

На правах рукописи



Михайлов Анатолий Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ХИАГДИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ СКВАЖИНЫМ ПОДЗЕМНЫМ
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ**

Специальности:

- 2.8.8. Геотехнология, горные машины
- 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чита 2024

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

Научный руководитель **Овсейчук Василий Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» (г. Чита)

Официальные оппоненты: **Вильмис Александр Леонидович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)» (г. Москва)

Морозов Валерий Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва)

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

Защита диссертации состоится «26» сентября 2024 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.324.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») по адресу: 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова»: <https://magtu.ru>.

Автореферат разослан « » 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук  Корнилов Сергей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Атомная энергетика, несмотря на ряд крупных аварий на атомных электростанциях, продолжает динамично развиваться и имеет хорошие перспективы удовлетворения все возрастающих потребностей человечества в энергии.

Добыча уранового сырья в мире, как источника получения лучистой энергии, осуществляется из рудных и гидрогенных месторождений. На территории Российской Федерации имеются как рудные, так и гидрогенные месторождения. Освоение рудных месторождений требует очень больших капиталовложений, затраты на строительство горных предприятий на базе гидрогенных месторождений значительно меньше, так как не требует вскрытия проходкой дорогостоящих горных выработок. Поэтому развитие добычи урана скважинным подземным выщелачиванием на территории РФ имеет большие перспективы.

Производство уранового концентрата скважинным подземным выщелачиванием в России ведут АО «Далур» (Курганская область) и АО «Хиагда» (Республики Бурятия). Предприятие АО «Хиагда» (промышленная добыча радиоактивного металла) уранового холдинга «Атомредмет-золото» Горнорудный дивизион Госкорпорации «Росатом» построено на базе запасов урана, локализованного в рудных песках месторождений, объединенных в единое Хиагдинское рудное поле.

Основной вскрывающей выработкой при скважинном подземном выщелачивании (СПВ) является технологическая скважина. Проектные решения, заложенные в основу работы предприятия АО «Хиагда, позволяют при отработке запасов извлекать лишь 76 % урана, что в условиях падения цены на уран за последние 10 лет от 100 \$ до 50 \$ за кг, не могут обеспечить рентабельную работу предприятия. Поэтому появилась необходимость совершенствования технологии ведения горных работ, заключающаяся в поисках путей повышения эффективности вскрытия запасов месторождения, ускорения процессов выщелачивания увеличением концентрации ионов урана в продуктивном растворе, повышением эффективности работы технологических скважин.

Степень научной разработанности. Вопросами отработки гидрогенных месторождений урана занимались известные российские ученые, как Аренс В.Ж., Абдульманов И.Г., Адосик Г.И., Кротков В.В., Ласкорин Б.Н., Лобанов Д.П., Лунев Л.И., Мамилов В.А., Машковцев Г.А., Мосинец В.Н., Рогов Е. И., Скороваров Д.И., Солодов И.Н., Толстов Д.Е., Фазлуллин М.И.; казахские ученые – Джакупов Д.А., Садыков Р.Х., Язиков В.Г. и др.

Анализ опыта применения скважинного подземного выщелачивания для отработки гидрогенных урановых месторождений зарубежными и отечественными горными компаниями (предприятия по отработке месторождений Семизбай, Инкай, Мындудук и др. в Казахстане; предприятие Далур по отработке месторождений Долматовское, Хохловское в РФ) показывает, что каждое месторождение имеет свои отличительные горно-геологические и технологические характеристики, поэтому универсального подхода к отработке всех месторождений не существует. Для установления взаимосвязей природных факторов, характеризующих конкретное месторождение, с оптимальными технологическими параметрами, определяющими успешность отработки, необходимо детальное изучение этих характеристик на всех стадиях освоения месторождения.

Таким образом, возникли научно-технические задачи повышения эффективности как отработки гидрогенных месторождений хиагдинского типа, характеризующихся едиными генетическими условиями формирования, едиными качественными показателями и гидрогеологическими характеристиками, так и перевода урана в продуктивный раствор при выщелачивании.

Для того, чтобы решить данные задачи, потребовалось более глубоко изучить петрографический и минеральный состав рудных песков, фильтрационные характеристики

рудовмещающего пласта, химизм взаимодействия выщелачивающего реагента с породообразующими и рудными минералами, влияние различных активаторов на интенсивность процессов выщелачивания, влияние процессов коагуляции на изменение производительности технологических скважин.

Исследования проводились по отраслевой программе Росатома РФ по теме: «Создание эффективной геотехнологии освоения крупного ураново-рудного района в зоне многолетней мерзлоты», 2013-2022 гг.

Цель работы – повышение эффективности скважинного подземного выщелачивания разработкой более совершенных технологических схем вскрытия месторождения, интенсификацией процесса выщелачивания урана применением химических активаторов и увеличением производительности технологических скважин за счет совершенствования процессов ремонтно-восстановительных работ.

Идея работы заключается в эффективном управлении качеством рудоподготовки рудного пласта к скважинному подземному выщелачиванию, которое достигается оптимизацией формы и размера технологической ячейки, а управление качеством процесса выщелачивания – установлением результативного химического активатора, режима подачи его в продуктивный пласт и наиболее эффективного метода и режима восстановления производительности скважин.

В процессе исследований решались **следующие задачи**:

1. Анализ литературных источников отечественного и зарубежного опыта применения скважинного подземного выщелачивания при разработке гидрогенных месторождений урана.

2. Исследовать особенности урановых руд месторождений Хиагдинского рудного поля, которые оказывают влияние на эффективность скважинного подземного выщелачивания.

3. Усовершенствовать технологию вскрытия рудных залежей, используя новые знания о горно-геологических условиях и геотехнологических показателях руд месторождений хиагдинского типа.

4. Выявить закономерности изменения концентрации урана в продуктивном растворе и технологических параметров от продолжительности процесса выщелачивания.

5. Установить влияние применения различных окислителей на эффективность перевода урана в продуктивный раствор при выщелачивании урановых руд хиагдинского типа.

6. Разработать наиболее эффективные научные и инженерные решения и представить регламент восстановления производительности технологических скважин совмещением физических и химических методов воздействия на коагулянты.

7. Оценить предложенные технологические решения, в том числе с учётом экономической эффективности.

8. Сформировать базу данных научно-технической информации, полученной в процессе выполнения экспериментальных работ и опытно-промышленных испытаний для разработки математических моделей и комплекса программного обеспечения для АСУТП в рамках проекта «Умный полигон» для повышения эффективности работы добычного полигона.

Объект исследований – гидрогенные урановые месторождения Хиагдинского рудного поля.

Предмет исследования – геотехнологические процессы цикла добычи урана при скважинном подземном выщелачивании в зоне многолетней мерзлоты; физико-химические процессы концентрации урана из природного минерального сырья и химические методы их интенсификации.

Научная новизна:

1. Разработана методика многовариантного моделирования технологических процессов движения растворов в продуктивном пласте с учётом экономических показателей всего цикла добычи в зоне многолетней мерзлоты, использование которой позволяет

определить оптимальную схему и параметры расположения технологических скважин с охватом площади рудной зоны, превышающей 90 % запасов урана.

2. Установлены зависимости концентрации урана в продуктивном растворе и доли извлечённого урана от времени выщелачивания, позволяющие выбрать наиболее эффективный вариант вскрытия запасов гексагональной системой с оптимальным радиусом ячейки в 30 м, обеспечивающий снижение удельного расхода серной кислоты на 18,75 % (с 32 до 26 кг/т руды) при повышении содержания урана в продуктивном растворе на 24,21 % (с 95 до 118 мг/л).

3. Установлена зависимость изменения концентрации урана в продуктивном растворе от продолжительности процесса выщелачивания при использовании перекиси водорода в качестве эффективного активатора – окислителя, на основе которой достигается эффективное управление качеством процесса извлечения ценного компонента с учётом определения количества урана в заданный период времени.

4. Установлены зависимости технологических параметров от продолжительности выщелачивания при применении химических методов интенсификации с перекисью водорода, позволяющие определить оптимальное время процесса, обеспечивающего максимальную концентрацию ионов урана и трёхвалентного железа в продуктивном растворе при минимальном объёме и расходе выщелачивающего реагента.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что изложены доказательства гипотезы, заключающейся в том, что управлении качеством рудоподготовки рудного пласта, повышение эффективности скважинного подземного выщелачивания достигается оптимизацией формы и размера технологической ячейки вскрытия гидрогенного уранового месторождения и применением эффективных активатора и химических декольматантов; изучены следующие причинно-следственные связи: зависимость концентрации урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания с максимальными показателями при гексагональной форме и различного радиуса ячейки; зависимость извлечения урана от времени выщелачивания с применением перекиси водорода при химическом методе интенсификации процесса, позволяющей повысить концентрацию трёхвалентного железа и обеспечить полноту извлечения ценного компонента; зависимость степени заполнения прифилтровой зоны закачной скважины от усредненного размера песчинок рудного пласта; зависимость содержания породообразующих минералов в продуктивном растворе от суммарной концентрации ионов Mg, Ca, Al, Fe; зависимость концентрации кремниевой кислоты в продуктивном растворе от содержания силикатных минералов в руде; зависимость производительности технологических скважин от срока эксплуатации при использовании таких химических декольматантов, как соляная кислота, и бифторид аммония; зависимость расхода соляной кислоты и бифторида аммония от концентрации ионов Mg, Ca, Al, Fe и Si, соответственно; изложены доказательства создания условий эффективного перевода урана в продуктивный раствор с применением перекиси водорода в качестве активатора процесса при установленных оптимальных технологических параметрах, позволяющих достичь извлечение ценного компонента на уровне не менее 80 %; изложены доказательства совершенствования инструментов контроля качества отработки гидрогенных урановых месторождений скважинным подземным выщелачиванием на основе выявленных зависимостей технологических параметров от горно-геологических условий и гидрогеологических характеристик руд и технологических параметров извлечения урана в продуктивный раствор от вещественного состава руды.

Практическая значимость:

– разработана новая экспериментальная методика исследования по оптимизации параметров систем разработки гидрогенного месторождения Хиагдинского рудного поля, позволяющая выявить качественно новые закономерности изменения содержания урана в продуктивном растворе от продолжительности процесса выщелачивания для варианта вскрытия руд хиагдинского типа системой с гексагональным расположением скважин;

– обоснована и экспериментально апробирована технология вскрытия запасов гидрогенных урановых месторождений хиагдинского типа гексагональной системой с радиусом ячейки 30 м, что обеспечивает минимальную величину общих затрат на строительство и эксплуатацию горного полигона, и извлечение урана в продуктивный раствор не менее 80 %;

– разработан метод прогнозирования производительности откачных и закачных технологических скважин от срока их эксплуатации при скважинном подземном выщелачивании урана, учитывающий динамику закономерных изменений естественной проницаемости пород и фильтрующих элементов водозаборных сооружений, на основе математических моделей, отличающийся тем, что расчёт оптимального расхода химических кольматантов – соляной кислоты и бифторида аммония, основан на концентрации ионов Mg, Ca, Al, Fe и Si в продуктивном растворе, соответственно;

– разработан технологический регламент выщелачивания урановых руд месторождений Хиагдинского рудного поля с использованием в качестве активатора перекиси водорода в количестве 1,6 кг на 1 тонну руды при закислении и на стадии выщелачивания – 0,88 кг/т, что позволяет повысить скорость перевода урана в продуктивный раствор при закислении и на стадии выщелачивания;

– усовершенствован регламент восстановления производительности технологических скважин проведением ремонтно-восстановительных работ с применением пневмоимпульсной и химической обработки прифилтровой зоны технологических скважин растворами соляной кислотой с расходом 12 г/г кольматанта и бифторидом аммония с расходом 7,7 г/г кольматанта, что позволяет дополнительно снизить эксплуатационные затраты на 10 % при ремонтно-восстановительных работах и поддерживать производительность закачных и откачных технологических скважин на стабильном проектном уровне дебета в течение 4 лет;

– разработан комплекс программного обеспечения «Умный рудник» для удалённого мониторинга работы добычного полигона АО «Хиагда» и улучшения эффективности предприятия путем повышения качества и оперативности управления процессом скважинного подземного выщелачивания, что позволяет повысить производительность на 36 % и снизить себестоимость готовой продукции на 12,9 %.

Методология: определение взаимосвязи между горно-геологическими условиями и технологическими показателями и их влияния на вскрытие и подготовку сырья к скважинному подземному выщелачиванию; определение корреляционной связи между эффективностью выщелачивания гидрогенных урановых месторождений, их горно-геологическими условиями и технологическими показателями; определение соответствия результатов опытных работ расчетным параметрам при выщелачивании.

Методы исследования: сравнительный анализ, обобщение, и систематизация результатов отработки гидрогенных урановых месторождений методом СПВ зарубежными и отечественными предприятиями; патентный поиск; комплекс современных методов изучения вещественного состава урановых руд; математическое моделирование процессов скважинного подземного выщелачивания с применением различных систем вскрытия рудной залежи; многофакторного планирования экспериментов; лабораторные исследования выщелачивания урана; опытно-промышленные испытания; факторный анализ; экономико-математический анализ; функционально-стоимостной анализ; технико-экономический анализ; математической статистики с применением пакетов прикладных программ Correlay, Statistica, MicrosoftExcel 10.0, Gold Surfer.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Управление технологическими показателями скважинного подземного выщелачивания достигается обоснованным выбором схемы расположения технологических скважин применительно к конкретной горно-геологической обстановке гидрогенного месторождения, критерием которого является полнота извлечения урана в продуктивный раствор и минимальная себестоимость готовой продукции предприятия.

2. Интенсификация процесса кислотного выщелачивания гидrogenный руд месторождений Хиагдинского рудного поля достигается увеличением концентрации трехвалентного железа (III) за счет использования в качестве окислителя пероксида водорода при закислении в количестве 1,6 кг на 1 тонну руды и на стадии выщелачивания – 0,88 кг/т.

3. Восстановление производительности технологических скважин достигается применением пневмоимпульсной обработки с последующей делькольматацией прифилтровой зоны скважины соляной кислотой (12 г/г кольматанта) и бифторидом аммония (7,7 г/г кольматанта), что позволяет снизить затраты на ремонтно-восстановительные работы.

Достоверность научных выводов и рекомендаций основана на отборе достаточного количества проб и проведении всего спектра анализов, подтверждении результатов лабораторных исследований результатами опытно-промышленных испытаний, высокой сходимости теоретических показателей и экспериментальных результатов, применении современных технических средств при проведении испытаний, использовании сертифицированных компьютерных программ при обработке данных и обоснованной экономической эффективности работы предприятия при внедрении разработок в производство.

Реализация результатов исследований:

1 Внедрение на горном предприятии АО «Хиагда» («Акт внедрения результатов диссертационной работы» от 22.12. 22 г). Годовой экономический эффект от внедрения предлагаемых технологических решений составит 332,6 млн. руб.

2. Использование в учебном процессе Забайкальского государственного университета по специальности 21.05.04 «Горное дело» по следующим дисциплинам: «Физико-химическая геотехнология», «Скважинная геотехнология», «Управление качеством руд при добыче полезных ископаемых», «Особенности разработки урановых месторождений», «Проектирование рудников» («Акт о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВО «ЗабГУ» от 15.11.22 г).

Личный вклад автора включает: определение целей и задач исследования; разработку методологии исследования; сбор и анализ информации; исследовательскую работу по выявлению закономерных связей между природными и технологическими параметрами рудного сырья; участие в опытно-промышленных испытаниях; разработку технических и технологических решений для повышения эффективности выщелачивания, включая методику прогнозирования результатов отработки запасов, подготовка публикаций.

Апробация полученных результатов. Основные положения докладывались на: IX-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы урановой промышленности» (7-9 ноября 2019, г. Алматы, Республика Казахстан); XXII Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов» (ЗабГУ, г. Чита, 2022 г.); научно-практической конференции молодых исследователей ЗабГУ «Молодежная научная весна» (ЗабГУ, г. Чита, 2022 г.); Международной конференции «Экологические аспекты горного и перерабатывающего производств» (г. Москва, АО «ВНИИПромтехнологии», 19-20 октября 2022 г); научно-технических советах Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (г. Москва, 2017 – 2024 гг.).

Публикации. По результатам выполненных работ опубликовано 13 статей, в том числе 7 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки. Также получено 4 Свидетельства на программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 177 страниц машинописного текста, включая 74 рисунка, 38 таблиц, список использованной литературы из 125 наименований и 7 Приложений.

В первой главе дан общий обзор опыта применения скважинного подземного выщелачивания при разработке гидrogenных месторождений урана, дана горно-

геологическая характеристика месторождений Хиагдинского рудного поля и поставлены задачи исследований.

Вторая глава посвящена проведению исследований по оптимизации систем вскрытия и отработки гидрогенного месторождения методом СПВ и моделированию процессов выщелачивания с применением различных систем вскрытия.

В третьей главе рассмотрены вопросы повышения интенсивности перехода урана в продуктивный раствор при подземном скважинном выщелачивании применением различных окислителей.

Четвертая глава рассматривает вопросы влияния процессов кольтматации на производительность технологических скважин и повышения их производительности устранением причин кольтматации.

Искреннюю благодарность и признательность за поддержку и методическую помощь в подготовке работы автор выражает научному руководителю, доктору технических наук, профессору В.А. Овсейчуку и всем сотрудникам кафедр «Подземная разработка рудных месторождений» и «Открытые горные работы» ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первое защищаемое положение. Управление технологическими показателями скважинного подземного выщелачивания достигается обоснованным выбором схемы расположения технологических скважин применительно к конкретной горно-геологической обстановке гидрогенного месторождения, критерием которого является полнота извлечения урана в продуктивный раствор и минимальная себестоимость готовой продукции предприятия.

Предприятие «Хиагда» построено на базе 13 гидрогенных месторождений Хиагдинского рудного поля. Одним из направлений повышения эффективности отработки запасов является оптимизация систем разработки гидрогенных руд.

Анализ применения различных схем расположения технологических скважин показывает, что наиболее эффективными системами в условиях АО «Хиагда» являются системы с рядным и гексагональным расположением скважин. Однако однозначного ответа о преимуществе той или иной системы, ранее проведенные исследовательские и эксплуатационные работы, не дали.

Для окончательного решения проблемы по выбору наиболее эффективной системы разработки, проведено математическое моделирование отработки запасов одной из рудных залежей Хиагдинского месторождения с использованием пакетов современных прикладных программ: «MFA Hiagda – система прогнозирования геотехнологических показателей эксплуатационных блоков АО «Хиагда», «MFA Forecasting And Planing – система прогнозирования и планирования», «Экология подземных вод». В результате моделирования получены геотехнологические характеристики этого процесса. При этом моделирование осуществлялось по рядной поперечной схеме расположения скважин по сети 50*25*20 м (рисунок 1) и гексагональной – с радиусом технологической ячейки в 35 м (рисунок 2).

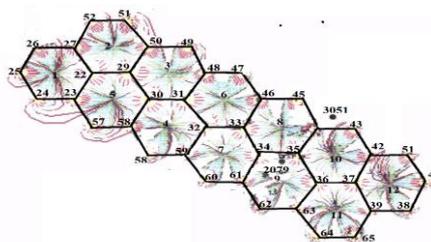
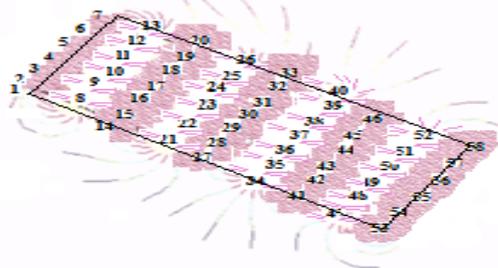


Рисунок 1 – Гидродинамическая схема Рисунок 2 – Гидродинамическая схема

движения выщелачивающих растворов при рядной поперечной схеме вскрытия

движения выщелачивающих растворов при гексагональной схеме вскрытия

Для подтверждения результатов моделирования (таблица 1), где получены величины технологических параметров выщелачивания при разных системах вскрытия запасов, проведены технико-экономические расчеты по известной методике, предложенной Е.И. Роговым и А.Е. Роговым, позволяющие оценить экономическую эффективность технологий.

Критерием эффективности варианта вскрытия принимаем прибыль при отработке залежи с запасами урана в 470 т. Как показали расчеты, прибыль при схеме вскрытия запасов гексагональной системой составила 8,9 млн.\$, а при рядной – 6,8 млн.\$, что на 31 % меньше.

В таблице 1 представлены результаты моделирования процесса выщелачивания.

Таблица 1 – Результаты моделирования процесса выщелачивания

№п/п	Технологические параметры	Ед. изм.	Дебит откачных скважин, м ³ /час					
			Гексагональная схема		Рядная (поперечная) схема			
			4.0	5.5	4.0	5.5	8.0	10.0
1	Объем откачки растворов за 60 месяцев	тыс.м ³	2080	2850	4150	5700	8230	10370
2	Время отработки полигона	месяц	60	50	45	42	36	31
3	Извлечение урана	т	291	282	378	369	359	348
		%	73	71	81	79	77	75
4	Ж:Т	м ³ /т	4.3	5.2	5.5	6.6	7.8	8.7
5	Расход серной кислоты	т	10010	12070	15970	10210	23420	26220
6	Удельный расход H ₂ SO ₄	кг/т руды	22	26	27	32	40	44
		кг/кг урана	35	43	42	52	65	75
7	Содержание урана в продуктивном растворе	мг/л	146	118	116	95	76	66

Моделирование схем расположения гексагональных технологических ячеек при отработке запасов опытного участка с радиусами ячейки 20, 30, 40, 50, 60 м позволило рассчитать количество закачных и откачных скважин при его отработке (рисунок 3).

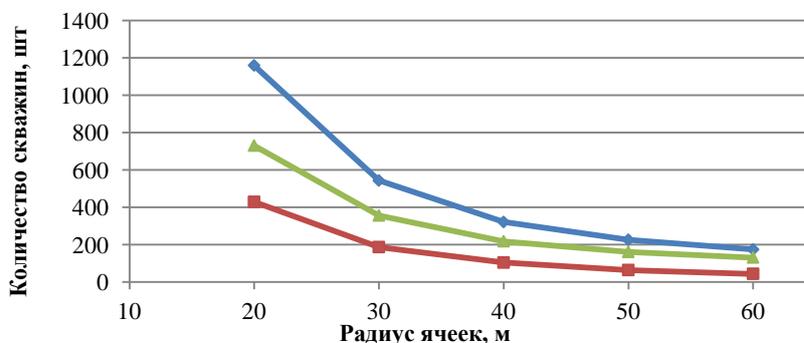


Рисунок 3 – Количество скважин в опытном полигоне при гексагональной форме ячеек с различным радиусом: 1 — общее количество скважин; 2 — количество откачных скважин; 3 — количество закачных скважин

Для определения общих затрат на строительство скважин и эксплуатацию полигона для вариантов вскрытия гексагональной системой с различными радиусами технологических ячеек проведены расчеты, отраженные на рисунке 4.

В результате проведенных расчетов установлено, что минимальная величина общих затрат на строительство и эксплуатацию опытного полигона находится в диапазоне радиуса 27-35 м, составляя в среднем 30 м.

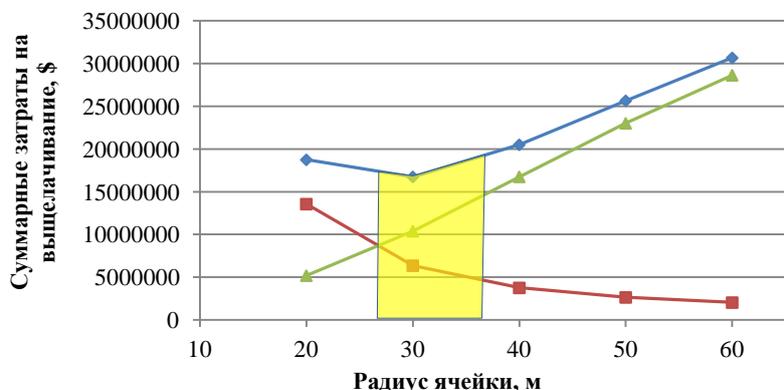


Рисунок 4 – Зависимость суммарных затрат на выщелачивание от величины радиуса гексагональной ячейки: 1 — общие затраты; 2 — затраты на строительство скважин; 3 — эксплуатационные затраты; — область оптимальной величины радиуса ячейки

В результате моделирования процесса выщелачивания при вскрытии запасов опытного полигона гексагональной системой с различными величинами радиуса технологической ячейки, получены зависимости концентрации урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания (рисунок 5).

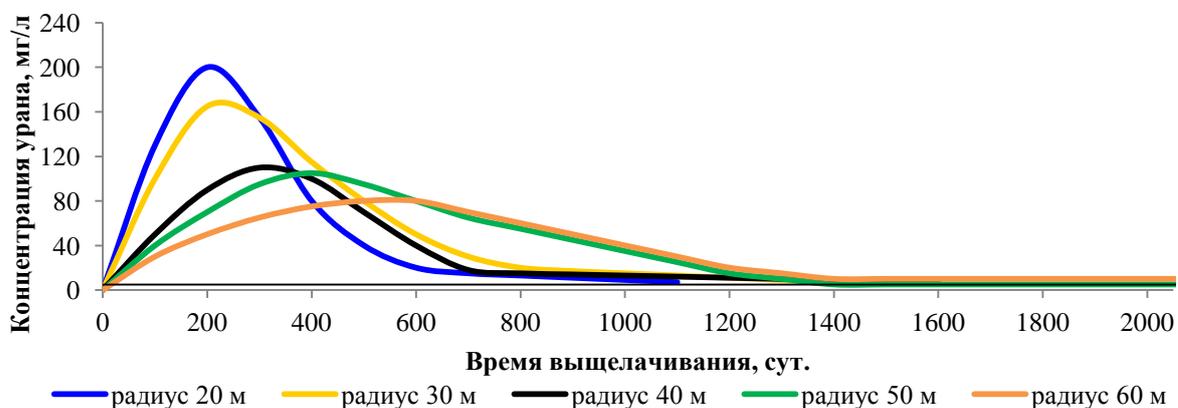


Рисунок 5 – Зависимость концентрации урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания при использовании гексагональной системы вскрытия запасов

Анализ полученных зависимостей показывает, что по мере увеличения радиуса гексагональной ячейки, интенсивность перехода урана в продуктивный раствор падает. При этом максимальная концентрация урана уменьшается от 180 мг/л при радиусе 20 м до 80 мг/л при радиусе 60 м со сдвигом достижения максимальной концентрации от 200 суток до 600 суток. Активный рост концентрации урана в растворе наблюдается именно в этот промежуток времени выщелачивания, далее для всех вариантов происходит постепенное падение концентрации до минимального значения в 10 мг/л.

Зависимость концентрации урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания для наиболее эффективной величины радиуса гексагональной ячейки в 30 м может быть выражена математической зависимостью

$$C_U = 10^{(-6,24 + 7,5 * \log(t) - 1,66 * \log(t)^2)}, \text{ мг/л}, \quad (1)$$

где C_U – максимальная концентрация урана в растворе, мг/л; t – общая продолжительность выщелачивания, сутки.

При эффективном радиусе ячейки в 30 м активный перевод урана в подвижное состояние происходит в течение первых 700 сут, после чего процесс замедляется и заканчивается на 1400 сут, когда концентрация урана в растворе падает ниже 10 мг/л.

Рисунком 6 проиллюстрирована динамика выщелачивания до извлечения 90 % запасов урана в продуктивный раствор для гексагональной системы вскрытия с различным радиусом ячеек.

Зависимость доли выщелоченного урана от времени выщелачивания для наиболее эффективного варианта вскрытия запасов с радиусом гексагональной ячейки 30 м описывается выражением

$$\varepsilon_{30} = -6,97 + 9,2 * t - 0,0002 * t^2, \text{ доли ед.} \quad (2)$$

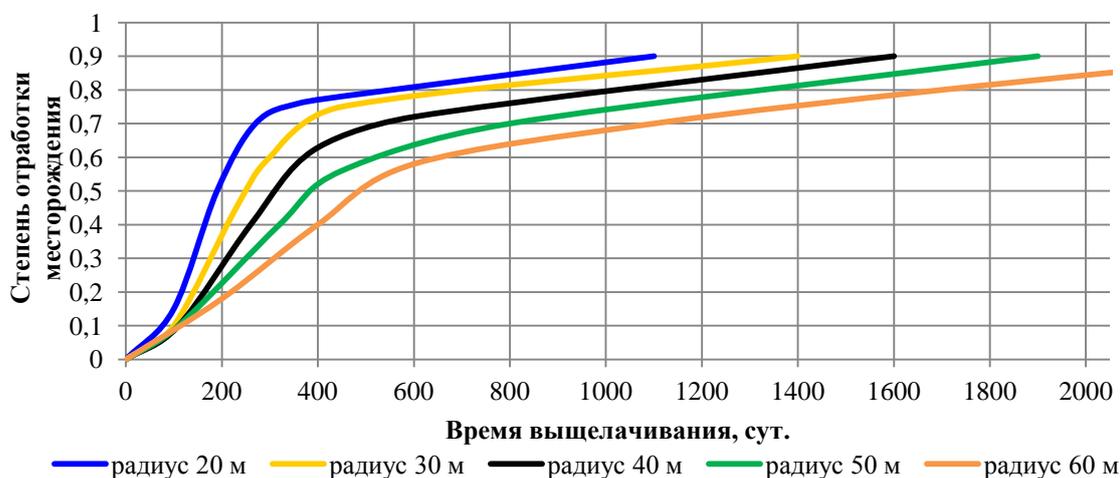


Рисунок 6 – Динамика выщелачивания до извлечения 90 % запасов урана в продуктивный раствор для гексагональной системы вскрытия с различным радиусом ячеек

Таким образом, на основании результатов математического моделирования обоснован оптимальный выбор схемы расположения технологических скважин применительно к конкретной горно-геологической обстановке гидрогенного месторождения и доказано, что наиболее эффективной системой вскрытия руд хиагдинского типа является система с гексагональным расположением скважин и радиусом ячейки в 30 м. Управление технологическими показателями скважинного подземного выщелачивания обеспечивает полноту извлечения урана в раствор и минимальную себестоимость готовой продукции.

Второе защищаемое положение. Интенсификация процесса кислотного выщелачивания гидрогенный руд месторождений Хиагдинского рудного поля достигается увеличением концентрации трехвалентного железа (III) за счет использования в качестве окислителя пероксида водорода при закислении в количестве 1,6 кг на 1 тонну руды и на стадии выщелачивания – 0,88 кг/т.

Эффективность процесса подземного кислотного выщелачивания зависит от вещественного состава руд и типа урановой минерализации.

На основе изучения прозрачных и полированных шлифов (свыше 100 образцов), с учетом химических, термических анализов и анализов ИКС (инфракрасная спектроскопия), установлено, что руды и вмещающие породы относятся по составу горнорудной массы к

алюмосиликатным (таблицы 2 и 3).

Основными породообразующими минералами являются кварц и полевые шпаты, количество которых в сумме достигает 80-90 %. Слюдисто - глинистые минералы представлены монтмориллонитом, каолинитом, хлоритом и гидрослюдами. Общее их количество по отдельным пробам может достигать 30 и более процентов. Но чаще их количество находится в пределах 10-20 %. Примерно в 10 % изученных шлифов встречаются карбонаты, количество которых по отдельным шлифам достигает 5 %.

Урановые минералы в рудных песках месторождений «Хиагды» представлены преимущественно окислами урана (уранинит, настуран), силикатом урана – коффинитом и нингиоитом, то есть минералами, трудно выщелачиваемыми без воздействия окислителей.

Таблица 2 – Результаты химического анализа шлифов

Окислы	Значения (объединенная проба), %	Окислы	Значения (объединенная проба), %
SiO ₂	75,23	Na ₂ O	0,68
TiO ₂	<0,1	K ₂ O	5,07
P ₂ O ₅	<0,1	Собщ.	0,22
MnO	0,035	ппп	2,06
Fe ₂ O ₃	<0,1	сумма	100,14
FeO	1,09	H ₂ O	1,07
Al ₂ O ₃	11,86	CO ₂	<0,1
CaO	1,12	U	0,036
MgO	2,47		

Для интенсификации процесса разрушения урановых минералов при выщелачивании используются различные химические вещества.

Таблица 3 – Минеральный состав рудных песков Хиагдинского месторождения

Наименование минерала	Доля минерала в песках, %
Кварц	28-80
Полевые шпаты	20-40
Каолинит, гидрослюда, мусковит и серицит	3,3- 5,0
Сульфиды железа	0,94
Окислы железа	0,3
Карбонаты	0,1-0,3
Углефицированные растительные остатки	0,1-5,0
Циркон, турмалин, монацит, апатит и т.д.	0,5

В диссертационной работе экспериментально изучено влияние 10 наиболее распространенных окислителей на эффективность выщелачивания урана (железо (III) и кислород, озон, пиролюзит (MnO₂), хлораты (HClO₃), гипохлорит натрия (NaClO), хлорамин (NHCl), перманганат калия (KMnO₄), бихромат калия (K₂Cr₂O₂), нитрит натрия (NaNO₂), перекись водорода (H₂O₂).

Лабораторными исследованиями, проведенными на рудах месторождений Хиагдинского рудного поля, установлено, что наиболее эффективными окислителями при выщелачивании этих руд являются перекись водорода и нитрит натрия.

В процессе исследований установлены оптимальные технологические параметры выщелачивания для вариантов: без окислителя, с применением перекиси водорода и с применением нитрита натрия. Определялись технологические параметры: Ж/Т, ОПВ, Fe (III), Fe (II), расход серной кислоты, концентрация серной кислоты от времени выщелачивания. Сравнительные характеристики приведены на рисунках 7-12.

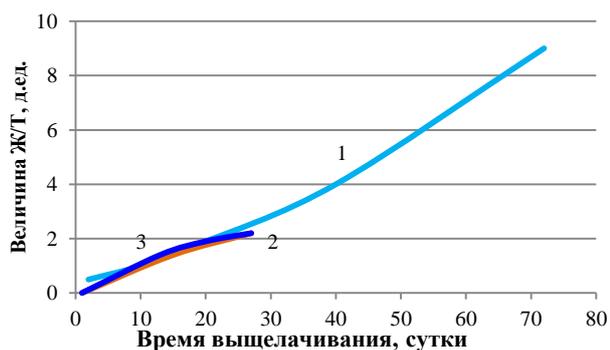


Рисунок 7 – Динамика изменения Ж:Т от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 – без окислителя; 2 – с перекисью водорода; 3 – с нитритом натрия

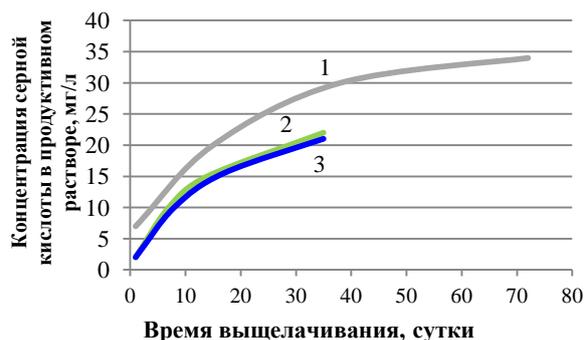


Рисунок 8 – Динамика изменения концентрации серной кислоты от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 – без окислителя; 2 – с перекисью водорода; 3 – с нитритом натрия

Динамика изменения показателя Ж/Т от времени выщелачивания по всем трем вариантам практически идентична.

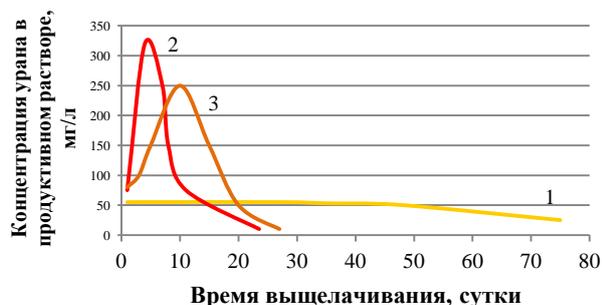


Рисунок 9 – Динамика изменения концентрации урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 – без окислителя; 2 – с перекисью водорода; 3 – с нитритом натрия

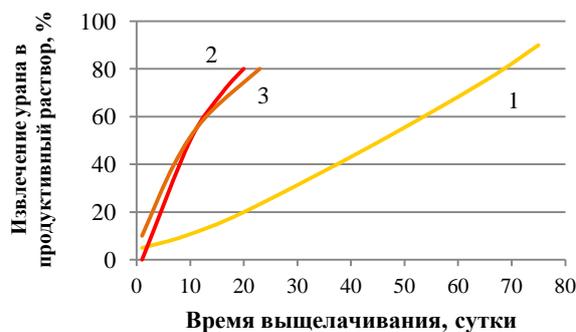


Рисунок 10 – Динамика изменения извлечения урана в продуктивный раствор от времени выщелачивания: 1 – без окислителя; 2 – с перекисью водорода; 3 – с нитритом натрия

В варианте выщелачивания с использованием перекиси водорода достигается наибольшая концентрация урана в продуктивном растворе (320 мг/л) в течение первых 5 - 7 суток, далее концентрация постепенно снижается. Аналогична зависимость концентрации с применением нитрита натрия, со сдвигом максимума на 10 суток, достигая 250 мг/л. Концентрация урана в продуктивном растворе при выщелачивании без применения окислителя в течение 40 суток не превышает 50 мг/л, далее постепенно снижаясь.

Характер кривых перехода урана в раствор при использовании и нитрит натрия, и перекиси водорода идентичен. В течение всего периода выщелачивания (23 - 26 суток) доля урана, перешедшего в подвижное состояние, возрастает и достигает 80 % и более. Кривая зависимости перехода урана в раствор при выщелачивании без окислителя имеет вогнутую форму, и максимум извлечения в 85 % достигается на 72 сутки выщелачивания. Таким образом, процесс перевода урана в продуктивный раствор при выщелачивании с применением окислителей практически в три раза быстрее при достижении заданного уровня извлечения в 80 %.

Анализ динамики изменения концентрации двухвалентного железа в растворе показывает, что максимальная концентрация железа (II) без окислителя и при использовании в качестве окислителя перекиси водорода в 200 мг/л остается в течение первых 4-5 суток.

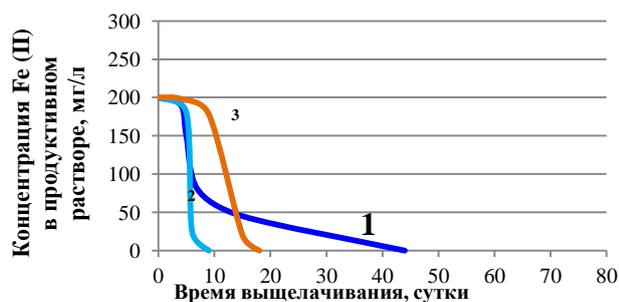


Рисунок 11 – Динамика изменения концентрации ионов железа (II) от времени выщелачивания: 1 – без окислителя; 2 – с перекисью водорода; 3 – с нитритом натрия

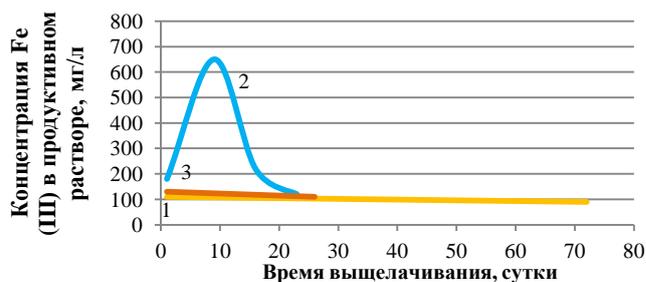


Рисунок 12 – Динамика изменение концентрации ионов железа (III) от времени выщелачивания: 1 – без окислителя; 2 – с перекисью водорода; 3 – с нитритом натрия

Затем концентрация Fe (II) начинает падать до 0, без применения окислителя этот процесс завершается на 45 сутки, а с перекисью водорода – на 9 сутки. Падение концентрации двухвалентного железа с применением нитрита натрия начинается на 12 сутки выщелачивания и завершается на 18 сутки. Таким образом, полное окисление железа до трехвалентного состояния при применении перекиси водорода происходит в наиболее короткий срок (9 суток).

Применение перекиси водорода позволило достичь максимальную концентрацию трехвалентного железа в растворе, которая составила 680 мг/л в течение 10 суток с постепенным падением концентрации в дальнейшем. Анализ изменения концентрации ионов железа (III) в зависимости от времени процесса выщелачивания показал, что при вариантах с нитритом натрия и без окислителя идентично с постепенным снижением от 150 мг/л до 50 мг/л на 70 сутки.

Изменение ОПВ для трёх вариантов в процессе выщелачивания происходит незначительно: без окислителя от 350 до 410 мВ в течение 72 суток; с применением перекиси водорода от 450 до 600 мВ в течение 22 суток; с применением нитрита натрия от 500 до 400 мВ в течение 25 суток.

Параметры выщелачивания, полученные в результате лабораторных исследований, были апробированы на запасах залежи X5-6-C₁ Хиагдинского месторождения. Вскрытие запасов осуществлялось гексагональной системой с радиусом ячейки 30 м, а выщелачивание с использованием активатора – перекиси водорода.

При этом установлено, что зависимость концентрации урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания описывается математической моделью

$$C_U = -1,8 + 1,7 * T - 0,006 * T^2, \text{ мг/л}, \quad (3)$$

где T – период выщелачивания, сутки.

Также получена зависимость концентрации серной кислоты от времени выщелачивания

$$C_{с.к.} = 17,7 + 0,2 * T - 0,001 * T^2, \text{ мг/л}. \quad (4)$$

Зависимость отношения Ж/Т от времени выщелачивания (сутки), описываемая выражением

$$\text{Ж: Т} = 1,7 + 0,005 * T, \text{ кг/т}. \quad (5)$$

Интенсификация процесса кислотного выщелачивания гидрогенный руд месторождений Хиагдинского рудного поля достигается увеличением концентрации трехвалентного железа (III) за счет использования в качестве окислителя перекиси водорода при закислении в количестве 1,6 кг на 1 тонну руды и на стадии выщелачивания – 0,88 кг.

Проведенными исследованиями физико-химических процессов концентрации урана из природного минерального сырья и химических методов их интенсификации установлено, что при выщелачивании гидrogenных урановых руд месторождений Хиагдинского рудного поля, наиболее высокими активационными свойствами обладает перекись водорода. Применение перекиси водорода позволяет: минимизировать объем выщелачивающих растворов; минимизировать расход выщелачивающего реагента; получить наиболее высокую концентрацию ионов урана в продуктивном растворе; минимизировать срок отработки запасов при извлечении урана до уровня 80 %; получить максимальное количество ионов Fe(III) при соблюдении условия $Fe(III)/Fe(II) \geq 1$, что активизирует химическую реакцию перевода урана серной кислотой в продуктивный раствор.

Полученные при лабораторных исследованиях расходные показатели подтверждены опытно-промышленными испытаниями на залежи X5-6-C1 Хиагдинского месторождения с применением в качестве окислителя перекиси водорода:

– на стадии закисления оптимальный расход серной кислоты – 25 кг/т, расход перекиси водорода - 1,6 кг/т;

– на стадии выщелачивания рекомендуемый расход выщелачивающего реагента – 7 кг/т, расход перекиси водорода – 0,88 кг/т.

Общие удельные затраты на выщелачивание с учетом реагентов составили по вариантам: без окислителя – 1536,5 \$/т; с перекисью водорода – 562,6 \$/т; с нитритом натрия – 645,6 \$/т.

Вариант применения перекиси водорода в качестве окислителя при выщелачивании руд хиагдинского типа на 15 % дешевле варианта с нитритом натрия и в три раза дешевле варианта без применения окислителя.

Третье защищаемое положение. Восстановление производительности технологических скважин достигается применением пневмоимпульсной обработки с последующей делькольматацией прифилтровой зоны скважины соляной кислотой (12 г/г кольматанта) и бифторидом аммония (7,7 г/г кольматанта), что позволяет снизить затраты на ремонтно-восстановительные работы.

На эффективность выщелачивания влияют многие факторы, как природные, так и технологические. Устойчивая работа технологических скважин – это один из важных факторов эффективной работы полигона выщелачивания. Заданные параметры производительности скважин в процессе эксплуатации изменяются в сторону уменьшения. Причиной этого является износ конструктивных элементов армировки скважин, кольматация прифилтровой зоны и самих фильтров технологических скважин.

Интенсивность процессов кольматации зависит от фракционного состава рудовмещающего пласта, химического и минерального состава руд. Для установления влияния процессов кольматации на работоспособность технологических скважин, при подземном скважинном выщелачивании рудных песков Хиагдинского месторождения, выполнено опробование отстойников скважин.

Результаты опробования показали, что отстойники почти полностью или наполовину заполнены отложениями из глины и песка. Данные исследования позволили установить зависимость влияния гранулометрического состава гидrogenных руд на интенсивность накопления механических кольматантов в зоне фильтров скважин (рисунок 13).

Степень заполнения прифилтровой зоны закачной скважины описывается выражением

$$V_{н.з.} = 0,15 + 0,003 / K_{cp} - 0,0001 / (K_{cp}^2), \% , \quad (6)$$

где K_{cp} – усредненный размер песчинок рудного пласта, мм.

В процессе выщелачивания происходит разрушение породообразующих минералов серной кислотой, в результате чего в раствор переходят Mg, Ca, Al, Fe, Si и образуют соединения, выпадающие в осадок.

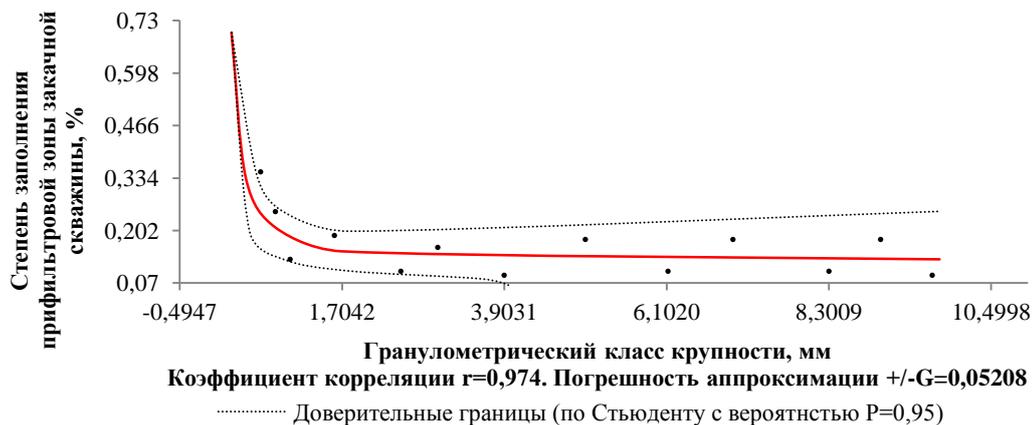


Рисунок 13 – Зависимость степени заполнения прифилтровой зоны закачной скважины от гранулометрического состава рудного песка

В процессе исследований установлена зависимость суммарного содержания породообразующих минералов от суммарной концентрации ионов Mg, Ca, Al, Fe в продуктивном растворе (рисунок 14).

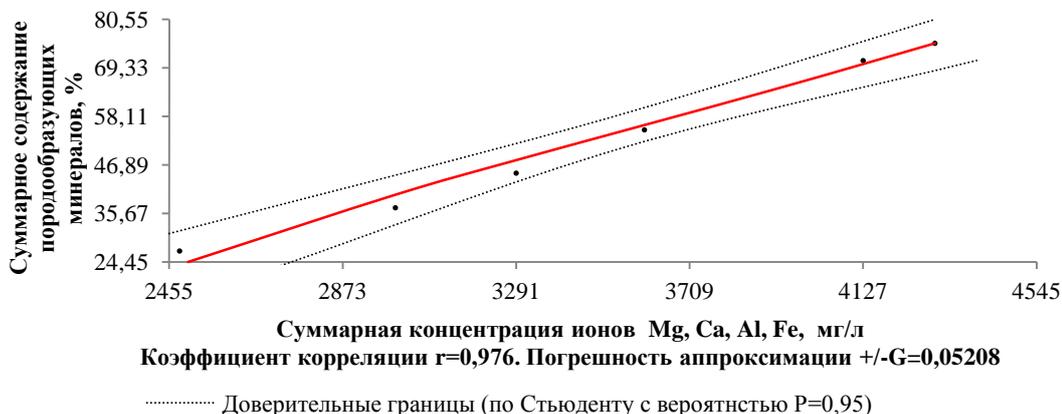


Рисунок 14 – Зависимость суммарного содержания породообразующих минералов в продуктивном растворе от суммарной концентрации ионов Mg, Ca, Al, Fe

Полученная зависимость описывается выражением

$$\alpha_{ион} = -678,4 + 89,4 \ln(C_{пор}) \quad \%, \quad (7)$$

где $\alpha_{ион}$ – концентрация соединений Mg, Ca, Al, Fe в продуктивном растворе, мг/л, $C_{пор}$ – содержание породообразующих минералов в рудных песках, %.

В результате химических реакций ионов металлов, перешедших в раствор, образуется ряд соединений, выпадающих в осадок – химических кольматантов. В результате работы откачных скважин, продуктивные растворы, насыщенные данными соединениями, попадают в прифилтровую зону и оседают на стенки прифилтровой камеры и детали армировки скважин, постепенно забивая фильтрационные отверстия.

Исследования по растворению кольматантов, проведенные на скважинах АО «Хиагда», показали, что наиболее эффективным растворителем соединений Mg, Ca, Al, Fe является соляная кислота (HCl). Зависимость расхода соляной кислоты на растворение кольматанта, исходя из концентрации данных ионов в продуктивном растворе, приведена на рисунке 15.

Полученная зависимость расхода соляной кислоты описывается выражением

$$Q_{HCl} = 5849662 + 822444 * \ln(C_{Mg,Ca,Al,Fe}) \quad \text{г/скв.} \quad (8)$$

где $C_{Mg,Ca,Al,Fe}$ – концентрация ионов Mg, Ca, Al, Fe в продуктивном растворе.

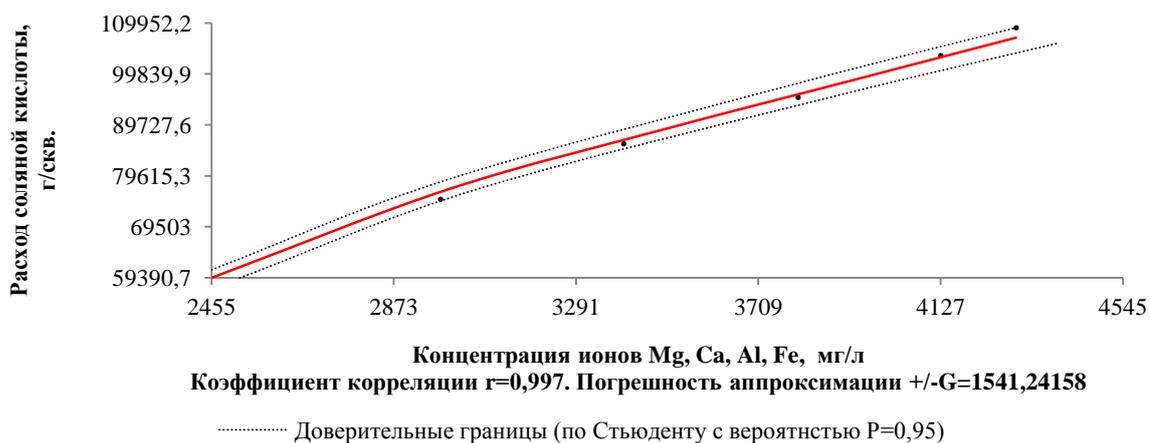


Рисунок 15 – Зависимость расхода соляной кислоты на растворение кольматантов от концентрации ионов Mg, Ca, Al, Fe в продуктивном растворе

Кроме соединений, растворяющихся соляной кислотой, в виде кольматантов в осадок выпадают коллоидные соединения кремния в виде SiO_2 , не поддающиеся разрушению соляной кислотой.

Исследованиями установлено, что концентрация кремниевой кислоты в продуктивном растворе зависит от содержания силикатных минералов в руде (рисунок 16).

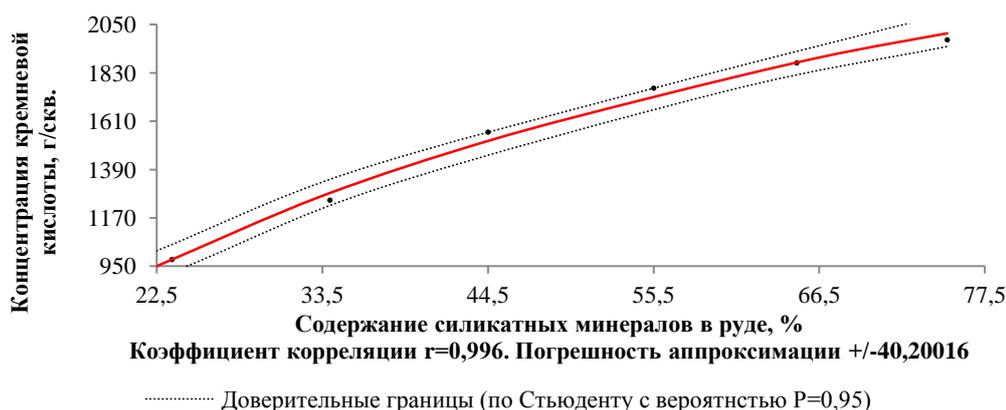


Рисунок 16 – Зависимость концентрации кремневой кислоты в продуктивном растворе от содержания силикатных минералов в рудных песках

Выявленная зависимость описывается математическим выражением

$$\alpha = -2004,4 + 937,8 \ln(C_{\text{сил}}), \text{ мг/л}, \quad (9)$$

где α – концентрация кремневой кислоты в продуктивном растворе;

$C_{\text{сил}}$ – содержание силикатных минералов в выщелачиваемой руде, %.

Лабораторными исследованиями установлено, что для разложения коллоидного кремнезема наиболее эффективным растворителем является бифторид аммония. Для растворения 1 г аморфного кремнезема необходимо затратить 7,75 г бифторида аммония.

Выявлена зависимость расхода бифторида аммония от концентрации кремниевой кислоты в продуктивном растворе, необходимого для растворения отложений коллоидного кремнезема (рисунок 17).

Зависимость описывается математическим выражением

$$Q_{[\text{NH}_4]\text{HF}_2} = -1406343 + 225342 * \ln(\beta_{\text{сил}}), \text{ г/скв.}, \quad (10)$$

где Q – расход бифторида аммония, г/скв., $\beta_{\text{сил}}$ – концентрация кремниевой кислоты в продуктивном растворе, г/л.

На основе проведенных исследований разработан технологический регламент проведения ремонтно-восстановительных работ на технологических скважинах (таблица 5).

Таблица 5 – Технологический регламент ремонтно-восстановительных работ технологических скважин*

Наименование операции	Величина показателя
Первый этап – пневмоимпульсная обработка с эрлифтной прокачкой до осветления растворов (закачные и откачные скважины)	
Параметры пневмоимпульсной обработки:	
цикличность обработки	28 суток
продолжительность обработки пневмоимпульсом	20 мин
эрлифтная прокачка	до осветления растворов
Второй этап – химическая обработка раствором соляной кислоты и бифторида аммония	
Обработка раствором соляной кислоты	
концентрация соляной кислоты	25 %
время обработки	24 часа
расход соляной кислоты	12 г на 1 г кольматанта
Обработка раствором бифторида аммония	
время обработки	48 часов
расход бифторида аммония	7,7 г на 1 г аморфного кремнезема
Эрлифтная прокачка	до осветления растворов

*Совместная обработка соляной кислотой и бифторидом аммония в течение 24 часов.

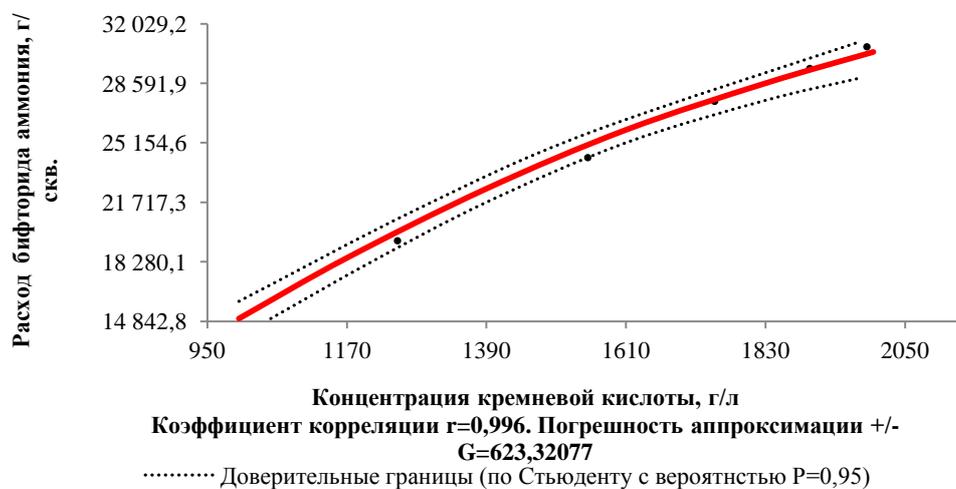


Рисунок 17 – Зависимость расхода бифторида аммония на декольматацию откачной скважины от концентрации кремневой кислоты в продуктивном растворе

В 2017-2021 гг. проведены ремонтно-восстановительные работы по предложенному регламенту на 7581 закачной скважине и на 382 откачных скважинах, эксплуатирующихся на Хиагдинском месторождении.

В процессе проведенных работ, получены зависимости изменения производительности закачных скважин от срока их эксплуатации (рисунок 18).

Динамика падения производительности скважин в течение 4 лет (t) при межремонтном периоде 28 суток выражается эмпирической зависимостью

$$P_{скв} = 5,2 - 1,1t + 0,1t^2, \text{ м3/час.} \quad (11).$$

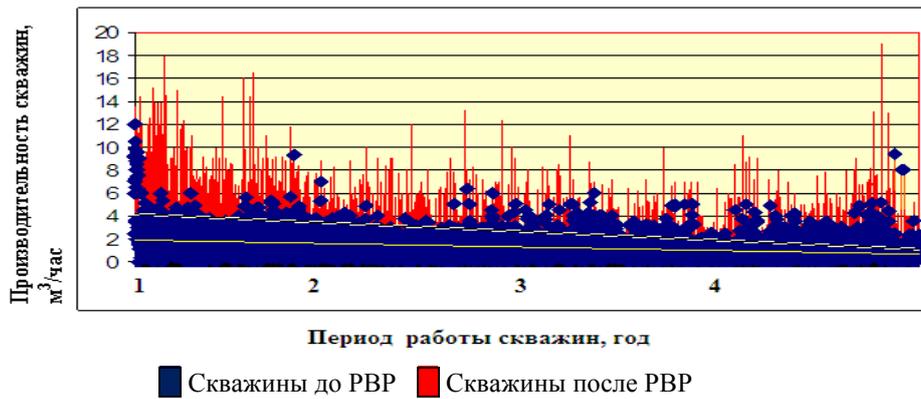


Рисунок 18 – зависимость изменения производительности закачных скважин от срока их службы: – усредненные значения производительности скважин до обработки; – усредненные значения производительности скважин после обработки

Динамика роста производительности скважин за тот же период времени после обработки описывается выражением

$$P_{скв} = 1/(0,5 + 0,02t + 0,01t^2), \text{ м}^3/\text{час.} \quad (12).$$

На рисунке 19 представлена динамика изменения производительности откачных скважин.

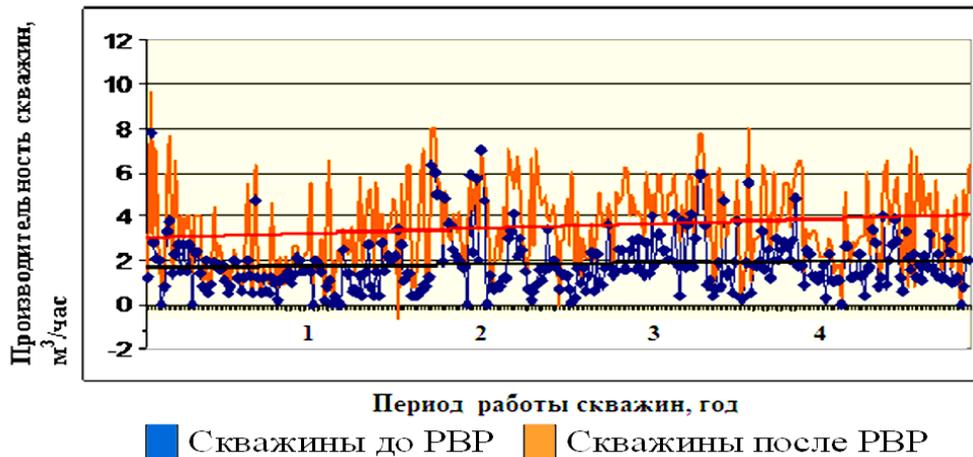


Рисунок 19 – Зависимость изменения производительности откачных скважин от срока их службы: – усредненные значения производительности скважин до обработки; – усредненные значения производительности скважин после обработки

Динамика падения уровня производительности откачных скважин при сроке их эксплуатации в 4 года и величине межремонтного цикла в 28 суток описывается выражением

$$P_{скв} = 1/(0,6 - 0,02t + 0,0004t^2), \text{ м}^3/\text{час.} \quad (13)$$

Динамика восстановления производительности после их обработки, выражением

$$P_{скв} = 2,8 + 0,2t, \text{ м}^3/\text{час.} \quad (14)$$

Ремонтно-восстановительные работы, проводимые согласно предложенному регламенту, позволяют поддерживать производительность закачных и откачных скважин на проектном уровне в течение 4 лет. Для поддержания производительности откачных скважин после первых двух лет эксплуатации, кроме регулярного проведения РВР, требуется

частичная замена корродированных элементов армировки скважин. Затраты на РВП в расчете на 1 т погашенной балансовой руды снижены с 61 руб. до 19 руб.

Суммарное снижение стоимости сооружения скважины новой конструкции по сравнению со скважинами старой конструкции составило 3,5%. Срок отработки запасов месторождений сокращён на 32 %; себестоимость готовой продукции снижается на 13,0 %.

В 2021 г на предприятии АО «Хиагда» реализован проект «Умный полигон», разработанный специалистами горнорудного дивизиона «Росатом» с непосредственным участием автора диссертации и учеными Северского технологического института «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Проект «Умный полигон» является интеллектуальным технологическим решением цифрового жизненного цикла добычи урана методом СПВ и позволяет повысить эффективность геотехнологического процесса, уменьшить эксплуатационные расходы, осуществлять удалённый мониторинг, оперативный контроль и анализ работы добычного полигона с помощью комплекса программного обеспечения для АСУТП. Приоритет новых технических решений подтверждён свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ: № 2023612088 (RU); № 2023612447 (RU); № 2022683474 (RU); № 2019661994 (RU). В качестве исходных материалов для формирования базы данных использована научно-техническая информация, полученная автором работы в процессе выполнения исследований. Внедрение проекта в производство, позволит дополнительно снизить эксплуатационные затраты на 10 %.

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований, опытно-промышленных испытаний изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по отработке гидрогенных урановых руд скважинным подземным выщелачиванием и извлечению урана из природного минерального сырья с применением методов интенсификации, имеющие существенное значение для атомной промышленности и развития страны.

1. Доказано многовариантным моделированием технологических процессов движения растворов в продуктивном пласте и экономических процессов всего цикла добычи в зоне многолетней мерзлоты и экспериментальными исследованиями, что для гидрогенных руд хиагдинского типа при вскрытии месторождений наиболее эффективна гексагональная схема расположения технологических скважин с радиусом ячейки в 30 м, позволяющая осуществить максимально возможный охват площади рудной залежи на уровне 90 % запасов урана. Опытными промышленными испытаниями подтверждено снижение объема выщелачивающих растворов и расхода выщелачивающего реагента при извлечении урана на уровне не ниже 80 %.

2. Выявлена зависимость концентрации урана (Cu) в продуктивном растворе от продолжительности выщелачивания (t), для оптимального варианта расположения технологических скважин с радиусом гексагональной ячейки в 30 м, описываемая математическим выражением: $C_U = 10^{(-6,24 + 7,5 * \log(t) - 1,66 * \log(t)^2)}$, мг/л.

3. Выявлена зависимость извлечения доли урана в раствор от времени выщелачивания (t) для гексагональной ячейки радиусом 30 м, описываемая зависимостью: $\varepsilon_{30} = -6,97 + 9,2 * t - 0,0002 * t^2$, доли ед.

4. Установлено в процессе лабораторных исследований и подтверждено опытно-промышленными работами, что наиболее эффективным активатором процесса выщелачивания гидрогенных руд месторождений Хиагдинского рудного поля является перекись водорода с расходом окислителя на стадии закисления в 1,6 кг/т и на стадии выщелачивания – 0,88 кг/т, что позволяет получить наиболее высокую концентрацию урана в продуктивном растворе и максимальную концентрацию трёхвалентного железа (III).

5. Разработан и внедрён на АО «Хиагда» комплекс ремонтно-восстановительных работ технологических скважин сочетанием пневмоимпульсной и химической обработки прифильтровой части колонны, обеспечивающий поддержание запланированной производительности закачных и откачных скважин до 4 лет непрерывной работы.

6. Экспериментально доказано, что наиболее эффективными декольматантами технологических скважин при отработке руд месторождений хиагдинского типа являются соляная кислота, эффективно растворяющая соединения Mg, Ca, Al, Fe, и бифторид аммония, разлагающий коллоидный кремнезем, расход которых зависит от концентрации данных ионов металлов и концентрации кремниевой кислоты в продуктивном растворе. Установлены зависимости расходов: $Q_{HCl} = 5849662 + 822444 * \ln(C_{Mg,Ca,Al,Fe})$, г/скв. и $Q_{[NH_4]HF_2} = -1406343 + 225342 * \ln(\beta_{sil})$, г/скв.

7. Установлены зависимости повышения производительности технологических скважин от времени обработки при регулярном проведении ремонтно-восстановительных работ: закачных скважин – $P_{скв} = 1/(0,5 + 0,02t + 0,01t^2)$, м³/час; откачных скважин – $P_{скв} = 2,8 + 0,2t$, м³/час, что дает возможность оптимизировать срок эксплуатации технологических скважин.

8. Разработан регламент выщелачивания урановых руд месторождений Хиагдинского рудного поля с использованием в качестве активатора перекиси водорода. Усовершенствован регламент восстановления производительности технологических скважин проведением ремонтно-восстановительных работ с применением пневмоимпульсной и химической обработки прифильтровой зоны.

Результаты внедрения разработок на горном предприятии (ожидаемые): сокращение срока отработки запасов месторождений на 32 %; снижение себестоимости готовой продукции на 13,0 %; продление срока эксплуатации технологических закачных и откачных скважин до 4 лет. Суммарный расчетный экономический эффект от внедрения составляет 332,6 млн. руб. в год. Извлечение урана в готовую продукцию составит 85 % от исходного количества урана в недрах.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Издания ВАК

1. АО «Хиагда»: основные вехи развития и главные достижения / В. Н. Верховцев, В. С. Святецкий, **А. Н. Михайлов**, А. А. Михайлов // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 4–12.

2. Влияние генетических особенностей урановых месторождений Хиагдинского рудного поля на выбор технологий отработки рудных залежей скважинным подземным выщелачиванием / А. В. Гладышев, **А. Н. Михайлов**, И. Н. Солодов, А. В. Суворов // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 13–17.

3. **Михайлов, А. Н.** Определение параметров систем разработки гидрогенных месторождений методом подземного скважинного выщелачивания / А. Н. Михайлов, В. А. Овсейчук // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2022. – Т. 28. – № 4. – С. 19–27.

4. **Михайлов, А. Н.** Анализ результатов комплексной обработки технологических скважин для восстановления их работоспособности / А. Н. Михайлов, В. А. Овсейчук // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2022. – Т. 28. – № 6. – С. 15–25.

5. **Михайлов, А. Н.** Влияние различных реагентов на эффективность подземного скважинного выщелачивания урана из руд Хиагдинского месторождения / **А. Н. Михайлов**, В. А. Овсейчук // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2022. – Т. 28. – № 5. – С. 16–27.

6. «Умный полигон» скважинного подземного выщелачивания урана / М. Д. Носков, **А. Н. Михайлов**, Р. С. Нарышкин, Р. С. Рудин // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 39–46.

7. Овсейчук, В. А. Полупромышленные испытания применения окислителей при скважинном выщелачивании гидрогенных руд месторождений Хиагдинского рудного поля / В. А. Овсейчук, **А. Н. Михайлов** // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 28–34.

Программы для ЭВМ

8. Свидетельство № 2019661994 (RU). Система оперативного контроля и анализа работы добычного полигона АО «Хиагда»: программа для ЭВМ: № 2019619389: заявл. 29.07.2019: опубл. 13.09.2019 / Гладышев А. В., Истомин А. Д., Крюкова Е. А., Макшанинов В. В., **Михайлов А. Н.**, Носков М. Д., Чеглоков А. А.; правообладатель АО «Хиагда». – Бюл. № 9.

9. Свидетельство № 2023612088 (RU). Web-приложение для мониторинга плановых и фактических данных основного производства АО «Хиагда»: программа для ЭВМ: № 2022682771: опубл. 30.01.2023 / Гурулев Е. А., Гуцул М. В., Истомин А. Д., **Михайлов А. Н.**, Нарышкин Р. С., Носков М. Д., Сакирко Г. К., Сербин А. В.; правообладатель АО «Хиагда».

10. Свидетельство № 2023612447 (RU). Программное обеспечение для ввода и анализа плановых и фактических данных основного производства АО «Хиагда»: программа для ЭВМ: №: 2022683181 заявл. 23.11.2022: опубл. 02.02.2023 / Гурулев Е. А., Гуцул М. В., Истомин А. Д., **Михайлов А. Н.**, Нарышкин Р. С., Носков М. Д., Сакирко Г. К., Сербин А. В., Чеглоков А. А.; правообладатель АО «Хиагда». – Бюл. № 2.

11. Свидетельство № 2022683474 (RU). Программное обеспечение для ввода и анализа плановых и фактических данных основного производства АО «Хиагда»: программа для ЭВМ: №: 2022682669 заявл. 23.11.2022: опубл. 05.12.2022 / Гурулев Е. А., Гуцул М. В., Истомин А. Д., **Михайлов А. Н.**, Нарышкин Р. С., Носков М. Д., Сакирко Г. К., Сербин А. В., Чеглоков А. А.; правообладатель АО «Хиагда». – Бюл. № 12.

Прочие издания

12. Восстановление производительности технологических скважин при скважинном подземном выщелачивании урана / А. С. Бабкин, А. Г. Иванов, **А. Н. Михайлов** [и др.] // Московский экономический журнал. – 2019. – № 2. – С. 83–100.

13. «Умный полигон СПВ» – технология оптимального управления в реальном времени / А. В. Гладышев, **А. Н. Михайлов**, А. Д. Истомин [и др.] // Актуальные проблемы урановой промышленности: материалы IX Междунар. науч.- практ. конф. (г. Алматы, 7–9 ноября). – Алматы: Казахский национальный ун-т, 2019. – Ч. 2. – С. 294–300.

14. **Михайлов, А. Н.** Влияние плотности расположения технологических скважин на параметры выщелачивания гидрогенных руд месторождений Хиагдинского рудного поля / А. Н. Михайлов, В. А. Овсейчук // Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов: материалы XXII Междунар. науч.- практ. конф.: в 2 ч. – Чита: ЗабГУ, 2022. – Ч. 2. – С. 8–13.

15. Ремонтно-восстановительные работы для повышения производительности технологических скважин / А. Г. Иванов, **А. Н. Михайлов**, Н. А. Алексеев [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 6. – С. 52–58.

16. Методы и технические средства обработки фильтров и прифильтровых зон технологических скважин / А. Г. Иванов, **А. Н. Михайлов**, Н. А. Алексеев [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 7. – С. 40–44.

17. Специальные работы для восстановления и поддержания рабочего состояния эксплуатационной колонны технологических скважин / А. Г. Иванов, **А. Н. Михайлов**, Н. А. Алексеев [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 8. – С. 40–45.