

На правах рукописи

Гладышев Андрей Владимирович



**РАЦИОНАЛЬНОЕ ОСВОЕНИЕ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
МЕТОДОМ СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность: 1.6.9 «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2026

Работа выполнена в акционерном обществе «Ведущий научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии» (АО «ВНИПИпромтехнологии») Горнорудного дивизиона Госкорпорации «Росатом».

**Научный
руководитель**

Солодов Игорь Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, советник Первого заместителя генерального директора – исполнительного директора, акционерное общество «Росатом Недра» (АО «Росатом Недра»), г. Москва

**Официальные
оппоненты**

Язиков Егор Григорьевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Боголюбов Евгений Петрович – доктор технических наук, научный руководитель по направлению Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»), г. Москва.

**Ведущая
организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»), г. Москва.

Защита диссертации состоится 22 октября 2026 г. в 10:00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН, а также на официальном сайте института: <https://ifz.ru/>. Автореферат размещён на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации: <http://vak.gisnauka.ru/> и на сайте ИФЗ РАН <https://ifz.ru/>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, необходимо направлять в одном экземпляре с согласиями на использование персональных данных по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, учёному секретарю диссертационного совета, кандидату физико-математических наук Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан __ июля 2026 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Госкорпорация «Росатом» реализует программу расширения атомной генерации в Российской Федерации (РФ) и проектов строительства атомных электростанций (АЭС) за рубежом, в связи с чем возрастает потребность в природном уране.

Обеспечение этой потребности возможно за счет развития добычи урана на одном из ключевых ураноносных регионов России — Витимском урановорудном районе (ВУРР) в Республике Бурятия. По результатам поисково-оценочных работ, общая оценка прогнозных ресурсов составляет 255 тыс. т. урана, которые в значительной части пригодны для промышленного освоения методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). В пределах ВУРР выделяется Хиагдинское рудное поле (ХРП), включающее восемь палеодолинных месторождений с суммарными запасами порядка 47 тыс. т. урана. Значительная часть этих месторождений уже вовлечена или планируется к вовлечению в промышленную разработку методом скважинного подземного выщелачивания АО «Хиагда» — крупнейшим по добыче и наиболее динамично развивающимся уранодобывающим предприятием РФ, единственным в мире, осуществляющим промышленную добычу урана методом СПВ в зоне многолетней мерзлоты.

Разработка технологий, позволяющих достоверно оценивать промышленные запасы урана, вскрываемых технологическими скважинами, эффективно осваивать гидрогенные месторождения урана скважинным подземным выщелачиванием, повышать качество и полноту освоения недр, — одна из важнейших задач. К таким технологиям относится используемый в данном исследовании комплекс, включающий гамма-каротаж (ГК), метод каротажа мгновенных нейтронов деления ^{235}U (КНД-М) и геотехнологическое математическое моделирование.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена долгосрочным ростом потребности атомной отрасли в природном уране, стратегической ролью ВУРР в формировании сырьевой базы урана, а также необходимостью разработки и совершенствования комплексной системы управления процессом скважинного подземного выщелачивания. Такая система, основанная на интеграции современных геофизических методов и геотехнологического математического моделирования, позволит повысить точность оценки запасов, надёжность прогноза технологических показателей и эффективность освоения гидрогенных палеодолинных месторождений урана.

Степень разработанности темы исследований

Теоретические основы КНД-М, ядерно-геофизическая аппаратура, методика измерений, метрологическое обеспечение и методика проверки скважинной аппаратуры разработаны и внедрены в практику геолого-разведочных работ выдающимися отечественными учеными и приборостроителями: И. М. Хайковичем, Г. И. Ганичевым, Н. А. Мац, Е. П. Боголюбовым, И. А. Титовым, Ю. Г. Полкановым, А. В. Легавко,

В. Л. Шашкиным, Б. М. Колесовым, В. А. Золотницким, А. П. Кошелевым, В. Т. Перелыгиным, А. Л. Поляченко, А. Р. Миносьянцем и многими другими.

По инициативе АО «Атомредметзолото» (ныне АО «Росатом Недра») и совместными усилиями специалистов ФГУ НПП «Геологоразведка», ФГУП «ВНИИА» им. Н. Л. Духова, ФГУП ГНЦ РФ «ВНИИГеосистем», ИФЗ РАН (ООО «НПФ УТФ») и АО «Русбурмаш» проведена глубокая модернизация аппаратурно-методического комплекса (АМК) каротажа мгновенных нейтронов деления ^{235}U (КНД-М) в модификации АИНК-49. Комплекс разработан и внедрен в АО «Хиагда».

В основе использованного в работе геотехнологического математического моделирования (ГТММ) лежит теория физико-химической гидродинамики, большой вклад в создание которой внесли отечественные учёные Н. Н. Веригин, В. С. Голубев, Д. С. Коржинский, А. А. Куваев, А. В. Лехов, Л. Лукнер, В. А. Мироненко, С. П. Поздняков, А. А. Рошаль, В. Г. Румынин, Б. Н. Рыженко, В. М. Шестаков. Применительно к процессам СПВ физико-химическая гидродинамика получила развитие в работах В. С. Голубева и Г. Н. Кричевца. В последние годы непосредственно для рудных объектов ХРП данный подход реализован в виде ГТММ коллективом ученых Северского технологического института НИЯУ МИФИ под руководством М. Д. Носкова при участии автора диссертации.

Цели и задачи работы

Цель работы — повысить эффективность отработки гидрогенных палеодолинных месторождений урана методом скважинного подземного выщелачивания за счет совершенствования геолого-геофизических технологий и комплексирования с геотехнологическим математическим моделированием на стадиях вскрытия рудных залежей технологическими скважинами, на основном и завершающем этапе извлечения урана из недр; обеспечить полноту освоения недр.

Реализация данной цели предусматривает решение следующих задач.

1. Исследовать факторы, вызывающие нарушение радиоактивного равновесия в системах U-Ra и Ra-Rn , и их влияние на достоверность оценки промышленных запасов традиционным методом гамма-каротажа.
2. Оценить степень изменчивости радиологических свойств урановых руд месторождений Хиагдинского рудного поля.
3. Обосновать необходимость прямого определения содержания урана в рудах методом КНД-М и доказать, что гамма-каротаж не применим для определения остаточных содержаний урана в рудах на стадии отработки рудных залежей сернокислотным СПВ.
4. Обобщить результаты исследований в скважинах методом ГК и КНД-М на основных стадиях освоения урановых месторождений ХРП.
5. Разработать и внедрить в производство нерегулярные сети расположения технологических скважин на стадии отработки эксплуатационных блоков и верификации методом КНД-М результатов ГТММ.
6. Разработать и внедрить в производство метод локализации поиска целиков урановых руд на стадии завершения отработки эксплуатационных

блоков СПВ применением комплекса методов: КНД-М, ГТММ и реконструированных исходных содержаний урана в рудах по ГК.

Объект исследования — гидрогенные палеодолинные урановые месторождения ХРП.

Научная новизна

На основании проведенных исследований получены следующие новые данные:

- установлена изменчивость радиологических свойств урановых руд, обусловленная близсовременным возрастом урановых руд, особенностями химического состава подземных вод и поступлением радона из гранитного фундамента в рудоносный горизонт;
- доказана необходимость прямого определения урана в рудах методом каротажа мгновенных нейтронов деления ^{235}U в сложных радиологических условиях месторождений ХРП;
- обосновано применение нерегулярных сетей технологических скважин при контрастном распределении урана в рудах по площади рудных залежей;
- подтверждена для месторождений ХРП неприменимость ГК для определения остаточных содержаний U в выщелоченных рудах из-за низкой растворимости сульфата Ra в сернокислой среде, но этот недостаток ГК на стадии отработки залежей СПВ становится преимуществом, позволяющей с незначительной погрешностью (< 5 %) реконструировать исходные содержания U в рудах и оценивать степень его извлечения из рудоносных отложений;
- прямыми измерениями доказана возможность верификации методом КНД-М результатов ГТММ;
- впервые на урановых месторождениях ХРП проведена оценка остаточного и техногенно переотложенного урана в рудах и предложены способы увеличения полноты освоения недр.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Включение в комплекс геофизических исследований скважин метода прямого определения концентраций урана на месте залегания руд обеспечивает повышение достоверности оценки промышленных запасов урана в сложных радиологических условиях месторождений Хиагдинского рудного поля.

2. Способ количественной оценки степени извлечения урана из рудных залежей на основной стадии скважинного подземного выщелачивания, основанный на реконструкции исходных концентраций урана по данным гамма-каротажа и определении текущих концентраций урана по данным каротажа мгновенных нейтронов деления, позволяет оперативно применять методы интенсификации добычи и рационально вести процесс извлечения урана.

3. Методический приём выявления целиков остаточных концентраций урана и зон его техногенного переотложения на завершающей стадии скважинного подземного выщелачивания, основанный на определении концентраций урана по данным каротажа мгновенных нейтронов деления в сочетании с геотехнологическим математическим моделированием позволяет локализовать целики остаточных концентраций урана в рудах и минимизировать объемы бурения контрольных скважин.

Фактический материал

Фактологической основой работы послужили результаты изучения керновых проб и геофизические исследования в 425 разведочных скважинах на месторождении Вершинное, полученные в ходе геологоразведочных работ в 1992–2012 гг. Методы изучения керновых проб включали: силикатный анализ — 54; количественный спектральный анализ на 21 элемент — 3268; полуколичественный спектральный анализ на 42 элемента — 1723; рентгеноспектральный анализ на U и Th — 4994; комплексный физический метод определения содержания Ra в порошковых пробах — 2267. Выполнено обобщение и интерпретация комплексных ГК и КНД-М исследований в 269 скважинах.

Методология и методы диссертационного исследования

Методологическую основу диссертационной работы составляют современные представления о закономерностях формирования гидрогенных палеодолинных месторождений урана, их геологическом строении и гидрогеологических условиях залегания урановых руд, а также научные основы геофизических исследований скважин и геотехнологии скважинного подземного выщелачивания урана. Исследование выполнено на основе комплексного подхода, предусматривающего совместное использование геологических, геофизических, гидрогеохимических и геотехнологических данных.

Для решения поставленных задач использованы методы сбора, систематизации, анализа и обобщения материалов геологоразведочных и эксплуатационных работ, статистической обработки результатов исследований, а также формирования геолого-геофизических баз данных. В качестве основных геофизических методов применялись ГК и КНД-М в сочетании с ГТММ.

Личный вклад автора

Формулировка целей и постановка задач исследований [1, 3, 4, 5]; сбор, анализ и обобщение геолого-геофизической информации [6, 22, 24]; подготовка исходных данных и участие в разработке алгоритмов для создания комплекса программ для проектирования вскрытия и управления СПВ [2, 7–16]; организация натурных исследований [6]; организация и участие в опытно-промышленных испытаниях, разработанных автором технологий, подготовка выводов [24, 20]; подготовка исходных данных, постановка задач и обсуждение результатов ГТММ [2, 23].

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в развитии представлений о радиологических особенностях гидрогенных палеодолинных урановых месторождений Хиагдинского рудного поля и влиянии этих особенностей на достоверность геофизической оценки промышленных запасов. Установлены закономерности изменчивости радиологических свойств урановых руд, обусловленные близсовременным возрастом руд, химическим составом подземных вод и поступлением радона из гранитного фундамента в рудоносный горизонт. Обоснована неприменимость традиционного гамма-каротажа для определения остаточных содержаний урана в выщелоченных рудах в условиях сернокислотного СПВ и показана принципиальная возможность реконструкции

исходных содержаний урана по данным ГК. Получены новые данные о достоверности и информативности КНД-М как метода прямого определения содержаний урана *in situ* и верификации геотехнологических математических моделей.

На стадии вскрытия рудных залежей технологическими скважинами КНД-М повышает достоверность оценки промышленных запасов U и исключает погрешности, связанные с нарушением радиоактивного равновесия в U-Ra- и Ra-Rn-системах. Технологический и экономический эффект от применения КНД-М достигнут при бурении контрольных, добуриваемых и перебуриваемых скважин за счет исключения бурения скважин с керном, геологического опробования керна, химико-аналитических и радиометрических определений урана, радия, калия и тория. Достигнутый в 2017–2024 гг. экономический эффект от внедрения КНД-М составил 300,9 млн руб. При внедрении нерегулярных сетей вскрытия рудных залежей на месторождениях Хиагдинское, Вершинное, Источное и Количиканское получен экономический эффект в размере 2176,5 млн руб.

Впервые использован комплекс геофизических исследований скважин в сочетании с ГТММ для локализации поиска целиков не отработанных СПВ руд и предложены способы доработки остаточных запасов U.

Полученные результаты могут быть рекомендованы к применению на других гидрогенных урановых месторождениях со сходными горно-геологическими условиями.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов исследований основана на поверке скважинной аппаратуры и тарирования генератора нейтронов в сертифицированных метрологических центрах, на регулярной калибровке мониторов АМК КНД-М, поверке аппаратуры в специально оборудованных контрольно-поверочных скважинах с эталонным распределением урана в рудах, а также на отборе достаточного количества керновых проб для верификации результатов каротажных исследований в скважинах.

Результаты диссертации были представлены на IX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы урановой промышленности» 7 ноября 2019 г. (Алматы); на VII Международной научно-технической конференции «Экологические аспекты горного и перерабатывающего производства» в 2022 г. (Москва); на V Международном симпозиуме «Уран: геология, ресурсы, производство» в ФГБУ «ВИМС» в 2021 г. (Москва); на XI Международной научно-практической конференции «Развитие урановой и редкометалльной промышленности» 16 мая 2024 г. (Алматы); на VI Международном симпозиуме: «Уран: геология, ресурсы, производство 22 апреля 2025 г. в ФГБУ «ВИМС» (Москва).

По результатам выполненных работ опубликовано 24 научных работы, в том числе в соавторстве подготовлены отдельные разделы двух монографий по скважинному подземному выщелачиванию урана, **6** статей в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, **10** свидетельств на программы для ЭВМ.

Объём и структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и содержит 113 страниц машинописного текста, включая 44 рисунка, 18 таблиц, список использованной литературы из 83 наименований и 6 приложений.

В первой главе описан объект исследований — гидрогенные палеодолинные месторождения урана ХРП, их геологическое строение, литология, гидрогеологические и геокриологические условия, морфология и рудоносность залежей. Дан краткий обзор современного представления о происхождении месторождений ХРП. Приведено обоснование необходимости применения прямого определения урана на месте залегания урановых руд методом КНД-М в условиях высокой изменчивости радиологических свойств рудоносных отложений. Приведены результаты применения метода КНД-М на стадии вскрытия рудных залежей технологическими скважинами, доказывающие повышение достоверности оценки промышленных запасов.

Во второй главе результатами натурных испытаний продемонстрировано, что при контрастном распределении урана применение нерегулярных сетей вскрытия рудных залежей повышает эффективность СПВ. Обоснована возможность реконструкции исходных содержаний урана по данным гамма-каротажа на стадии отработки СПВ с учётом нарушенного радиоактивного равновесия. Показано, что совместное использование ГК и КНД-М позволяет выделять зоны выщелачивания, переотложения и остаточной минерализации, а также количественно оценивать степень извлечения урана. Это позволяет рационально вести процесс извлечения урана из недр методом СПВ.

Третья глава посвящена повышению полноты освоения недр при СПВ методом локализации целиков не отработанных сернокислыми растворами урановых руд на основе ГТММ в комплексе с ГК и КНД-М. КНД-М позволяет заверить результаты ГТММ и оценить остаточные концентрации урана в целиках. Предложенная технология минимизирует объёмы бурения контрольных скважин и обеспечивает полноту отработки недр. В этом заключается рациональное освоение недр.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность своему научному руководителю д-ру геол.-минерал. наук И. Н. Солодову за постоянное руководство, поддержку и обсуждение полученных результатов, главному геофизику АО «Русбурмаш» А. Р. Миносьянцу за поддержку и консультации в ходе подготовки работы, д-ру физ.-мат. наук профессору М. Д. Носкову за поддержку, совместную работу и неоценимые консультации. Особая благодарность д-ру техн. наук Е. Н. Камневу и Т. Ю. Лебедевой за неоценимую помощь, всестороннюю поддержку и критические замечания. За практическую помощь и содержательные консультации диссертант искренне благодарен сотрудникам АО «Хиагда», АО «Русбурмаш», АО «ВНИПИпромтехнологии» и СТИ НИЯУ «МИФИ».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первое защищаемое положение

Включение в комплекс геофизических исследований скважин метода прямого определения концентраций урана на месте залегания руд обеспечивает повышение достоверности оценки промышленных запасов урана в сложных радиологических условиях месторождений Хиагдинского рудного поля.

Направления исследований по научной специальности 1.6.9 — 18, 19, 20, 23, 25, 26.

Современное представление о происхождении месторождений ХРП

Большинство исследователей относят урановые месторождения Хиагдинского рудного поля к экзогенному эпигенетическому классу палеодолинного типа грунтово-пластового окисления. Рядом специалистов этот тип гидрогенных месторождений отнесен к грунтово-инфильтрационному подклассу. С. Ф. Винокуров выделил эти месторождения в самостоятельную 5 группу — «инфильтрационно-эксфильтрационные». Согласно еще одной концепции, месторождения ХРП образованы в неподвижном восстановительном геохимическом барьере под воздействием восходящих из гранитного фундамента углекислых подземных вод, содержащих эпигенетические восстановители урана. Несмотря на ее дискуссионный характер, данная генетическая модель наиболее полно объясняет изменчивость радиологических свойств урановых руд на характеризуемом объекте.

Месторождение Вершинное — характерный представитель объекта исследования (рис. 1)

Геологическое строение. В геологическом разрезе месторождения снизу вверх залегают позднепалеозойские граниты витимканского комплекса ($PZ_{2-3} \vee$); непосредственно на глинистой коре выветривания гранитов располагаются миоценовые делювиально-пролювиальные и аллювиальные рудоносные отложения нижней джилиндинской подсвиты ($N_1^{2-3}dz_1$), которые выше сменяются озерно-болотными тонкозернистыми отложениями с углефицированной органикой, пластами и линзами вулканитов основного состава верхней джилиндинской подсвиты ($N_1^{2-3}dz_2$), перекрытыми несплошным покровом пироксен-оливиновых базальтов (N_2hg-Q_4).

Рудовмещающие нелитифицированные осадочные отложения нижней джилиндинской подсвиты на месторождении Вершинное характеризуются большим разнообразием литологического состава. Во всем многообразии литолого-фациального состава осадков нижней джилиндинской свиты наблюдаются определенные закономерности. Верховье палеодолины В1 и ее прибортовые части в значительной степени выполнены пролювиально-делювиальными отложениями. В средней части палеодолины преобладают аллювиальные осадки, а в нижней — аллювиальные и озерные отложения. Мощность терригенных отложений изменяется от первых метров до 55 м и закономерно увеличивается от бортов к центру и вниз от верховья к низовью палеодолины.

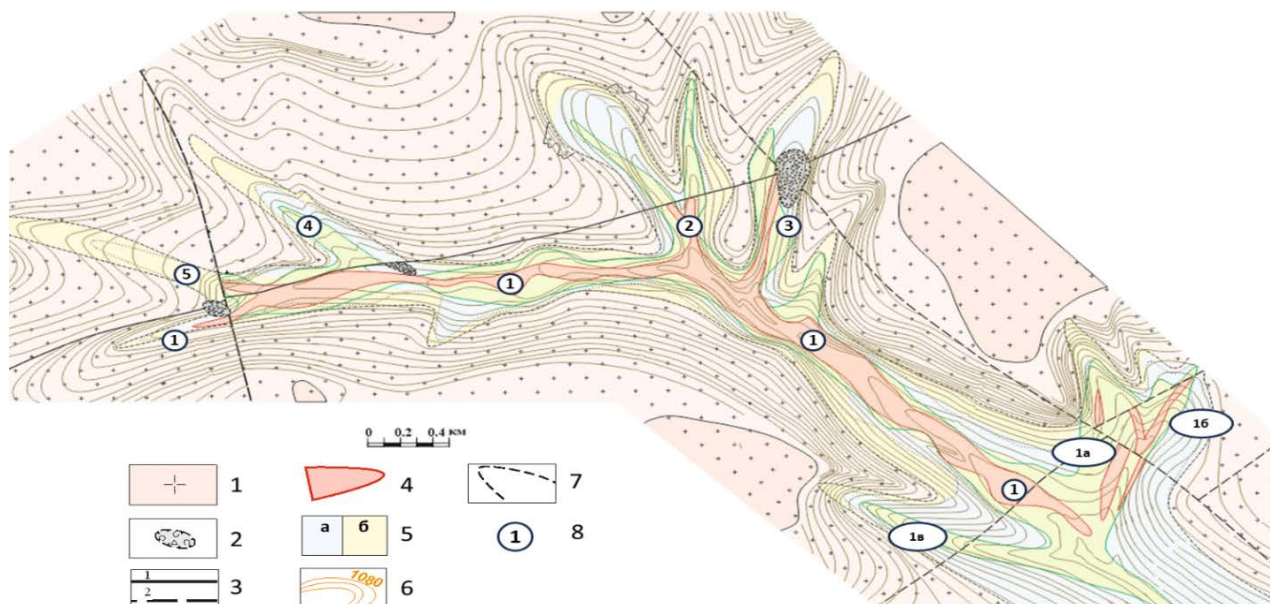


Рисунок 1. Геолого-структурная карта месторождения Вершинное:

1 — позднепалеозойские гранитоиды витимканского комплекса; 2 — вулканический аппарат центрального типа; 3 — тектонические разрывные нарушения: 1) установленные, 2) предполагаемые; 4 — урановая рудная залежь (сероцветные отложения); 5 — геохимические типы осадочных пород: а — осветленные (восстановленные), б — желтоцветные (окисленные); 7 — контур палеодолины; 8 — номер рудоносной палеодолины и рудной залежи

Морфология и рудоносность урановых рудных залежей. Рудные залежи в плане имеют ленточную форму, повторяя контуры палеодолины. В поперечном разрезе рудоносного горизонта преобладает линзовидная морфология рудных тел.

Урановые руды в целом бедные. Среднее содержание U в них по месторождению Вершинное — 0,037 %. Рудонасыщенность по латерали залежи В1 изменяется в широком диапазоне: удельная линейная продуктивность в рудных сечениях разведочных скважин имеет разброс от 3,5 до 21,7 м%, а средних содержаний U от 0,016 до 0,11%. Максимальные концентрации U в рудах приурочены к тальвеговой части палеоврагов и зонам повышенной тектонической нарушенности гранитного фундамента. Это согласуется с концепцией происхождения месторождений витимского типа, согласно которой накопление U происходило и происходит на неподвижном восстановительном геохимическом барьере.

Гидрогеологические и геокриологические условия. В гидрогеологическом разрезе сверху вниз выделяются четыре водоносных горизонта, разделенных относительными водоупорами: надмерзлотный сезонный, базальтовый, нижнеджилдинский рудоносный и горизонт зон трещиноватости и разломов фундамента.

Геокриологические условия. Многолетнемерзлые породы (ММП) распространены на глубину 40–90 м. Мерзлота льдистая. В зону ММП в основном вовлечены базальты, а также вулканогенно-осадочные образования и аллювиальные рудоносные отложения в верховьях палеодолины В1.

Результаты изучения изменчивости радиологических свойств урановых руд. Традиционно подсчет запасов урана по результатам разведки гидрогенных месторождений урана ведется на основе косвенного метода определения содержания урана по их гамма-активности. Для этого применяется гамма-каротаж скважин. Гамма-каротажем определяется активность радия, а не урана. Для определения содержания урана в рудах рассчитывают коэффициент Ra/U радиоактивного равновесия — K_{pp} . На погрешность определения K_{pp} в молодых рудах месторождений ХРП влияет большое число факторов.

Современное накопление урана в неподвижном восстановительном геохимическом барьере доказано гидрогеохимическими исследованиями на месторождении Вершинное. Широкий диапазон U-Pb датирования (1,5–24,4 млн лет), по данным В. А. Голубева с коллегами, объясняется постоянным привносом в рудную зону современного урана и подвижностью ^{234}U в слабокислых углекислых подземных водах, распространенных на всех месторождениях ХРП.

На определение содержания урана *in situ* методом ГК также влияет состояние радиоактивного равновесия в системе Rn-Ra, которое в замкнутой системе устанавливается за 20–30 суток. Это равновесие в водопроницаемых слоях рудоносного горизонта нарушается в результате отжатия радона фильтратом бурового раствора (поправка на отжатие Rn — Π_{Rn}), а также за счет привноса нерудного радона из зон тектонической нарушенности гранитного фундамента. При отсутствии внешнего влияния $\Pi_{Rn} = 1.1$.

Режимными ГК-исследованиями на стадии вскрытия эксплуатационного блока В1.3 технологическими скважинами установлены типичные случаи отсутствия и присутствия нерудного радона (рис. 2).

Поступление нерудного радона из гранитного фундамента в рудоносный горизонт аллювиальных отложений носит локальный характер. Как видно на рис. 2, в зоне трещиноватости гранитов из-за поступления нерудного радона радиоактивное Ra-Rn-равновесие не установилось даже на 54 день.

Обобщение результатов гидрогеохимических исследований в ходе разведки урановых месторождений ХРП показало, что на всех рудных объектах в рудоносных водоносных горизонтах распространены углекислые гидрокарбонатно-магниево-подземные воды, практически бессульфатные и бескарбонатные с небольшим содержанием хлора — 1,3–14,2 мг/дм³.

Поведение U и Ra в гидрогеохимической среде сильно различается. На растворимость U влияют pH и Eh подземных вод, тогда как растворимость Ra не зависит от Eh, но зависит от pH и анионного состава подземных вод. Миграционная способность Ra в подземных водах резко снижается в присутствии SO_4 и CO_3 из-за низкой растворимости его солей: произведение растворимости $RaSO_4$ — $4,3 \cdot 10^{-11}$, а $RaCO_3$ — еще ниже. При этом $RaCl_2$ хорошо растворим в воде — 24,52 г/100 мл. Из этого следует, что при низком содержании Cl в подземных водах на месторождении Вершинное возможна слабая миграция Ra.

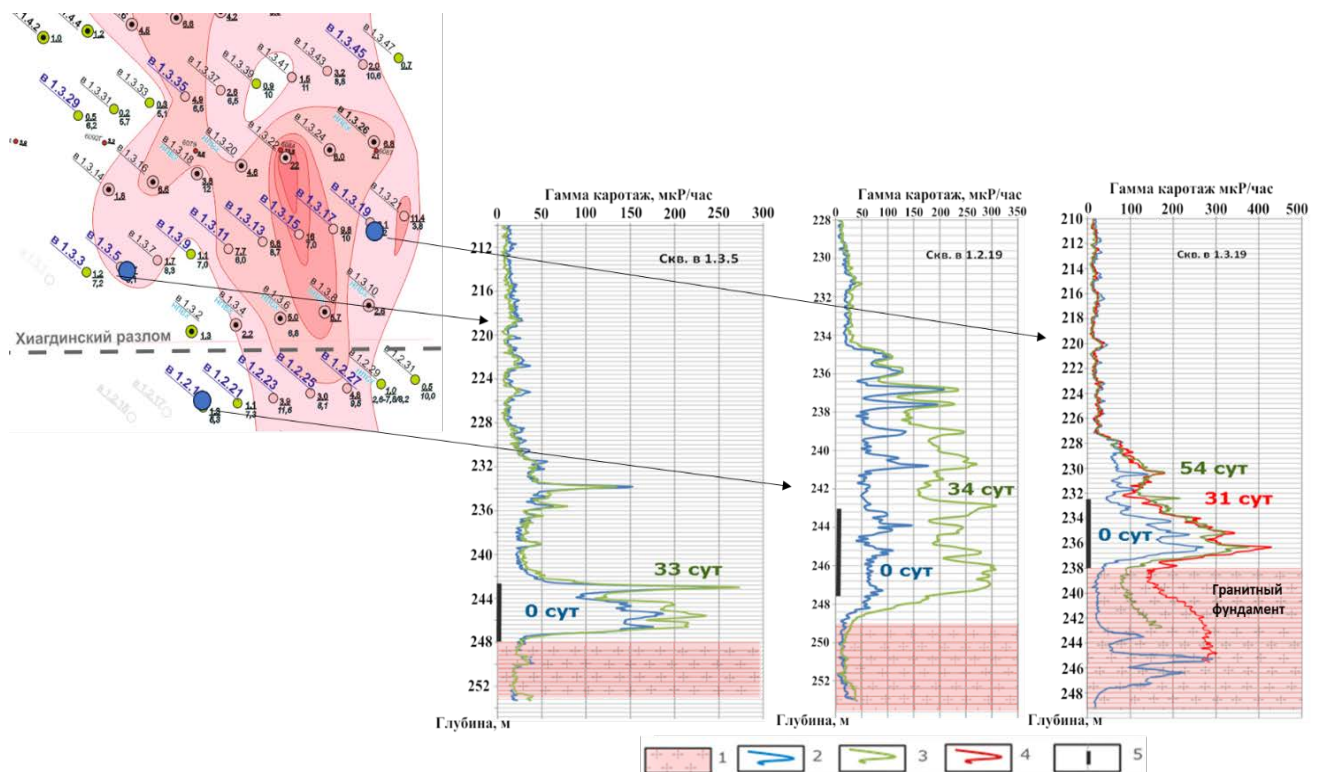


Рисунок 2. Примеры отсутствия и присутствия влияния нерудного радона на результаты режимных гамма-каротажных исследований в скважинах.

Расположение скважин показано на фрагменте карты удельной площадной продуктивности в кг U/m^2

1 — породы кристаллического фундамента; 2 — первичный гамма-каротаж; 3 — повторный гамма-каротаж через 54 дня; 4 — повторный гамма-каротаж после освоения скважины и выстойки в течение 31 сут.; 5 — фильтр технологической скважины

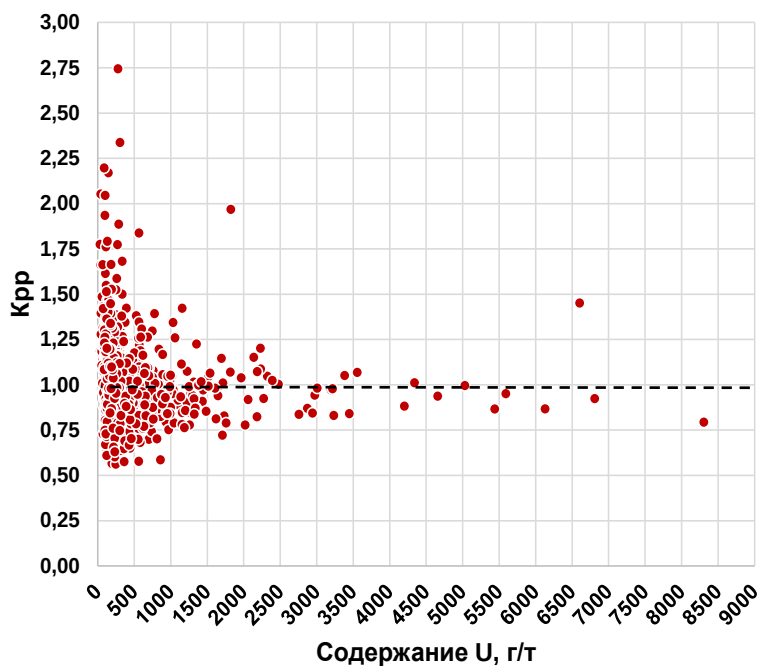


Рисунок 3. Изменчивость K_{RR} в зависимости от содержания урана в рудах месторождения Вершинное

Перечисленные факторы влияют на изменчивость K_{RR} в рудах (рис. 3). Встречаемость значений K_{RR} , близкая к $U-Ra$ -равновесию, в диапазоне значений 0,95–1,05 составляет 18,3 % (176 проб). Смещение равновесия в сторону урана при $K_{RR} < 0,95$ составляет 41,7 % (402 пробы), а в сторону Ra $K_{RR} > 1,05$ — 40,0 % (385 проб). Перераспределение Ra (максимальный K_{RR} 2,75) преобладает над перераспределением U

(минимальный K_{PP} 0,56). Богатые ураном руды близки к U-Ra-равновесию, а в бедных рудах K_{PP} смещен в большей степени в сторону Ra и в меньшей — в сторону U. Другой пример (рис. 4) иллюстрирует изменение K_{PP} по глубине рудоносных отложений.

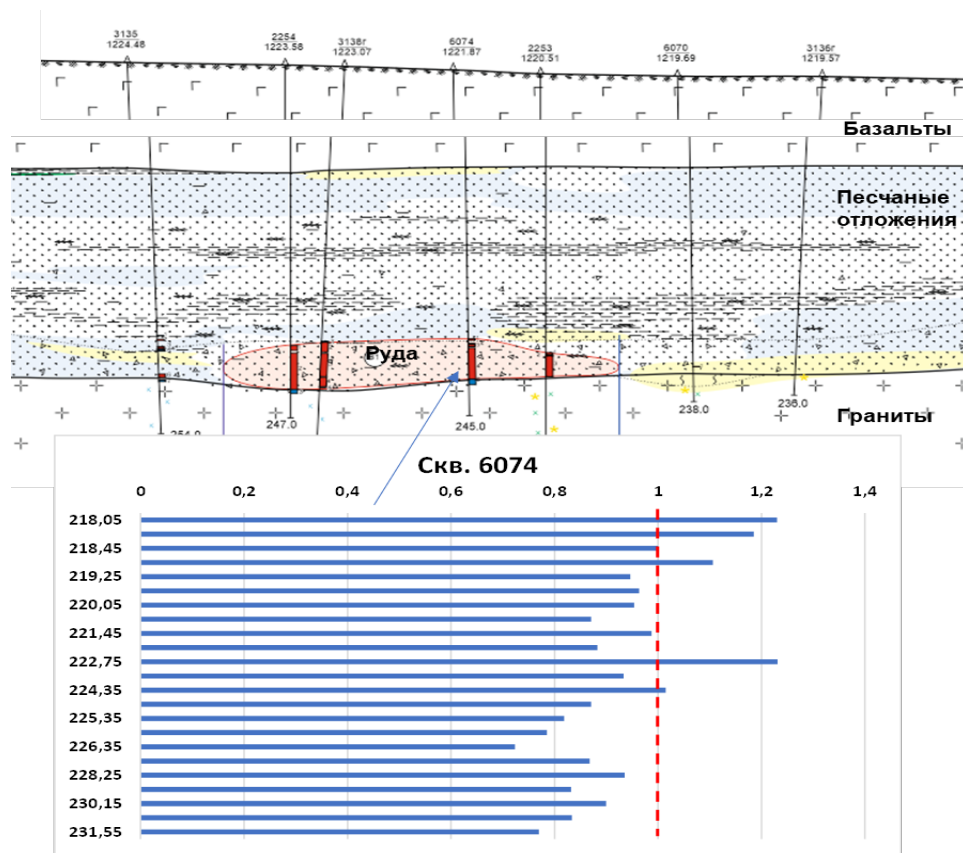


Рисунок 4. Изменение K_{PP} по глубине рудного сечения в скважине вблизи зоны Хиагдинского разлома. Ураноносные отложения расположены в базальном слое рудоносного горизонта

При разведке урановых месторождений ХРП с расстояниями между разведочными линиями 175–400 м и использовании значений $K_{PP} = 1$ и $P_{Rn} = 1,1$ для подсчета запасов по категориям С1 и С2 погрешности, связанные с перечисленными факторами, приемлемы. Но при вскрытии залежей технологическими скважинами с расстоянием между рядами скважин преимущественно около 40 м и переводе запасов в промышленную категорию эти погрешности становятся существенными: они отражаются на результатах геотехнологического учета отработки залежей СПВ и вносят ошибку в оценку ключевого параметра — степени извлечения урана из недр.

С целью решения названной проблемы ведущими специалистами ФГУ НПП «Геологоразведка», ФГУП «ВНИИА» им. Н. Л. Духова, ФГУП ГНЦ РФ «ВНИИгеосистем», ООО «НПФ УГФ» и АО «Русбурмаш» разработан и внедрен в АО «Хиагда» АМК КНД-М в модификации АИНК-49. КНД-М является основным способом прямого определения урана в рудах как в России, так и за рубежом. Он рекомендован к использованию «Методическими рекомендациями по геофизическому опробованию при подсчете запасов месторождений металлов и нерудного сырья», утвержденными распоряжением Министерства природных ресурсов РФ от 05.06.2007 г. № 37.

В основе КНД-М лежит свойство изотопа ^{235}U интенсивно делиться в поле тепловых нейтронов. Тепловые нейтроны возникают в результате замедления быстрых нейтронов до тепловых энергий, испускаемых импульсным генератором. Количественное определение массовой доли урана осуществляют регистрацией потока мгновенных нейтронов, плотность которого в скважинах зависит не только от массовой доли урана, но и от влажности руд. Для учета влажности в новой модификации аппаратуры используют канал импульсного нейтрон-нейтронного каротажа тепловых нейтронов (ИННК). Это позволяет при интерпретации данных КНД-М вносить поправки, учитывающие влияние влажности при расчете попластовых значений пересчетного коэффициента для КНД-М.

АМК КНД-М прошел метрологическую аттестацию во ФГУП «ВНИИМ» им. Д. И. Менделеева, аттестован как средство измерения плотности потока надтепловых нейтронов и утвержден в качестве типового средства измерений с внесением в Государственный реестр средств измерений РФ. Методика измерений включает в себя выполнение измерений аппаратурой АИНК-49, проведение калибровочных работ и процедуру интерпретации подсчетных параметров рудных интервалов. По результатам калибровочных работ по определению градуировочной постоянной A комплектов АИНК-49 на контрольно-поверочных скважинах (КПС) установлено, что значение 95-процентной доверительной погрешности определения градуировочной постоянной не превышало 3 %.

Для оценки степени достоверности определения подсчетных параметров рудных сечений регулярно приводится сравнение результатов измерений КНД-М с результатами геологического опробования (КПС), пробуренных с керном. Для оценки качества измерений используются как результаты каротажей на КПС, так и результаты контрольных каротажей на рядовых скважинах.

За период с 2017 по 2024 год выполнено 269 каротажей на разных стадиях освоения СПВ месторождений Хиагдинское, Вершинное, Источное, Количиканское и Дыбынское. В том числе 183 каротажа реализовано на стадии вскрытия урановых рудных залежей технологическими скважинами.

КНД-М проведен при вскрытии запасов технологическими скважинами в верховье, в центральной части и низовье палеорусловых проницаемых отложений, вмещающих рудную залежь В1 месторождения Вершинное. Пример приведен на **рис. 5**. В результате определены систематически значимые средневзвешенные значения: Комплексная поправка (P_K) — 1,32, K_{PP} — 0,94, P_{Rn} — 1,236. Как видно, они заметно отличаются от $K_{PP} = 1,0$ и $P_{Rn} = 1,10$, принятых для интерпретации ГК по результатам разведочных работ, и не позволяют получить достоверные параметры для подсчета промышленных запасов.

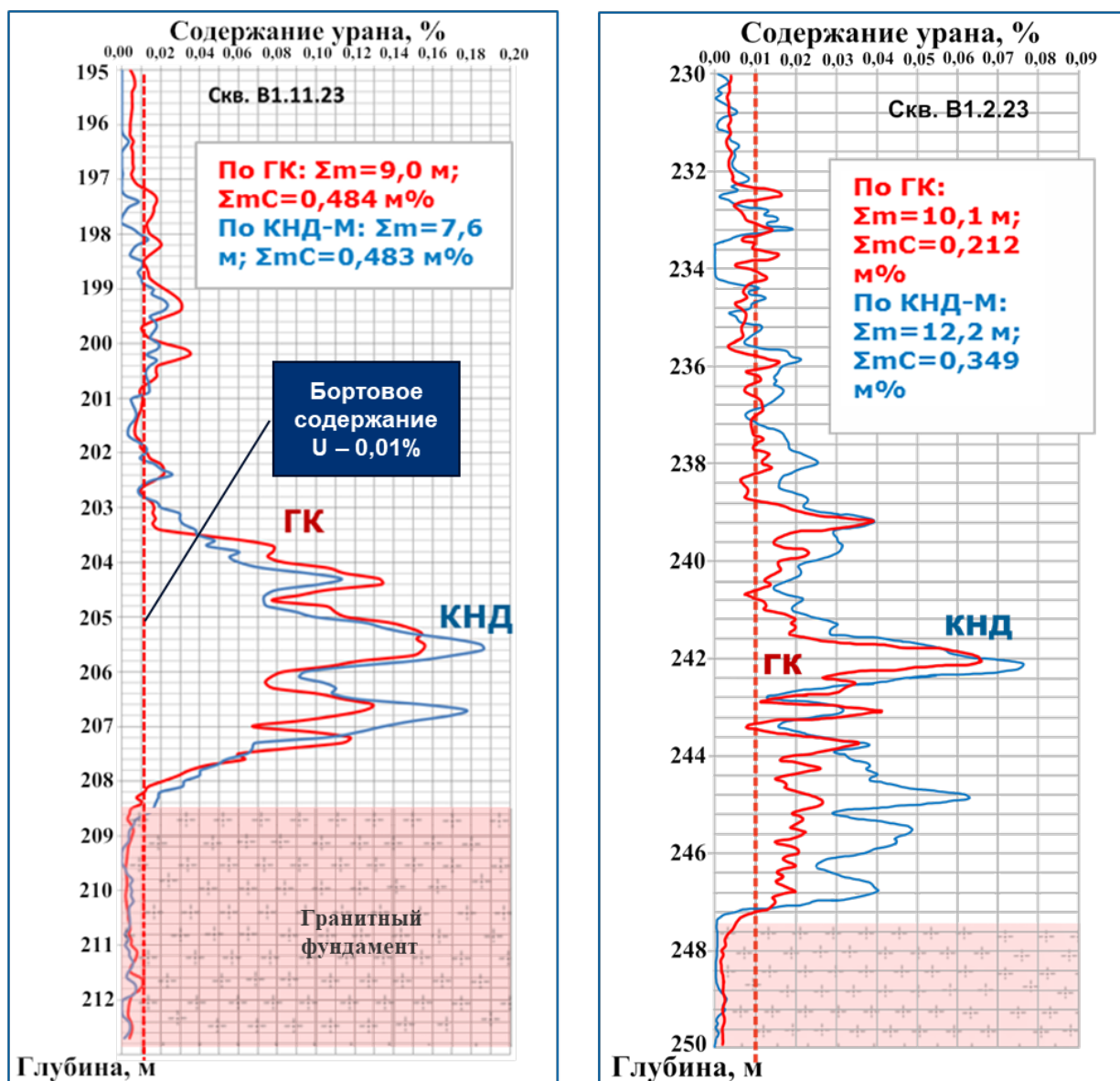


Рисунок 5. Сопоставление диаграмм распределения содержаний урана по глубине скважин по данным ГК и КНД-М. Расположение скважин в палеодолине В1: скв. В1.11.23 — центральная часть; скв. В1.2.23 — низовье

Второе защищаемое положение

Способ количественной оценки степени извлечения урана из рудных залежей на основной стадии скважинного подземного выщелачивания, основанный на реконструкции исходных концентраций урана по данным гамма-каротажа и определении текущих концентраций урана по данным каротажа мгновенных нейтронов деления, позволяет оперативно применять методы интенсификации добычи и рационально вести процесс извлечения урана.

Направление исследований по научной специальности 1.6.9 — 26.

На основной стадии СПВ урана наиболее информативным методом контроля СПВ в недрах является КНД-М. Гамма-каротаж на этой стадии неприменим, т.к. Ра сохраняется на месте залегания выщелачиваемых сернокислыми растворами урановых руд. Бурение скважин с керном и определение остаточного содержания урана в керне также малоприменимо. Рудные песчано-гравийные пески в результате воздействия серной кислоты

приобретают плавунные свойства и трудно извлекаются на поверхность при керновом бурении.

Морфология и внутреннее строение урановых рудных залежей

Используемые расстояния между разведочными линиями 175–400 м не позволяют детально изучить внутреннее строение залежей. Вскрытие этих рудных объектов технологическими скважинами при расстоянии между рядами технологических скважин 40 м дают возможность детально изучить эти характеристики и исследовать распределение U в рудах по площади и в разрезе.

Примеры рудных залежей на месторождениях ХРП с однородным и контрастным распределением урана по площади показаны на **рис. 6а** и **рис. 6б** соответственно.

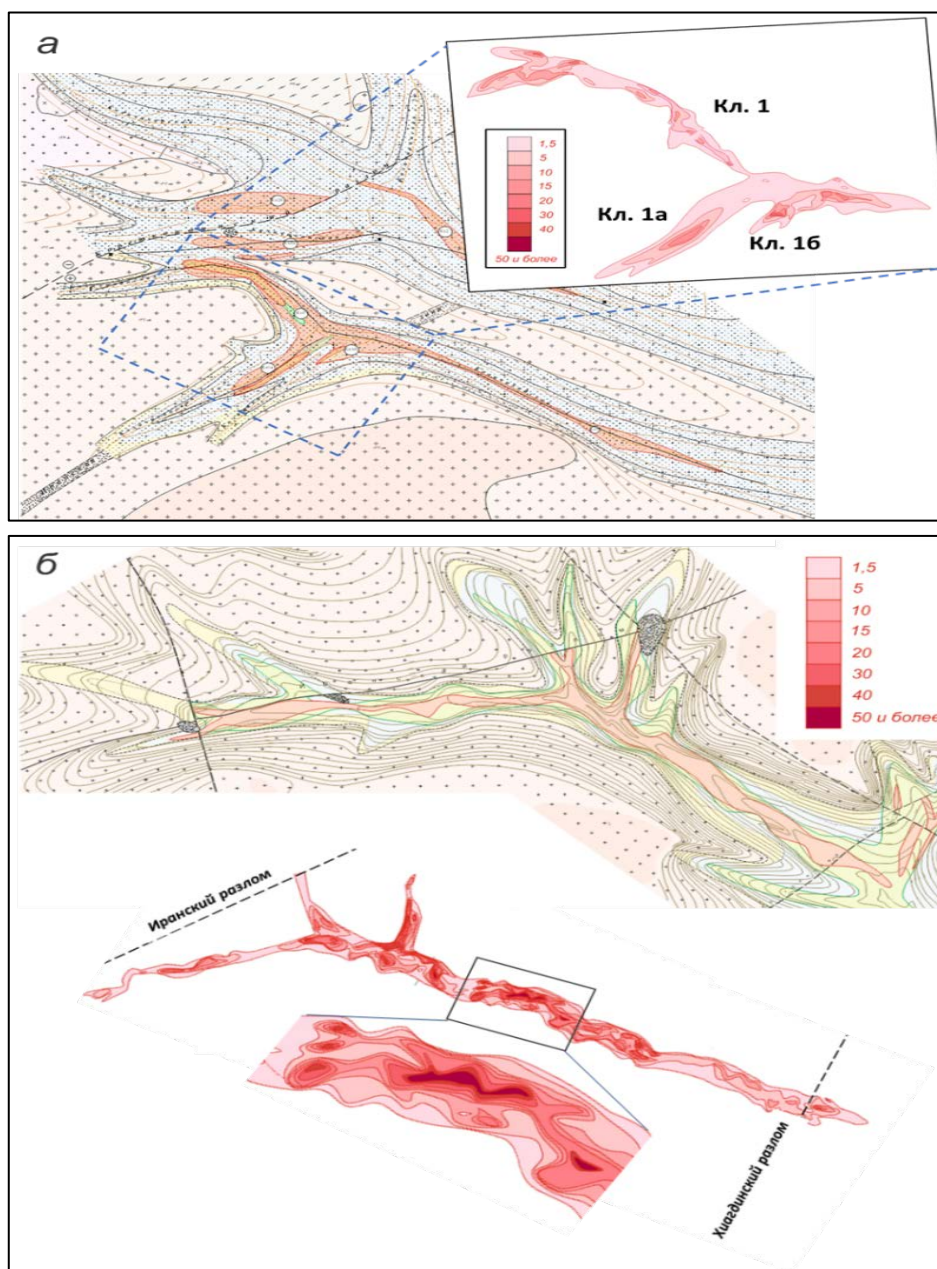


Рисунок 6. Однородное и контрастное распределение УПП (кг U/м²) на месторождениях Количиканское (а) и Вершинное (б)

При контрастном распределении наиболее богатые руды с содержанием U до 3,5 % и удельной площадной продуктивностью (УПП) 45–75 кг U/м² приурочены к тальвегам палеодолин. Строение рудных залежей, установленное преимущественно ГК-исследованиями, уточняется методом КНД-М.

В АО «Хиагда» при узкой морфологии рудных тел в основном используют рядные системы расположения технологических скважин. Применяют регулярные и предложенные автором диссертации нерегулярные, адаптивные сети расположения технологических скважин.

Результаты применения нерегулярных сетей вскрытия урановых рудных залежей технологическими скважинами

В условиях контрастного распределения урана в залежах целесообразно перейти от регулярных к нерегулярным сетям расположения технологических скважин, сгущая сеть в зоне распространения богатых руд и разряжая её в области бедных руд. Этим достигается почти одновременная отработка руд разного сорта.

Автором диссертации предложена двухэтапная технология: сначала осуществляется вскрытие рудной залежи технологическими скважинами по регулярной сети, затем — в случае выявления участков рудных залежей с УПП > 15 кг U/м² — производится сгущение сети, как на стадии вскрытия, так и на стадии отработки залежи.

Наиболее широкое применение в АО «Хиада» получили нерегулярные сети расположения технологических скважин, формируемые в ходе отработки урановых рудных залежей. Примером применения такой технологии является сгущение сети технологических скважин на блоке В1.9 в центральной части залежи В1 месторождения Вершинное, выполненного в два этапа в 2018 и 2020 году.

Эффект проявился в увеличении содержания урана в продуктивных растворах (ПР) и повышении темпа отработки руд в эксплуатационном блоке, что подтверждается графиками, представленными на (рис. 7).

Сгущение сети технологических скважин на стадии отработки применялось в АО «Хиагда» на залежах: Х3, Х5 и Х6 (месторождение Хиагдинское); В1 (Вершинное); И1 (Источное). Во всех случаях темп отработки эксплуатационных блоков после сгущения сети увеличился в 1,2–1,6 раза, а бурение дополнительных технологических скважин окупилось в первый год их эксплуатации.

Реконструкция по данным ГК исходных содержаний U в рудах

Исследованиями в жестких кислотных условиях при извлечении U из измельченной руды в пачуках на гидрометаллургических заводах доказано, что при сернокислотном выщелачивании урана из руд извлечение Ra не превышает 5 %, и их гамма-активность после выщелачивания урана остается на уровне, близком к исходным значениям.

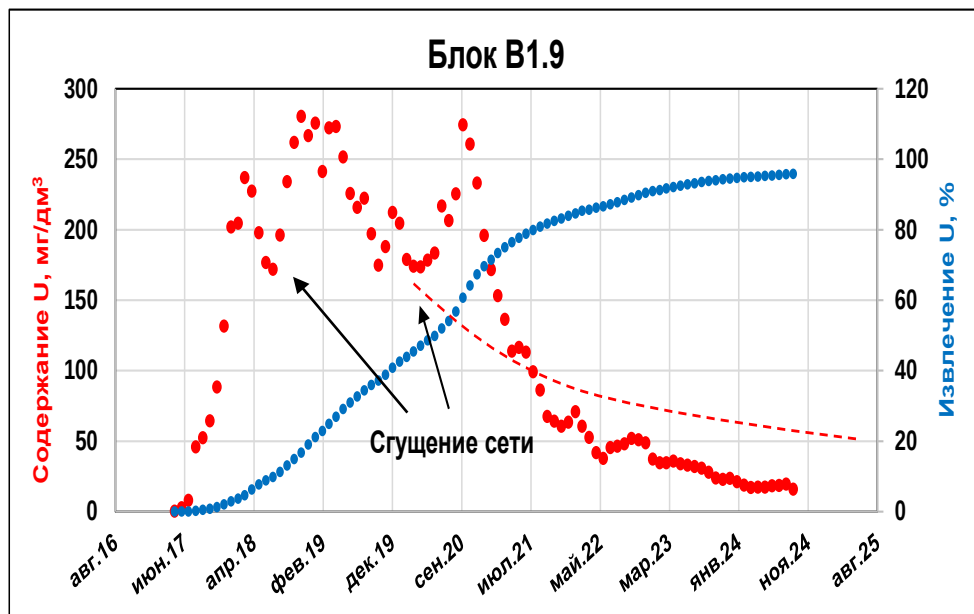


Рисунок 7. Технологический эффект от сгущения сети технологических скважин.
Красной пунктирной линией показан прогноз извлечения U без сгущения сети

Природа этого явления связана с низкой растворимостью солей сульфата Ra . Сохранение Ra в рудах, с одной стороны, не позволяет использовать ГК для контроля извлечения U из недр при СПВ, а с другой — предоставляет возможность реконструировать исходные концентрации U в рудах с погрешностью $< 5\%$.

Такой методический прием реконструирования исходных концентраций урана по ГК с использованием поправок $K_{pp} = 1$, $P_{Rn} = 1,1$, принятых для всего месторождения Вершинное по данным разведки, использован для определения степени извлечения урана из руд при сгущении сети технологических скважин на действующих блоках Х3.12 и Х3.13 залежи Х3 (рис. 8).

Сопоставление результатов реконструированных по ГК концентраций U с его содержанием по данным КНД-М в данном случае показывает, что в районе скважины 3.12.26 извлечение урана из рудоносных отложений протекало крайне слабо и наблюдалось техногенное переотложение урана в надрудной части пласта, а в области скважины 5.9.42 уран полностью извлечен из руд.

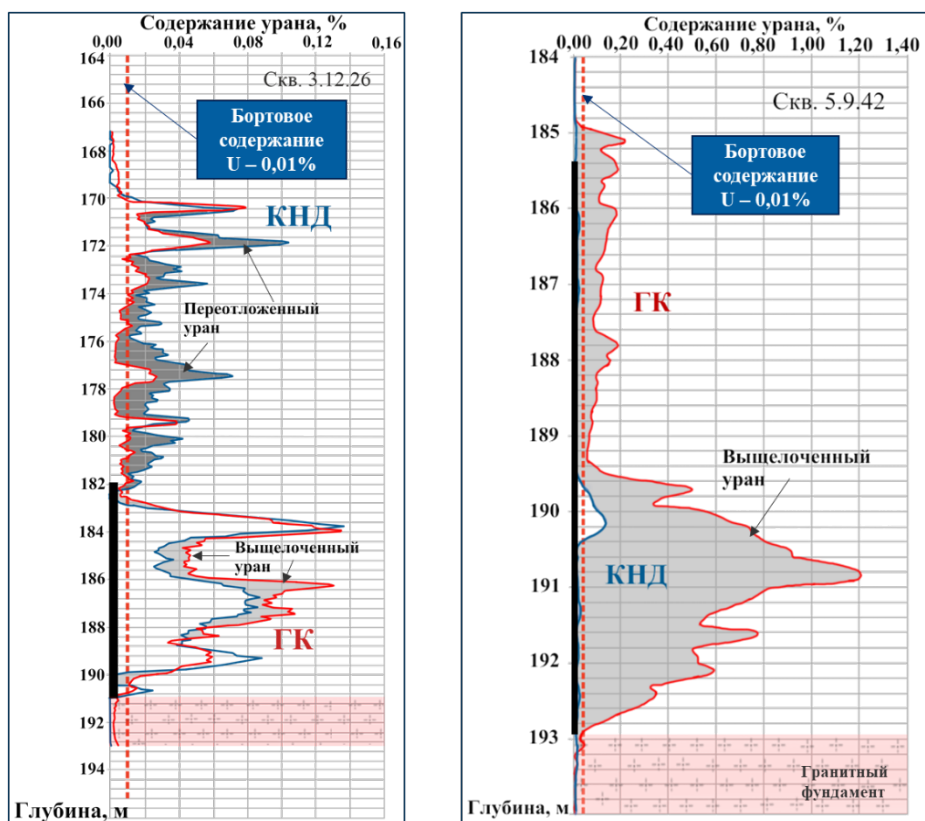


Рисунок 8. Пример выявления областей остаточного, выщелоченного и переотложенного урана, определенных по комплексному использованию ГК и КНД

Третье защищаемое положение

Методический приём выявления целиков остаточных концентраций урана и зон его техногенного переотложения на завершающей стадии скважинного подземного выщелачивания, основанный на определении концентраций урана по данным каротажа мгновенных нейтронов деления в сочетании с геотехнологическим математическим моделированием позволяет локализовать целики остаточных концентраций урана в рудах и минимизировать объёмы бурения контрольных скважин.

Направления исследований по научной специальности 1.6.9 — 18, 19, 20, 26.

Основной задачей использования КНД-М на заключительной стадии отработки урановых рудных залежей СПВ является обеспечение полноты освоения недр. Выявление целиков урановых руд в отложениях рудоносного горизонта и оценка остаточного и техногенно переотложенного урана в целиках выполняется применением комплекса методов: ГТММ, бескерновое бурение контрольных скважин, ГК и КНД-М.

Внедрение ГТММ на объектах СПВ урана

Компьютерное ГТММ широко используется для создания цифровых эпигнозных и прогнозных моделей, а также текущего состояния геотехнологической системы.

ГТММ отработки залежей месторождений ХРП проводится с помощью разработанного совместно СТИ НИЯУ МИФИ и АО «Хиагда» программного комплекса «КУРС». Программный комплекс «КУРС» является частью интегрированного геотехнологического информационно-моделирующего комплекса «ХиагДИТ», предназначенного для оптимизации и управления процессом подземного выщелачивания. Теоретическая основа программного комплекса «КУРС» базируется на усовершенствованной теории физико-химической гидродинамики, созданной С. В. Васильевым, Н. Н. Веригиным, В. С. Саркисяном, В. С. Голубевым, Г. Н. Кричевцом, М. Д. Носковым, Т. В. Разуваевой и К. Р. Светлаковой.

Модель описывает основные гидродинамические и физико-химические процессы, протекающие в рудоносном горизонте при СПВ урана, и включает в себя двух- или трёхмерные расчеты распределения давления, скорости фильтрации растворов, конвективного массопереноса и гидродинамической дисперсии, гомогенных и гетерогенных процессов при взаимодействии выщелачивающего раствора с урансодержащими минералами и вмещающей породой, растворение и осаждение минералов, гомогенные и гетерогенные кислотно-основные и окислительно-восстановительные процессы, комплексообразование.

Геотехнологические расчеты осуществляются с учетом фильтрационных, минералогических и геологических особенностей строения рудоносного горизонта, режимов работы технологических скважин и химического состава нагнетаемых растворов. Параметры модели определяются на основе сравнения данных геотехнологических опробований, опытно-промышленных испытаний, наблюдений за промышленной отработкой блоков с результатами эпигнозных расчетов. Математическая модель подземного выщелачивания выражена системой дифференциальных уравнений в частных производных. Программный комплекс «КУРС» создан с использованием метода конечных элементов для дискретизации математической модели.

Автор диссертации участвовал в разработке концепции и алгоритмов геотехнологического информационно-моделирующего комплекса «ХиагДИТ», а также внедрял его в производство, предоставлял исходные данные для разработки конкретных математических моделей эксплуатационных блоков и участвовал в анализе полученных результатов.

Локализация целиков урановых руд методом ГТММ

В научных трудах 1980-х годов в рекомендациях о выводе рудных залежей из эксплуатации и погашении запасов, отработанных до проектного уровня 80%, предлагалось бурение контрольных скважин по регулярной сети между рядами технологических скважин. Эта рекомендация сопряжена с большими капитальными затратами. ГТММ позволяет локализовать поиск целиков остаточных урановых руд. Такой подход реализован на залежи Х6 Хиагдинского месторождения.

Целики или останцы урановых руд на завершающей стадии отработки эксплуатационных блоков сернокислотным СПВ урана возникают в связи с природными и техногенными факторами. К первой группе факторов относится неоднородное распределение урана в рудах и высокая изменчивость литолого-

фильтрационных свойств, минерального состава и геохимических свойств аллювиальных отложений, как по латерали, так и по вертикали рудоносного горизонта. Вторая группа факторов — это неравномерная проработка урановых руд выщелачивающими растворами — техногенный гидродинамический фактор.

Заверка результатов ГТММ бурением контрольных скважин

Согласно геотехнологическому учету, залежь Х6 к концу 2019 года была отработана до проектного уровня: концентрация урана в ПР снизилась до 15 мг/дм³, а степень извлечения урана из руд превысила 80 % (рис. 9).

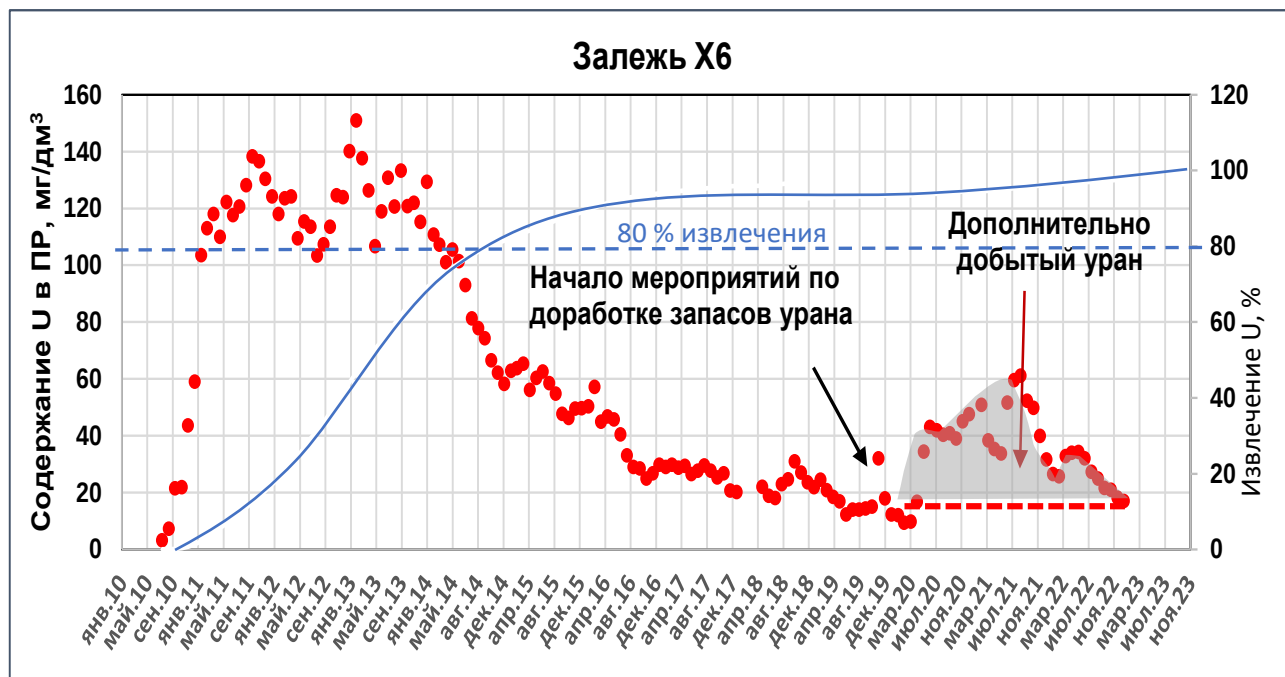


Рисунок 9. Содержание урана (●) в продуктивных растворах и степень его извлечения (-) из руд при отработке залежи Х6 Хиагдинского месторождения

С целью поиска целиков урановых руд построена геотехнологическая модель остаточной продуктивности рудоносного пласта (рис. 10).

Несмотря на достигнутые проектные показатели отработки, в верховье палеодолины Х6 выявлены целики урановых руд с продуктивностью более 5 кг U/м², превышающей бортовое значение УПП — 1,35 кг U/м².

Модели, построенные с помощью ГТММ, как и любые геологические модели, содержат ряд погрешностей, связанных с неполнотой изученности неоднородности свойств и состава геологической среды. Оценить степень отработки отдельных участков рудных залежей при завершении СПВ и верифицировать геотехнологическую модель позволяет применение комплекса методов (ГК + КНД-М) в контрольных скважинах.

С целью верификации модели в залежи Х6 пробурены три контрольные скважины: в верховье (6.2.15-К), средней части (6.1.12-К) и низовье (6.4.27-К) рудоносной палеодолины (рис. 10). Скважины пройдены с отбором керна. Содержание урана в секционных пробах определены химическим и рентгеноспектральным методами. В ходе опробования выполнялся рН-промер керна с помощью лакмусовой бумаги. Это позволило установить степень проработанности рудоносного горизонта сернокислыми растворами.

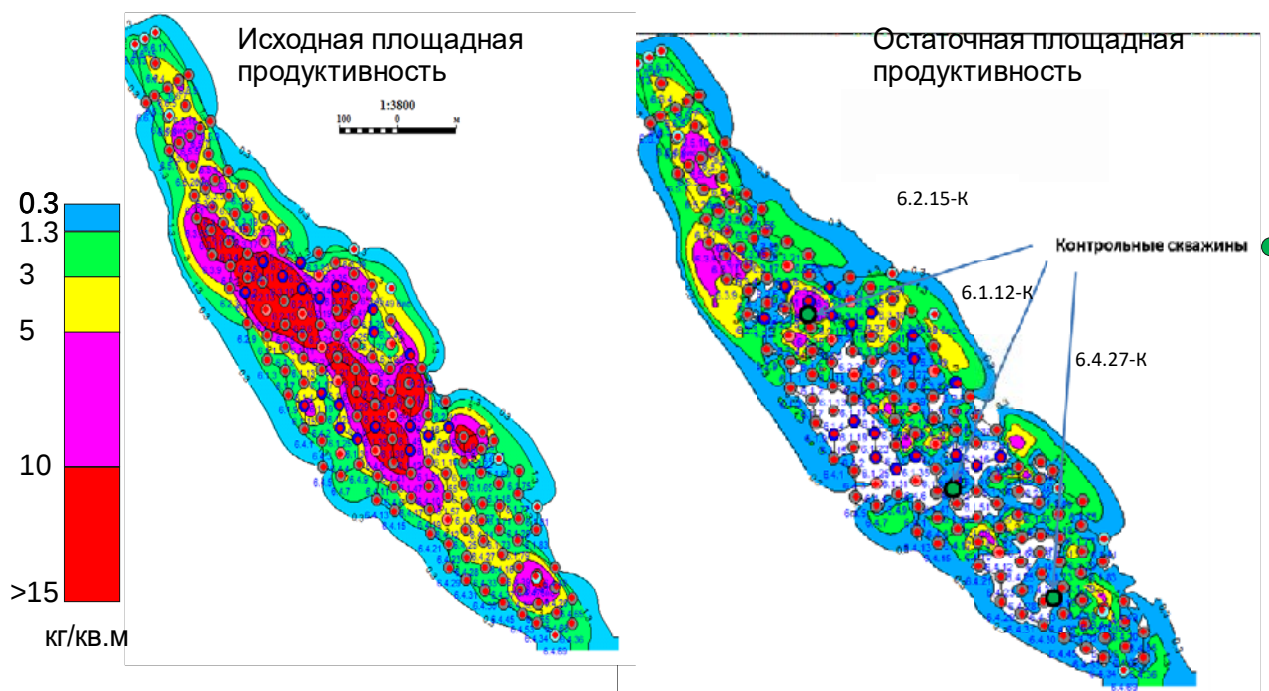


Рисунок 10. Исходная и остаточная удельная площадная продуктивность рудоносного пласта на залежи X6 месторождения Хиагдинское

В области выявленного по ГТММ целика в верховье залежи сооружена контрольная скважина 6.2.15-К. Результаты исследований в данной скважине подтвердили возможность применения геотехнологической модели. Извлечение урана из руд в целике составило 39 % и не достигло проектного уровня 80 %.

Полученные результаты позволили разработать комплекс мероприятий по отработке выявленных участков с недоизвлеченным ураном. Также были вовлечены в эксплуатацию руды путем бурения дополнительных скважин с установкой фильтров в интервале богатых и переотложенных концентраций урана. Эти мероприятия реализованы на залежи X6 и позволили дополнительно добыть 37,7 тонн урана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа выполнена в соответствии с научной специальностью 1.6.9 «Геофизика» по направлениям исследований: п. 18 «Использование геолого-геофизических данных для построения цифровых геологических, гидродинамических, геодинамических и иных моделей геологической среды и месторождений»; п. 19 «Геофизический мониторинг геологического строения и разработки месторождений геофизическими методами»; п. 20 «Интегрированный анализ многомерной, многопараметровой и разнородной информации, включающей геофизические данные»; п. 23 «Технические средства и технологии геофизического сопровождения проводки, геолого-технологических и ремонтных работ в скважинах»; п. 25 «Теория, технические средства, технологии, методы сбора и интерпретации каротажной информации, межскважинного просвечивания, геолого-технологических исследований скважин, геофизических методов исследования технического состояния скважин, вскрытия пластов в скважинах»; п. 26 «Контроль разработки месторождений полезных ископаемых по данным наземных и скважинных геофизических исследований, включая мониторинг процессов гидроразрыва пластов-коллекторов» паспорта научной специальности.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований, натурных испытаний изложены новые научно обоснованные методические, технические и технологические решения по повышению эффективности отработки урановых руд гидрогенных палеодолинных месторождений сернокислотным скважинным подземным выщелачиванием с применением инновационной скважинной аппаратуры, имеющие существенное значение для обеспечения атомной промышленности урановым сырьем.

Итоги выполненного исследования.

1. Доказано режимными ГК измерениями, что нерудный радон, поступающий из зон трещиноватости и разрывных тектонических нарушений гранитного фундамента в рудоносный горизонт аллювиальных отложений, существенно нарушает радиоактивное равновесие в Ra-Rn системе.

2. Установлено гидрогеохимическими исследованиями, что в бессульфатных и бескарбонатных с небольшим содержанием хлора подземных водах на месторождениях ХРП радий способен к слабой миграции в подземных водах. Этими же исследованиями доказано, что продолжается современное накопление урана в рудах в неподвижном восстановительном геохимическом барьере.

3. Выявлена высокая изменчивость коэффициента Ra/U радиоактивного равновесия (K_{RP}) по площади и в разрезе урановой рудной залежи В1 месторождения Вершинное: в верховье и центральной части палеодолины наблюдается незакономерное перераспределение урана и радия, а в низовье палеодолины преобладает накопление урана, что согласуется с результатами гидрогеохимических исследований. Высокая изменчивость K_{RP}

влияет на достоверность оценки и учета движения промышленных запасов урана.

4. Обосновано, что в условиях высокой изменчивости радиологических свойств урановых руд на месторождениях ХРП применение косвенного метода определения содержания урана в рудах по ГК для оценки промышленных запасов сопряжено с большими погрешностями. В связи с этим в АО «Хиагда» внедрен метод прямого определения урана *in situ* — каротаж мгновенных нейтронов деления ^{235}U (КНД-М). Метод КНД-М может применяться в качестве контрольного для верификации данных гамма-каротажа в период геологоразведочных работ, а также на этапе горно-подготовительных работ — в условиях отсутствия данных по геологическому опробованию керна.

5. Теоретически и экспериментально доказано, что ГК не применим для определения остаточных содержаний урана в рудах в сульфатной среде, т. к. соли сульфата радия образуют труднорастворимые соединения. Этот недостаток ГК становится полезной информацией, позволяющей реконструировать исходные содержания урана с использованием $K_{\text{pp}} = 1$ и поправки на отжатие радона $\Pi_{\text{Rn}} = 1,1$. Сравнение исходного содержания урана в рудах по ГК с прямыми измерениями методом КНД-М позволяет оценивать степень извлечения урана из руд на всех стадиях СПВ.

6. Натурными исследованиями подтверждено, что применение нерегулярных сетей расположения технологических скважин значительно повышает эффективность СПВ, а применение КНД-М позволяет уточнять остаточные и техногенно переотложенные содержания урана в рудах. Эта технология дает возможность практически одновременно отрабатывать СПВ бедные и богатые урановые руды.

7. Натурными исследованиями доказано, что применение на завершающей стадии отработки рудных залежей СПВ комплекса методов — ГТММ, ГК и КНД-М — предоставляет возможность локализовать поиски и выявлять целики неотработанных урановых руд, верифицировать геотехнологические модели и эффективно извлекать уран из целиков, а в целом — повышать полноту освоения недр.

8. Разработка и внедрение в АО «Хиагда» технологии сгущения сети технологических скважин на основной и заключительной стадии СПВ позволили получить достигнутый экономический эффект в размере 2176,5 млн руб. С внедрением КНД-М получен экономический эффект 300,9 млн руб. за счет исключения бурения скважин с керном, геологического опробования и химико-аналитических работ.

Рекомендации

1. Для повышения достоверности подсчёта запасов урана на стадиях эксплуатационной разведки и вскрытия рудных залежей технологическими скважинами рекомендуется для верификации оценки запасов методом традиционного гамма-каротажа применять прямое определение содержания урана в рудах методом КНД-М в объеме не менее 20 % от количества технологических скважин.

2 При контрастном распределении урана по площади рудных залежей целесообразно применять нерегулярные сети расположения технологических скважин.

3. С целью повышения эффективности ведения добычных работ на основной и завершающей стадиях СПВ рекомендуется оценивать степень извлечения урана в перебуриваемых, добуриваемых и контрольных скважинах с использованием комплекса — ГК, КНД-М и ГТММ.

4. Для повышения полноты освоения палеодолинных месторождений урана и рационального недропользования на завершающей стадии СПВ необходимо применять комплекс ГТММ, ГК и КНД-М для локализации целиков остаточных концентраций урана в рудах.

5. В технологическую документацию и регламенты предприятия следует включить обязательное применение комплекса ГК, КНД-М и ГТММ.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Полученные результаты создают предпосылки для дальнейшего развития комплекса геолого-геофизических технологий и ГТММ при отработке гидрогенных палеодолинных месторождений урана Витимского типа. Перспективы дальнейшего развития работы определяются совершенствованием программно-методического комплекса АМК КНД-М на основе накопленного опыта эксплуатации аппаратуры АИНК 49. К приоритетным направлениям относятся расширение палеточной базы для руд с повышенным содержанием условного бора и водородосодержания, использование информации о временных спектрах тепловых нейтронов в системе интерпретационных параметров, а также развитие программного обеспечения, направленное на упрощение и автоматизацию процедур обработки и контроля качества информации.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Издания, рекомендованные ВАК:

1. Солодов И. Н., Гладышев А. В., Иванов А. Г. Опыт добычи урана методом СПВ в криолитозоне // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 11. — С. 65–70.

2. Носков М. Д., Попова К. Е., Гладышев А. В. и др. Применение численного моделирования для оценки эффективности использования дополнительных скважин при добыче урана методом подземного выщелачивания // Известия вузов. Физика. — 2021. — Т. 64, № 2-2. — С. 79–82.

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

4. Солодов И. Н., Гладышев А. В., Гурулев Е. А., Суворов А. В. Влияние углекислых подземных вод на эффективность скважинного подземного выщелачивания урана из руд месторождений Хиагдинского рудного поля // Горный журнал. — 2022. — № 4. — С. 13–17.

5. **Гладышев А. В.** Аппаратура и метод прямого определения урана в рудах месторождений Хиагдинского рудного поля, отрабатываемых скважинным подземным выщелачиванием // Горный журнал. — 2023. — № 2. — С. 39–43.

6. **Гладышев А. В.**, Солодов И. Н. Оценка остаточных запасов урана в отрабатываемых скважинным подземным выщелачиванием урановых рудных залежах ядерно-геофизическими методами каротажа // Горный журнал. — 2023. — № 4. — С. 4–8.

Программы для ЭВМ:

7. Базаров Д. Н., **Гладышев А. В.**, Истомин А. Д. и др. «Контроль состояния скважин» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615957. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.05.2017.

8. **Гладышев А. В.**, Истомин А. Д., Носков М. Д. и др. «Контроль бурения» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615296. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.05.2017.

9. **Гладышев А. В.**, Истомин А. Д., Крюкова Е. А. и др. «Оценка и анализ данных о работе УДПР» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615850. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.05.2017.

10. **Гладышев А. В.**, Истомин А. Д., Крюкова Е. А. и др. Система оптимизации отработки рудных залежей АО «Хиагда» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661995. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.09.2019.

11. **Гладышев А. В.**, Истомин А. Д., Крюкова Е. А. и др. Система оперативного контроля и анализа работы добычного полигона АО «Хиагда» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661994. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.09.2019.

12. **Гладышев А. В.**, Истомин А. Д., Сакирко Г. К. и др. Система планирования горных работ АО «Хиагда» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662420. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.09.2019.

13. **Гладышев А. В.**, Истомин А. Д., Макшанинов В. В. и др. Система прогнозирования геотехнологических показателей эксплуатационных блоков АО «Хиагда» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615369. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.04.2019.

14. **Гладышев А. В.**, Гуцул М. В., Истомин А. Д. и др. Система проектирования и оптимизации вскрытия рудных залежей АО «Хиагда» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615200. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.04.2019.

15. Валитов С. Н., **Гладышев А. В.**, Гончарова Н. А. и др. Программное обеспечение для повышения экономической эффективности отработки эксплуатационных блоков АО «Хиагда» // Свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ № 2019610254. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.05.2019.

16. **Гладышев А. В.**, Гуцул М. В., Сакирко Г. К. и др. Программное обеспечение для представления информации о месторождении урана палеодолинного типа в виртуальном пространстве // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2021618447. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.03.2021.

Прочие публикации:

17. Геотехнология урана (русский опыт). // моногр. / под ред. И. Н. Солодова, Е. Н. Камнева. — Москва: КДУ: Университетская книга, 2017. — 576 с. (**Гладышев А. В.** — соавтор разд. 2.2).

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

19. Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне / Под ред. И. Н. Солодова — Москва: ZetaPrint, 2022. — 183 с. (**Гладышев А. В.** — соавтор разд. 5 и 6).

20. **Гладышев А. В.**, Кеслер А. Г., Носков М. Д. и др. Применение математического моделирования для интенсификации извлечения урана из останцов на стадии доработки блоков способом ПСВ. // Развитие урановой и редкометальной промышленности: доклады XI Междунар. науч.-практ. конф. (Алматы, 16–18 мая 2024). — С. 131–134.

21. **Гладышев А. В.**, Миносьянц А. Р. Экологические аспекты горного и перерабатывающего производства. // Экологические аспекты горного и перерабатывающего производства: доклады седьмой Междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 2022). — С. 177–182.

22. **Гладышев А. В.**, Солодов И. Н. Изменчивость коэффициента радиоактивного равновесия в урановых рудах месторождения Вершинное Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Разведка и охрана недр. — 2024. — № 1. — С. 44–53.

23. **Гладышев А. В.**, Носков М. Д., Солодов И. Н., Суворов А. К. Извлечение урана из целиков на стадии доработки технологических блоков способом скважинного подземного выщелачивания // Цветные металлы. — 2024. — № 11. — С. 55–61.

24. **Гладышев А. В.** Применение геолого-геофизических технологий для рационального освоения урановых месторождений Хиагдинского рудного поля (Витимский район) скважинным подземным выщелачиванием // Разведка и охрана недр. — 2025. — № 5. — С. 84–95.

Подписано в печать 10 июля 2026 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,75 усл. печ. л.
Тираж 80 шт.
Отпечатано в ООО "Тигра"
serg@tigra-press.ru