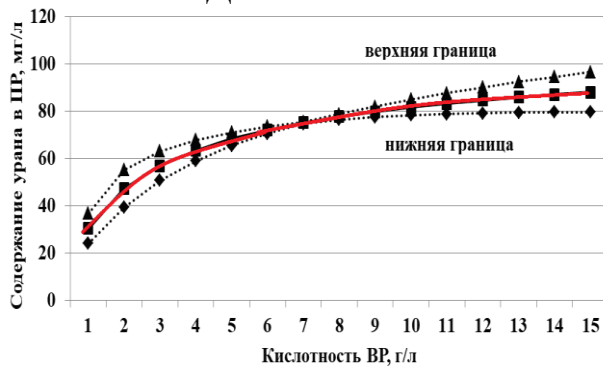


Рисунок 19 – Зависимость содержания U в ПР от кислотности ВР с доверительными интервалами для трахидацитов

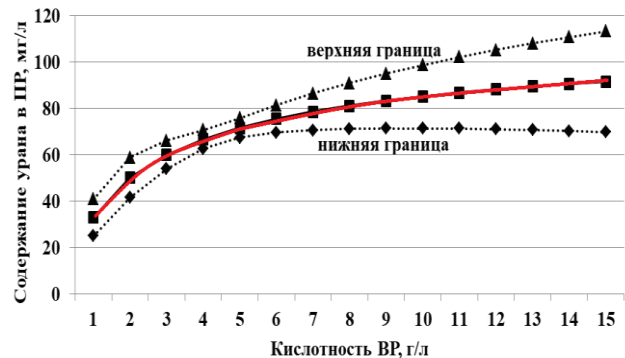


Рисунок 20 – Зависимость содержания U в ПР от кислотности ВР с доверительными интервалами для трахидацитов и базальтов

Постоянные коэффициенты в логарифмическом варианте выражения статистических показателей абсолютно идентичны (таблица 4), а в остальных функциях различаются несущественно.

Таблица 4 – Приведение зависимости содержания U от концентрации H_2SO_4 для руд, представленных трахидацитами и андезито-базальтами в условиях камеры № 1/3 блока 4Д-701

Коэффициент	Уравнение функции		
	$y = A + B \ln x$	$y = A + B \lg x + C(\lg x)^2$	$y = \frac{x}{A + Bx}$
A	35,15256	34,2736	0,02508
B	23,85903	67,87835	0,00913
C	–	-22,94725	–

Как видно из рисунков 19 и 20, зависимости отличаются несущественно.

В результате исследований, проведенных на базе ЦНИЛ ПАО «ППГХО», установлено, что эффективность выщелачивания различных типов пород отличается и зависит от исходного содержания урана в руде (рисунок 21). Наиболее эффективно выщелачиваются фельзиты и конгломераты, степень их извлечения в 1,1...1,2 раза превосходит аналогичные технологические показатели для трахидацитов, андезито-базальтов при различных исходных условиях.

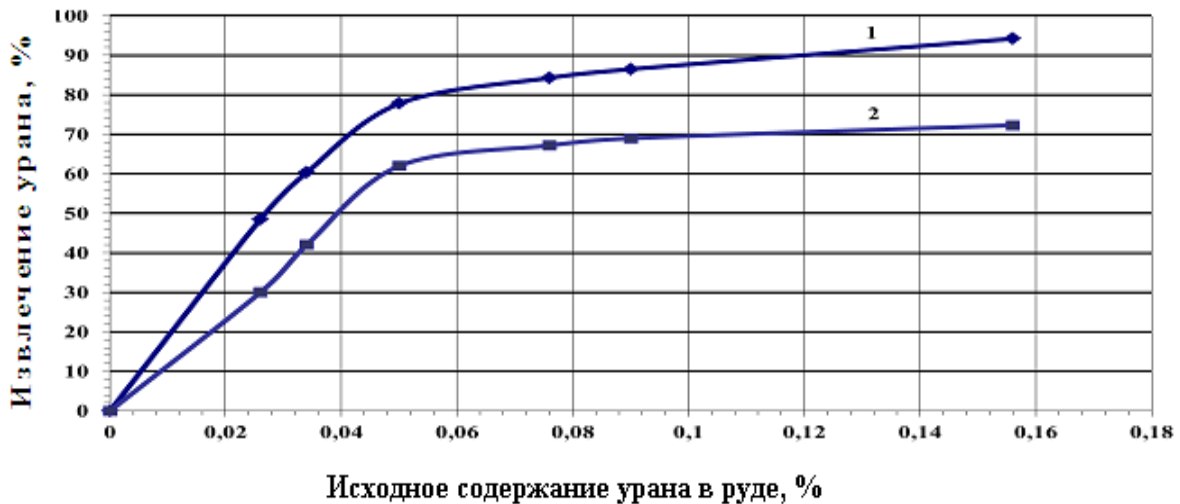


Рисунок 21 – Зависимость степени извлечения урана от типов рудовмещающих пород и исходного содержания урана в руде (для условий ПАО «ППГХО»: 1 – фельзиты и конгломераты; 2 – трахидациты, андезито-базальты)

Поэтому в методику расчета показателей БПВ в заданный период, основанную на статистике, накопленной для трахидацитов и базальтов блока 4Д-701, необходимо внести поправочные коэффициенты, учитывающие тип рудовмещающих пород и среднее исходное содержание урана в руде $C_{исх.}^U$.

$$\bar{Y}_i^{фельз.} = k^i \cdot \bar{Y}_{i-1}^{расч.} \frac{I_1(C_{исх.}^U)}{I_2(C_{исх.}^U)}, \text{ мг/л}, \quad (26)$$

где k^i – коэффициент среднемесячного понижения содержания полезного компонента в ПР для скальных урановых руд, ед.;

i – порядковый номер месяца, следующего за месяцем, взятым за начало отсчета, ед.;

$\bar{Y}_{i-1}^{расч.}$ – расчетное содержание урана в ПР для трахидацитов (андезито-базальтов) в месяце, предыдущем перед отчетным, мг/л;

$I_1(C_{исх.}^U)$ – степень извлечения урана из образца руды для фельзитов (конгломератов) при заданном среднем содержании урана в руде, ед.;

$I_2(C_{исх.}^U)$ – степень извлечения урана из образца руды для трахидацитов (андезито-базальтов) при заданном среднем содержании урана в руде, ед.

Таким образом, можно сделать вывод, что повышение эффективности БПВ зависит от профилактики кольматаций пневмоимпульсным воздействием на массив водо-воздушной струей от специализированного устройства через систему размещенных в камере перфорированных трубопроводов с конструкцией, препятствующей возникновению газовых кольматаций, и мер профилактики заиливания трубопроводов.

Установление взаимосвязи между показателем извлечения урана в раствор и концентрацией выщелачивающего реагента для различных типов руд и горных пород, основанное на накопленных предприятием статистических данных, позволяет осуществлять планирование горных работ при внедрении технологии БПВ.

По результатам выполненных исследований произведен расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения предложенных технических реше-

ний. Критерием расчета является прибыль с 1 т погашенных балансовых запасов. Расчетный годовой экономический эффект составляет 237 млн руб.

Широкое внедрение подземного блочного выщелачивания как одной из основных технологий обработки бедных и рядовых урановых руд позволит значительно продлить срок существования предприятия и повысить полноту извлечения полезного ископаемого из недр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований, опытно-промышленных испытаний изложены новые научно обоснованные технологические решения по обработке бедного уранового сырья с применением физико-химического метода, внедрение которых позволяет отрабатывать нерентабельные для традиционной технологии запасы с высокой эффективностью.

Основные выводы работы отражают научную и практическую значимость проведенных исследований.

В результате проделанной работы автором диссертации получены следующие выводы и результаты:

1. Разработана и представлена технология подготовки урановых руд к БПВ, включающая взрывную подготовку на основе оптимизации параметров БВР, обеспечивающих оптимальную кусковатость горнорудной массы.

2. Получены зависимости физико-механических свойств горных пород и руд от их вещественного состава, выраженного содержанием свободного кремнезема (SiO_2).

3. Выявленные зависимости параметров буровзрывных работ от физико-механических свойств руд и вмещающих горных пород через коэффициент крепости и мощность рудных тел позволяют значительно упростить расчет параметров БВР для получения необходимой крупности куска горнорудной массы.

4. Разработана технология формирования рудного магазина и подачи рабочего раствора с заданной концентрацией серной кислоты, позволяющая повысить коэффициент извлечения урана в продуктивный раствор.

5. Разработана технология устранения кольматации при БПВ пневмоимпульсным воздействием на массив от специализированного устройства, генерирующего мощный воздушный или водо-воздушный импульс к перфорированным трубопроводам.

6. Предложена методика анализа геолого-технологической ситуации, позволяющая прогнозировать показатели извлечения урана в эксплуатационных блоках.

Результаты исследований получены при выполнении НИР по теме «Создание комплексной технологии обработки беднобалансовых урановых руд геотехнологическими методами» № 100-10-05/19520 от «15» ноября 2012 г. и ис-

пользованы для разработки ТЭО по модернизации работы ПАО «ППГХО». Ожидаемые результаты внедрения разработок в производство позволят:

- вовлечь в эксплуатацию бедные руды, нерентабельные к отработке традиционной физико-технической технологией, в количестве более 50 тыс. т урана;

- снизить себестоимость готовой продукции на 10 %;

- продлить срок существования предприятия на 15 лет.

Суммарный расчетный экономический эффект составляет 237 млн руб. в год за счет повышения извлечения урана в раствор на 20 % .

Полученные новые знания также используются при чтении учебных дисциплин: «Физико-химическая геотехнология», «Управление качеством руд при добыче полезных ископаемых», «Особенности разработки урановых месторождений», «Проектирование рудников» на горном факультете ЗабГУ.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:
издания, рекомендованные ВАК по научной специальности**

1. Овсейчук В. А. Совершенствование рудоподготовки при блочном подземном выщелачивании скальных урановых руд в условиях Стрельцовского рудного поля / В. А. Овсейчук, В. В. Медведев, **А. М. Зозуля**. – Текст: непосредственный // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2017. – № 12. – С. 32–40.

2. Медведев В. В. Повышение эффективности подготовки блока к подземному выщелачиванию пологих рудных тел / В. В. Медведев, **А. М. Зозуля**, С. Г. Гуров. – Текст: непосредственный // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 49–53.

3. **Зозуля А.М.** Повышение эффективности подземного выщелачивания за счет снижения технологических потерь урана/ А. М. Зозуля, В. А. Овсейчук, – Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-1. – С. 17–25.

4. Овсейчук В. А. Совершенствование процесса блочного подземного выщелачивания в условиях Стрельцовского рудного поля / В. А. Овсейчук, **А. М. Зозуля**. – Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-1. – С. 26–33.

5. **Зозуля А.М.** Установление взаимосвязи между технологическими показателями при подземном выщелачивания урана / А. М. Зозуля, В. А. Овсейчук, – Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-2. – С. 47–57.

6. Верхотуров, А. Г. Особенности скважинного подземного выщелачивания в криолитозоне Хиагдинского рудного поля / А. Г. Верхотуров, А. А. Сабигатулин, **А. М. Зозуля**. – Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-2 – С. 37–47.

Патенты на изобретения

1. Патент RU 2685520 С1, 19.04.2019. Способ ликвидации кольматаций при блочном подземном выщелачивании / **Зозуля А. М.**, Овсейчук В. А., Медведев В. В.; патентообладатель Забайкальский государственный университет, № 2018119063; заявл. 23.05.2018; опубл. 19.04.2019, Бюл. № 11. – 8 с. – Текст: непосредственный.

В других изданиях

1. **Зозуля А.М.** Повышение эффективности рудоподготовки блокак подземному выщелачиванию урановых руд/ А.М. Зозуля, В.В. Медведев. Текст: непосредственный // Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч. – Чита: ЗабГУ, 2016. С. 115–120.

2. **Зозуля, А. М.** Совершенствование технологии рудоподготовки полых рудных тел скальных урановых руд под блочное подземное выщелачивание / А. М. Зозуля. – Текст: непосредственный // Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч. – Чита: ЗабГУ, 2017. – Ч. 2. – С. 126–131.

3. **Зозуля, А. М.** Применение вероятностного подхода в прогнозировании добычи полезных компонентов при скважинном подземном выщелачивании / А. М. Зозуля, В. А. Овсейчук. – Текст: непосредственный // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч. – Чита: ЗабГУ, 2018. – Ч. 2. – С. 126–131.

4. **Зозуля А. М.** Повышение интенсификации извлечения урана при блочном подземном выщелачивании скальных алюмосиликатных урановых руд / А. М. Зозуля, В. А. Овсейчук. – Текст: непосредственный // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием. – Иркутск: ИРНИТУ, 2018. – С. 326–332.

5. **Зозуля, А. М.** Снижение технологических потерь урана при подземном выщелачивании за счет растворения гидроокиси уранила / А. М. Зозуля, В. А. Овсейчук. – Текст: непосредственный // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2019. – № 4. – С. 4–12.

6. **Зозуля А.М.** Совершенствование блочного подземного выщелачивания скальных алюмосиликатных урановых руд/ А. М. Зозуля, В. А. Овсейчук.- Текст: непосредственный // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: материалы XX Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч. – Чита: ЗабГУ, 2020. С. 36–43.

7. **Зозуля, А. М.** Горно-геологические и физико-химические показатели, определяющие успешность применения блочного подземного и кучного выщелачивания / А. М. Зозуля, В. А. Овсейчук. – Текст: непосредственный // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 34–41.