ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

(Seicenab)

БЕЙСЕКЕЕВ ЕРМЕК ШОРТАНБАЕВИЧ

ФАКТОРЫ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА В УСЛОВИЯХ ЗОН ПЛАСТОВОГО ОКИСЛЕНИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДЛЯ ОТРАБОТКИ РУД (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ИНКАЙ И МОИНКУМ ЧУ-САРЫСУЙСКОЙ ПРОВИНЦИИ)

1.6.9. Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

> Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук, Язиков Е.Г.

Томск

ОГЛАВЛЕНИЕ

BBI	ЕДЕНИЕ						5
1	СТЕПЕНЬ	ИЗУЧЕННОСТИ	ПРОНИЦ	АЕМОСТИ	ГОРНЫХ	ПОРОД	И
ИH,	дукционн	ОГО КАРОТАЖА В	НАУЧНЫХ	К ИССЛЕДОН	ВАНИЯХ. СС	BPEMEHH	ЭE
CO	СТОЯНИЕ ВО	ЭПРОСА			• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		11
1.	1 Проницаемо	ость горных пород к	ак условие і	проведения го	еоэлектричес	ких методов	11
1.	2 Физико-тех	нические основы ин	дукционног	о каротажа н	а месторожде	ениях,	
отр	абатываемых	способом ПСВ					15
1.	3 Научно-при	кладное развитие и	перспективн	ы ИК в услов	иях разработн	ки урановых	ζ.
мес	торождений с	пособом ПСВ					22
2 ГI	ЕОЛОГИЧЕС	КАЯ ХАРАКТЕРИС	СТИКА МЕС	СТОРОЖДЕН	НИЙ МОИНК	ХУМ И	
ИН	КАЙ ЧУ-САР	УЫСУЙСКОЙ ПРОР	винции				32
2.1	Геологическ	ая характеристика м	есторожден	ий Инкай и М	Лоинкум		32
2.2	2 Особенности	и оруденения и усло	вия рудоизв	лечения на м	есторождени	ях Инкай и	
Mo	инкум						39
2.3	в Факторы про	оницаемости на мест	горождения	к Инкай и Мо	оинкум		44
3И	СХОДНЫЕ Д	(АННЫЕ ПО МЕСТ	орождені	ИЯМ ИНКАЙ	Í И МОИНКУ	УМИ	
ME	тодология	Ч ИССЛЕДОВАНИ Я	[49
3.	1 Данные ИК	в комплексе ГИС по	о месторожд	ениям Инкай	і и Моинкум.		49
3.	2 Методологи	ия моделирования де	ижения жи	цкостей на ме	сторождения	х Инкай и	
Mo	инкум по дані	ным индукционного	каротажа				59
3.	3 Методы мод	делирования движен	ия жидкост	и на месторо	кдениях Инка	ай и Моинку	м.61
4	ФАКТОРЫ	ПРОНИЦАЕМОС	СТИ ГОР	ных пор	од и п	ІРИМЕНЕНІ	ИЕ
ИH,	дукционн	ОГО КАРОТАЖА В	УСЛОВИЯ	Х ГИДРОГЕ	ННЫХ		
УР/	АНОВЫХ МЕ	ЕСТОРОЖДЕНИЙ (C ΠΕΤΡΟΦΙ	ІЗИЧЕСКОЙ	И МОРФОЛ	ЮГИЧЕСКО)Й]
OC.	ЛОЖНЕННО	СТЬЮ					. 69
4.	1 Влияние осо	обенностей проница	емости на и	ндукционный	і́ каротаж на		
Mee	сторождениях	К Инкай и Моинкум					69
4.	2 Влияние тех	хнологических факто	оров измене	ния проницае	емости на дан	ные	
инд	укционного к	аротажа					73
4.3	3 Факторы про	оницаемости и мони	торинг двих	кения жидкос	стей в продук	тивном плас	те
на с	сновании дан	ных ИК					74

4.4 Выводы	84
5 ВЛИЯНИЕ ТИПА ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОД НА МОНИТОРИНГ ДВИЖЕНИЯ.	
РАСТВОРОВ МЕТОДОМ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА В	
ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТАХ	87
5.1 Сопоставительная оценка данных ИК в комплексе ГИС в условиях	
производственного мониторинга	87
5.2 Типологизация пород месторождений Инкай и Моинкум по данным ИК	95
5.3 Типология проницаемости месторождений Инкай и Моинкум и ее влияния на	
мониторинг методом ИК	99
5.4 Выводы	106
6 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПРОДУКТИВНОМ ПЛАСТЕ В	
УСЛОВИЯХ ОТРАБОТКИ РУДНЫХ ТЕЛ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ	
ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА	108
6.1 Моделирование движения технологического раствора на месторождениях	
пластово-инфильтрационного типа на основе численной модели проницаемости	108
6.2 Результаты моделирования движения жидкостей в процессе ПСВ на	
месторождениях Инкай и Моинкум	113
6.3 Моделирование отработки участков вторичного рудогенеза	118
6.4 Выводы	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	138
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ БЛОКА А1 МЕСТОРОЖДЕНИЯ	
ИНКАЙ	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ БЛОКА В1 МЕСТОРОЖДЕНИЯ	
МОИНКУМ	148
ПРИЛОЖЕНИЕ В. СХЕМА БЛОКА А1 МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИНКАЙ	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. СХЕМА БЛОКА В1 МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОИНКУМ	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. УКРУПНЕННЫЕ ПРОСЛОИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ОБЛАСТИ ПОВЫШЕННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ,	
СМОДЕЛИРОВАННЫЕ ПО ДАННЫМ ИК, В ЗОНЕ ОРУДЕНЕНИЯ	
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ИНКАЙ И МОИНКУМ	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ,	
СМОДЕЛИРОВАННЫЕ ПО ДАННЫМ ИК, В ЗОНЕ ОРУДЕНЕНИЯ	
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ИНКАЙ И МОИНКУМ	155
ПРИЛОЖЕНИЕ И. КЕРНОВЫЕ ПРОБЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИНКАЙ	156

ПРИЛОЖЕНИЕ К.	KEPH	ЮВЫЕ ПРОБЫ	месторождения	МОИНКУМ		156
ПРИЛОЖЕНИЕ	Л.	корреляции	КАРОТАЖНЫХ	ДИАГРАММ	ПО	
ПРОВЕДЕННОМУ	ГИС І	НА ТЕХНОЛОГИ	ИЧЕСКОМ БЛОКЕ В1	(СКВАЖИНЫ У	1, У2,	
УЗ, У4) МЕСТОРО	жден	ИЯ МОИНКУМ.			1	158

введение

Актуальность. Республика Казахстан является мировым лидером по добыче урана, располагая вторым по величине объемом разведанных запасов, оцениваемых в 700 тысяч тонн. Абсолютное большинство месторождений, расположенных в республике, относятся к пластовоинфильтрационному типу, отработка которого стала возможной сравнительно недавно – с внедрением подземного скважинного выщелачивания (ПСВ).

Данный способ освоения урановорудных запасов имеет ряд неоспоримых преимуществ, включая низкую себестоимость и экологическую безопасность. Но подземное скважинное выщелачивание предполагает оценку исходных геологических параметров, мониторинг растекания технологических растворов в рудовмещающей толще и изменения породы на достаточно больших глубинах в условиях непрерывности технологического процесса. Кроме того, процесс вскрытия рудного тела и извлечения урана при подземном скважинном выщелачивании усложняет получение керна, которое, как правило, возможно произвести только на наблюдательных скважинах. Неверная оценка динамики и масштабов растекания технологических растворов чревата снижением коэффициента извлечения руды, и, как следствие, общей рентабельности производства.

Применение геоэлектрических методов исследования скважин в условиях подземного скважинного выщелачивания, является наиболее полным источником информации для мониторинга движения жидкости в продуктивной толщи и изменения породы в околорудном пространстве. В числе данных методов особенно эффективен метод индукционного каротажного зондирования. Данный метод, основанный на получении информации об электропроводности породы, имеет ряд неоспоримых преимуществ, и в первую очередь это возможность мониторинга изменения фильтрационных свойств, что позволяет проводить селективную исследовательскую и оптимизационную работу. В силу прямой корреляции между проницаемостью и электропроводностью пород в условиях ПСВ, индукционный каротаж лишен большинства ограничений и недостатков, присущих другим методам геофизических исследований. Кроме того, аппаратура индукционного каротажа может быть, с незначительными затратами на модификацию, использована в условиях морфолитологической осложненности, то есть подстроена под конкретный текстурно-структурный тип месторождения.

Тем не менее, несмотря на неоспоримые преимущества, на современном этапе индукционный каротаж не используется как стандартный метод мониторинга движения жидкости в продуктивном пласте при отработке урановых руд. Таким образом, вопрос

совершенствования мониторинга и моделирования движения жидкостей на основании изменения факторов проницаемости пород в процессе извлечения руды является основополагающим и крайне актуальным условием дальнейшего развития отрасли, что определило выбор темы исследования и ее актуальность.

Степень разработанности темы. На слабое использование индукционного каротажа оказывает влияние и систематическая нехватка научно-прикладных исследований данного вопроса несмотря на то, что небольшое количество работ, посвященных перспективам применения индукционного зондирования, все же имеются. В частности, вопросы, посвященные исследованию методом индукционного каротажа факторов проницаемости в условиях отработки на пластово-инфильтрационных месторождениях, рассматривались урановых руд В исследованиях Швецова М.С. (1958), Антонова Ю.Н. (2015), Ратникова И.Б. (2016), Мендыгалиева А.А., Селезневой В.Ю., Язикова Е.Г., Бекботаевой А.А. (2020) и др. Возможности применения электрофациальной диагностики для изучения факторов проницаемости: фильтрации, пористости и типа пористости исследованы в трудах Кудрявцева Ю.И. (1960), Даева Д.С. (1969), Антонова Ю.Н. (1971-1979), Бастрикова С.Н. (2010), Ягофарова А.К. (2013), Ратушняка А.Н. (2017), Неволина А.П. (2019), Ратникова И.Б. (2019), Легавко Д. А. (2020) и др.

Вопросы применения индукционного каротажа в условиях гидрологической и литологической осложенности рассматривались в работах Теплухина В.К. (2016), Эпова М.И. (2016), Ратушняка А.Н. (2017), Миронцова Н.Л. (2017), Мендыгалиева А.А. (2020) и др. Проблемы моделирования геологической среды и динамических процессов в условиях ПСВ по данным индукционного каротажа, в том числе в комплексе геофизических методов, освещаются в трудах Аузина А. А. (2010), Канцеля А.А. (2010), Мосина А.П., Могилатова В.С. (2015), Антонова Ю.Н. (2015), Муравиной О. М., Оракбаева Е.Ж. (2019), Никитенко М. И. (2021) и др.

Отдельные вопросы мониторинга проницаемости в процессе извлечения руды рассмотрены в трудах Коскова В.Н. (2007), Шемелиной О.В. (2010), Алибаевой К.А. (2013), Темирхановой Р.Г. (2017), Сыхимбай Ж. (2020), Вильмиса А.Л. (2021) и др.

В то же время, вопрос совершенствования мониторинга и моделирования движения жидкостей на основании изменения факторов проницаемости пород в процессе извлечения руды является основополагающим и крайне актуальным условием дальнейшего развития отрасли, что определило выбор темы исследования и ее актуальность.

Объектом исследования выступают месторождения Инкай и Моинкум, приуроченные к зонам пластового окисления Чу-Сарысуйской урановорудной провинции Казахстана, а предметом исследования - данные обследования скважинного пространства по результатам индукционного каротажа. Целью работы является выявление факторов проницаемости горных пород и применение индукционного каротажа в условиях зон пластового окисления урановых месторождений для отработки руд на примере месторождений Инкай и Моинкум Чу-Сарысуйской урановорудной провинции.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие задачи: 1) дать оценку факторов проницаемости горных пород на месторождениях пластовоинфильтрационного типа и определить их влияние на постановку индукционного каротажа в условиях отработки урановых руд; 2) проанализировать, опираясь на данные индукционного каротажа, зависимость факторов проницаемости горных пород и электропроводности руд, отрабатываемых методом ПСВ на месторождениях зон пластового окисления с петрофизической и морфологической осложненностью; 3) выявить текстурно-структурные типы и их влияние на мониторинг движения растворов методом индукционного каротажа в продуктивных пластах; 4) осуществить моделирование оптимальных параметров режима выщелачивания в условиях отработки рудных тел на основании зависимости данных индукционного каротажа от типа проницаемости пород.

Фактический материал и методы исследования. Основу диссертационной работы составляет фактический материал, собранный, подготовленный И обработанный непосредственно автором и при его участии в ходе комплексных геофизических исследований в период с 2017 по настоящее время. Работы выполнялись при организационной и информационной поддержке компании АО «Волковгеология» при сотрудничестве с персоналом компании АО «НАК «Казатомпром». В ходе исследования было изучено в целом 38 скважин технологического блока Х месторождения Инкай и технологического блока У месторождения Моинкум, общий километраж которых составил порядка 11 400 метров. Всего по месторождению Моинкум было проанализировано 19 скважин с общей протяженностью скважинного пространства в 6 270 м. По месторождению Инкай проанализировано 19 скважин с общей протяженностью скважинного пространства в 5130 м. В качестве объектов моделирования в дальнейшем были отобраны 4 скважины по месторождению Инкай и 4 скважины по месторождению Моинкум, что составило порядка 3 200 метров обследованного скважинного пространства. Скважины для моделирования были отобраны по принципу максимальной полноты и репрезентативности данных, а также исходя из расположения скважин на достаточном отдалении на территории участков, что позволило выявить общие закономерности распределения факторов проницаемости, характерные для исследуемых участков. По месторождению Моинкум протяженность пространства скважин, охваченного моделированием, составила 1760 метров, по месторождению Инкай – 1440 м. Объекты моделирования охватывают треть всего проанализированного скважинного пространства.

Методология исследования включает комплекс геофизических, физико-математических, математико-статистических методов получения, анализа, интерпретации и моделирования данных по геологическому разрезу. Геофизические методы включают: индукционное каротажное зондирование, каротаж сопротивлений, каротаж прямой собственной поляризации, термометрию, кавернометрию, токовый каротаж, гамма-каротаж. Анализ геофизических данных произведен с использованием пометодной интерпретации, корреляции каротажных данных. Математико-статистические методы включают анализ ANOVA, корреляционный, регрессионный квадратов). анализ (методом наименьших Физико-математическое моделирование произведено с использованием многокомпонентной модели, включающей решение системы уравнений гидромеханики и гидродинамики.

Инструментальное обеспечение обработки данных составили программные среды Excel, Matcad, Statistica, SPSS, Curve Editor, LibreCad. Аппаратное обеспечение представлено однозондовым трехкатушечным прибором ИК-42М с размером между приемной и излучающей катушкой 0,5 м. Использовался также аналоговый прибор ПИК-50 с рабочей частотой 150 кГц и разрешающей способностью в пределах 0-2000 мСим/м. Кавернометрическое зондирование проводилось прибором СПК-01, а термометрия прибором ЭТС-10У, КТ-42М, ТР-43, прибор гамма и электро-каротажа КСП-ГК-43. Каротажные исследования получены с использованием цифровой каротажной станции «Вулкан V3».

Научная новизна работы: 1) выявлены новые факторы проницаемости горных пород в условиях постановки индукционного каротажа на месторождениях урана, отрабатываемых методом ПСВ; 2) впервые проанализирован и описан характер зависимости факторов проницаемости и электропроводности руд, отрабатываемых методом ПСВ на месторождениях зон пластового окисления с петрофизической и морфологической осложненностью геологического разреза; 3) разработана авторская модель мониторинга и оптимизации движения технологических растворов в ходе отработки методом ПСВ урановорудных залежей на месторождениях пластово-инфильтрационного типа на основании прямой зависимости данных индукционного каротажа от факторов проницаемости горных пород; 4) впервые произведено моделирование движения в продуктивном пласте в условиях отработки рудных тел и разработана модель мониторинга с учетом оптимизации режима выщелачивания на основании данных индукционного каротажа на основе выявленных и описанных текстурно-структурных типов рудовмещающих пород месторождений Чу-Сарысуйской провинции (месторождения Инкай и Моинкум).

Положения, выносимые на защиту

1. Установлено, что на урановых месторождениях пластово-инфильтрационного типа величина электропроводности от 100 до 500 мСим/м для Инкай и от 180 до 500 мСим/м для

Моинкум наиболее эффективна в рудных интервалах и находится в прямой зависимости от факторов проницаемости горных пород. Качество мониторинга движения растворов в продуктивном пласте методом ИК имеет прямую зависимость от ключевых факторов проницаемости рудовмещающих пород и осложняется при применении стандартной частоты прибора ИК при наличии высокослоистых пропластков.

2. Для урановых месторождений Инкай и Моинкум по степени однородности показателей электропроводности рудовмещающих пород выявлены три текстурно-структурных типа проницаемости. Опираясь на доказанную зависимость электропроводности от факторов проницаемости горных пород, текстурно-структурные типы месторождений Инкай и Моинкум по равномерности показателей электропроводности разделены на высокодифференцированные, дифференцированные и однородные.

3. Разработанная модель и результаты моделирования движения растворов на месторождениях Инкай и Моинкум с использованием пространственного и количественного показателей растекания жидкости доказывают эффективность селективного моделирования и оптимизации режима выщелачивания с учетом текстурно-структурных типов на основании данных индукционного каротажа.

Практическая и теоретическая значимость работы. Разработанная модель для мониторинга и моделирования движения жидкостей в продуктивном пласте, опирающаяся на данные индукционного каротажа, может быть использована на гидрогенных месторождениях с различными текстурно-структурными типами, а также в условиях морфолитологической осложненности. Результаты исследования могут быть использованы как для дальнейшего развития применения индукционного каротажа на гидрогенных месторождениях, так и в качестве теоретико-методологической основы изучения закономерностей изменения проницаемости и ее отражения на диаграммах индукционного каротажа. Достигнутые результаты подтверждают научную и практическую ценность работы, а также возможность их применения для решения задач разработки урановых месторождений пластово-инфильтрационного типа в сложных геологических условиях. Материалы подтверждены актами внедрения в АО «НАК «Казатомпром», прошли процедуру государственной экспертизы в Национальном Институте Интеллектуальной собственности и являются объектами авторского права.

Достоверность и апробация результатов работы. Достоверность исследований обусловлена тем, что для моделирования выбраны скважины по принципу максимальной полноты и репрезентативности данных. Степень достоверности обеспечивается высоким техническим уровнем применяемого оборудования при проведении геофизических методов в скважинах, обработке и интерпретации полученного материала, а также внедрением полученных автором моделей на производстве, что позволило оптимизировать процессы подземного

скважинного выщелачивания, повысив точность прогнозирования движения растворов, а также улучшить контроль за разработкой продуктивных пластов.

Основные материалы исследования представлены в 9 опубликованных работах, из них 2 – в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и/или Web of Science и 2 – в изданиях, ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 4 публикации в материалах конференций и получено авторское свидетельство РК. Основные положения и результаты работы докладывались на V Международном симпозиуме «Уран: геология, ресурсы, производство», Москва, 2021, XXVI Международном научном симпозиуме имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 2022 и XI Международной научно-практической конференции «Развитие урановой и редкометалльной промышленности», посвященной 75-летию Ульбинского металлургического завода, Алматы, 2024.

Материалы исследования, результаты моделирования и разработки режимов выщелачивания, сформированные на их основе, подтверждены актами внедрения в АО «НАК «Казатомпром», прошли процедуру государственной экспертизы в Национальном Институте Интеллектуальной собственности, подтвердившей научную новизну и значимость исследования, и являются объектами авторского права.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в реализации геоэлектрических методов исследования на месторождениях Чу-Сарысуйской урановорудной провинции, интерпретации данных осциллограмм, создании каротажных диаграмм, статистической обработке и интерпретации полученных результатов. Написание текста, формулировка основных положений и осуществление моделирования выполнялись автором по плану, согласованному с научным руководителем.

Структура и объем диссертации. Диссертация объемом 161 страница состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 107 наименований, содержит 32 рисунка, 44 таблицы, 10 приложений.

Благодарности. Автор выражает огромную благодарность научному руководителю, д.г.-м.н., профессору отделения геологии Язикову Егору Григорьевичу за всестороннюю поддержку и помощь в написании диссертации. Большую признательность автор выражает коллективу АО «НАК Казатомпром» и АО «Волковгеология» за организацию производственной практики, помощь в сборе и интерпретации фактологического материала, организацию апробации результатов исследования. Автор признателен за помощь коллективу отделения геологии ИШПР ТПУ. Отдельную благодарность автор выражает родным и близким за поддержку и веру во время проведения исследований и написания диссертационной работы.

1 СТЕПЕНЬ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Проницаемость горных пород как условие проведения геоэлектрических методов

На современном этапе развития промысловой геофизики важное значение приобретают совершенствование методов геофизических исследований горных пород разрабатываемого пространства. Следует отметить, что геофизические методы исследования, как правило, представляет собой комплекс мероприятий для рутинного и специального обследования территорий находящихся в разработке с помощью фиксирования характеристик скважинного пространства различными технологическими методами. При этом, в зависимости от технологических особенностей разработки того или иного полезного ископаемого технологические геофизические условия диктуют целесообразность выделения тех или иных методов геофизического исследования или их совокупности.

Доступными, относительно малозатратными и эффективными методами исследования можно считать группу геоэлектрических методов, среди которых особой информативностью и возможностью достоверной интерпретации полученных данных, выделяются методы электромагнитного каротажа. Группа методов электромагнитного каротажа позволяет работать в условиях, когда глубина залегания и литологическая специфика разрабатываемой области не позволяет получить и изучить образцы каверны, а также в случае обводненности и неоднородности скважинного пространства. Соответственно, методы электромагнитного каротажа особенно актуальны в условиях технологического процесса разработки урановых месторождений методом ПСВ предполагающего высокую степень обводненности закачных и откачных скважин. В группе методов электромагнитного каротажа можно выделить индукционный каротаж, принципиальным физическим основанием которого выступает выявление удельной электропроводности обследуемых пород.

Мендыгалиев А.А., Селезнева В.Ю., Язиков Е.Г. и другие неоднократно в своих публикациях поднимали вопрос о необходимости внедрения селективного подхода к отработке и мониторингу наиболее перспективных рудных участков. Данный подход позволяет сократить затраты на рудоизвлечение, снизить экологические и техногенные риски [1].

В то же время, для его реализации необходимо применение такого комплекса методов, которые позволяют проводить мониторинг в условиях непрерывного технологического цикла ПСВ. Индукционный каротаж в полной мере соответствует данным критериям и позволяет достаточно точно дифференцировать области оруденения, в том числе – в динамике.

Физико-химическим основанием для использования индукционного каротажа является способность пород с различными физико-химическими свойствами проводить электрический ток. Разность в электропроводимости позволяет получать достоверную картину петрофизических свойств разрабатываемой толщи, ее структуру и морфологию, отраженных в диаграмме каротажа. Физические свойства пород находятся в прямой зависимости от гранулометрических и петрохимических свойств, особенностей и условий породообразования и глубины залегания.

На месторождениях урана пластово-инфильтрационного типа репером выступают разнозернистые пески и алевролиты, серозеленые пески, с включением глинистых и иловоглинистых отложений небольшой мощности. Неоднократные наслоения осадочных пород, условия породообразования в различные периоды формирования земной коры, определяют ритмичность распределения крупных фаций по ярусам. Однако, в условиях эпигенетических процессов, монотонность распределения пород нередко нарушается, благодаря вторичным наслоениям в силу тектонического и гидрологического влияния, что нередко обуславливает наличие прослоев и включений в рудоносных толще породах с резко отличными физикохимическими свойствами. Зачастую на эпигенетически восстановленных месторождениях встречаются прослои с кавернозными образованиями цементов и известняков. Органический материал представлен битумами и углефицированными дендритами.

Соответственно, электро-фациальная характеристика позволяет определить петрофизическую, фациальную, формационную картину на месторождении. В то же время, породы с различной литологической характеристикой обуславливают различия в геоэлектрической картине за счет различий в возможности проводить электрический ток.

Еще у М.С. Швецова мы находим, что осадочные породы, которые слагают рудоносные толщи месторождений урана гидрогенного типа, могут как непосредственно осадочными, так и перенесенными, что определяет их текстурно-структурные и петрофизические свойства, а нередко и состав, и морфологию. Эти характеристики, в свою очередь оказывают влияние на фильтрационные способности, которые меняют их геоэлектрические свойства. Размер зерен, их форма и особенности агрегации оказывают непосредственное влияние на тип проницаемости: трещиновый, поровый, либо комбинированный [2].

В условиях подземного скважинного выщелачивания также имеет значение и техногенное изменение проницаемости пород, что дает возможность использования геоэлектрических

методов для оценки эффективности выщелачивания и масштабов растекания технологических растворов.

Ниже, в таблице 1.1, представлены факторы, определяющие зависимость геоэлектрических свойств пород от их проницаемости.

Показатель	Единица измерения	Определяющее свойства					
Плотность	$\kappa\Gamma/M^3$	Масса твердого минерального скелета породы					
Пористость	Доли или проценты	Наличие в породе пор, трещин, каверн и других					
		пустот.					
Проницаемость	мкм ² , дарси(Д),	Способности горных пород фильтровать сквозь					
	милидарси (Д)	себя жидкости под давлением					
Тепловые	Дж/(кг•К)	Теплоемкость (способность пород сохранять					
свойства:	Вт/(м∙К).	постоянную температуру при концентрации или					
	M^2/c .	отдаче тепла)					
		Теплопроводность (способность проводить					
		тепловую энергию)					
		Температуропроводность (скорость выравнивания					
		температуры пород)					
Вязкостные		Снижение прочности пород и их способность к					
свойства	мПа∙с	перемещению из-за изменения плотности при					
		длительной нагрузке.					
Электрохимиче	мВ	Способность пород создавать естественные					
ская активность		постоянные электромагнитные поля за счет					
		происходящих в породах окислительно-					
		восстановительных реакций					
Поляризуемость	Проценты	Способность пород поляризоваться в					
		электрическом поле вследствие физико-химических					
		процессов, происходящих на границе твердой и					
		жидкой фаз					

Таблица 1.1 – Факторы проницаемости, влияющие на геоэлектрические свойства пород

И.Б.Ратников, Р.С.Чульга, Е.А. Романов, С.Н. Бастриков отмечают, что учет фильтрационно-емкостных свойств при изучении электрофаций является основным условием достоверности интепретации информации по геэлектрическим методам. Причем, наряду с пористостью и проницаемостью, исследователи выделяют глинистость, как важнейший фактор, определяющий возможность породы адсорбировать как связанную, так и свободную жидкость [3],

В то же время, Р. Р. Шаймарданова подчеркивает, что при различных геологических и гидрологических условиях, глинистость и обводненность являются факторами, повышающими достоверность одного геоэлектрического метода и снижающими эффективность другого. Так, наличие глинисто-песчаных фаций крайне благоприятно для постановки индукционного каротажа, а также каротажа поляризации [4].

Глинистость на месторождениях пластово-инфильтрационного типа существенно варьирует в зависимости от особенностей морфолитологического строения и гидрологических условий, и может варьировать в пределах 20-40 %, но встречаются и участки с глинистостью более 40 %. Электропроводность в данном случае зависит от типа глинистости. Плотные глины, как правило, служат водоупорами и их фильтпационные свойства, как и в случае цементации обломочных пород и разнозернистых песков глинами - крайне слабы.

Осадочные породы гидрогенных месторождений имеют пористость в пределах 15-35 %, которая уменьшается с увеличением глубины. Пористость зависит от формы и размеров зерен, степени их окатанности, уплотнения, цементирования обломков и зерен. Плотность преобладающего большинства пород, слагающих рудовмещающие толщи гидрогенных месторождений, колеблется от 1800 до 2500 кг/м³. По мере насыщения водой, плотность несколько возрастает – до 2000-2700 кг/м³.

Проницаемость пород пластово-инфильтрационных месторождений урана зависит от вышеназванных факторов и может варьировать от практически непроницаемых пород плотных глин и цементов (с сотыми и тысячными долями Д) до 50 и более Д в случае хорошо отсортированных песков. Достаточно высокой электропроводностью обладают (10⁻⁵-10³ Ом•м) рудные минералы. Породообразующие минералы в большинстве своем являются диаэлектриками. Минеральный скелет горных пород проводит ток значительно хуже, чем природные растворы и водонасыщенные рыхлые породы. По мере водонасыщения, увеличения пористости и проницаемости, увеличивается и электропроводность.

Так, А. Л. Вильмис с коллегами в ходе исследования фильтрационных особенностей месторождений урана на производительность ПСВ установили, что степень исходной текстурноструктурной осложненности, проницаемость пород, охваченных выщелачиванием, меняется уникальным, присущим только данному блоку образом. Причем процесс изменения носит постоянный характер на протяжении всего срока эксплуатации скважин. На уникальный характер изменения картины проницаемости оказывают влияния как исходные гидрогеологические условия, так и особенности режима выщелачивания [5].

Соответственно, изменения фильтрационных свойств в процессе выщелачивания позволяет использовать гезелектрические методы в целом, и индукционный каротаж в частности в качестве методов мониторинга процесса выщелачивания в течение всего периода эксплуатации за счет прямой зависимости электропроводности пород гидрогенных месторождений урана от их проницаемости.

А. Н. Орехов отмечает важность учета типа пористости при проведении геоэлектрических методов. Исследователи особенно выделяют трещиноватость, как фактор осложненности при проведении геофизических исследований, так как в отличии от поровой проницаемости,

трещиновая и порово-трещиновая предполагает наличие нарушения сплошности пород. При этом, возникают отдельные блоки, идентификация которых по данным ГИС может быть затруднена. Геоэлектрические методы, в частности индукционный каротаж, позволяет достаточно точно определять степень и характер трещиноватости, поскольку на диаграммах электрокаротажа обнаруживаются аномалии в силу увеличения фильтрации в зоне разлома [6].

Таким образом, электрические свойства пород зависят от достаточно большого количество как формационных, литологических, морфологических, физикохимических факторов. Электрическое сопротивления и электропроводность минералов, слагающих породу, определяются пористостью и проницаемостью, насыщенностью водой или раствором, температурой, а также составом и химическими реакциями в процессе закисления. Это позволяет использовать геоэлектрические методы для дифференцировки пород с различной проницаемостью, а также выявлять непосредственно области оруденения за счет разницы в электрических свойствах материалов, слагающих рудоносные горизонты.

1.2 Физико-технические основы индукционного каротажа на месторождениях, отрабатываемых способом ПСВ

Теория индукционных методов опирается на уравнения Максвелла, которые позволяют объединить электродинамику и электростатику стационарных и квазистационарных токов и рассмотреть их временные изменения, приводящие к возникновению электромагнитных волн [7].

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) - есть сопротивление куба породы с ребром 1 м. Его рассчитывают по формуле:

(1.1)

P=RS/L

Где:

R - сопротивление, Ом;

S - сечение проводника, M^2 ;

L -длина проводника, м.

В зависимости от свойства пород, материалы, слагающие обследуемую область, разделяются на проводники, полупроводники и диэлектрики, в зависимости от типа проводимости.

Электрическая проводимость горных пород может иметь электронный и ионный характер, что определяется зависимостью от структуры и свойств горных пород. Так, ионная проводимость находится в зависимости от водонасыщенности породы и степени минерализации вод, таким

образом предопределяя зависимость от таких структурных и текстурных качеств как пористость породы и минерализации поровой воды.

В однородной изотропной среде с удельной электропроводностью γ_{n} , когда частота тока питания и проводимость среды невелики, взаимным влиянием вихревых токов можно пренебречь [8].

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{K}_3 \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\boldsymbol{\Pi}},\tag{1.2}$$

где К₃ – коэффициент зонда

Но, в процессе обследования измерению подлежит не ЭДС Е₂, а пропорциональная ей величина получаемого при индукционном каротаже сигнала:

 $\mathbf{E}_{\mathbf{c}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{E}_2, \tag{1.3}$

где С - коэффициент пропорциональности.

Далее производим преобразования для перехода величины сигнала к удельной электропроводности:

$$\gamma_{\Pi} = E_2 / K_3 = E_2 / C \cdot K_3 = E_c / K_c, \tag{1.4}$$

где К_с- коэффициент перехода от Е₂ к удельной электропроводности.

Так как среда, окружающая погружной источник индуцируемого сигнала, неоднородна (прослои пород разного сопротивления, промывочная жидкость с сопротивлением, отличающимся от сопротивления окружающей среды, наличие зоны проникновения), то замеренная величина электропроводности характеризует кажущую проводимость γ_{κ} аналогично кажущемуся удельному сопротивлению E_{κ} . В результате измерений величину сигнала E_c определяют следующим образом:

 $\gamma_{\kappa} = 1/c_{\kappa} = E_c/K_c, \qquad (1.5)$

Величина K_c выбирается с таким расчетом, чтобы в однородной среде γ_к соответствовала γ_п. [7].

Частотный диапазон индукционного каротажа варьирует от десятков до сотен килогерц.

В целом, ИК как метод геофизического исследования нашел свое применения при решении целого комплекса задач промысловой геофизики:

-литологическое расчленение разреза;

-определение удельного электрического сопротивления и параметров зоны проникновения пластов;

- оценка характера насыщения коллекторов;

- корреляция разрезов скважин;

Все разновидности исследования, с применением индукционного каротажа, основываются на погружении измерительного прибора (зонда или снаряда), создающего электромагнитное воздействие на пересекающие скважиной горные породы.

Индукционный каротаж позволяет получать данные об особенностях горных пород в радиусе 1-2 м околоскважинного пространства. Форма кривой и определение границ пластов при ИК зависят от характера токовых линий, образующих вокруг оси скважины замкнутые окружности, располагающиеся в плоскости, перпендикулярной к оси зонда. Влияние зоны проникновения на результаты ИК невелико при повышающем проникновении. Понижающее проникновение оказывает значительное влияние, начиная с проникновения промывочной жидкости на глубину, превышающую три диаметра скважины (D> 3 d_c). Технологическим средствами реализации индукционного каротажа является приборы, в упрощенном виде которые можно условно разделить на две технологические части: источник излучения, детектор (зонд) и каротажная станция, обеспечивающая спуск и подъем погружаемого снаряда, а также прием и первичную интерпретацию получаемых сигналов [9]. Аппарата индукционного каротажа на современном этапе является многокомпонентной и требует калибровки, что является достаточно сложным процессом. Далее представлена электронная схема аппарата ИК (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Электронная схема аппарата ИК [8]

В упрощенном схематическом виде, конструкция погружного аппарата состоит из диэлектрической зондовой части, на которой устанавливаются катушки генератора и приемника, а также дополнительные пары фокусирующих катушек, призванные нивелировать различные помехи в среде, на которую происходит воздействие электромагнитным полем. В однозондовых приборах число пар катушек может доходить до нескольких штук.

Зонд имеет крепление для установки электронных плат генератора и приемника, а вся конструкция заключается в герметичный кожух из диэлектрического материала, как правило, из текстолита. В особо агрессивных средах, где требования к прочности существенно повышены, могут применяться специальные материалы, инертные к воздействию кислот и щелочей.

Генератор формирует высокочастотный сигнал и подает его на катушку передатчика, которая и индуцирует электромагнитные импульсы. Электромагнитные импульсы от околоскважинного пространства также поступают на приемную катушку, что в сумме с импульсом от генератора, создает сигнал, который усиливается. При этом фокусирующие катушки нивелируют влияние первичного, поступающего от генератора импульса. Импульс от околоскважинного пространства после усиления, фиксируется и предается по кабелю или иными способом в цифровом или импульсном виде на каротажную станцию. На каротажной станции амплитудные колебания сигнала от околоскважинного пространства фиксируются в виде каротажных диаграмм.

Метод ИК позволяет производить измерения как активной компоненты, кажущейся удельной электрической проводимости p_a , которая обратна пропорциональна УЭС, так и реактивной компоненты p_p , пропорциональной УЭС, сдвинутой по фазе относительно тока генераторной цепи зонда [7].

При ИК первостепенное значение имеет измерение активной составляющей, более тесно связанной с электропроводностью пород. При низкой электропроводности активный сигнал практически прямо пропорционален электропроводности среды. При высокой электропроводности вихревые токи значительны и взаимодействие магнитных полей вихревых токов приобретает существенное значение. Это приводит к снижению сигнала и к оставлению активного сигнала от повышения электропроводности. Такое явление известно под названием скин-эффекта.

Глубинность ИК превышает глубинность обследования другими электрокаротажными методами, например, КС, и зависит от следующих факторов:

-длина зонда, измеряемая как расстояние между генератором и приемником;

-частоты индуцируемого тока;

-свойства исследуемой среды и скважинных жидкостей.

Несмотря на то, что применение индукционного каротажа насчитывает не одно десятилетие – с середины 50-х годов 20-го века, когда началось активное изучение теоретических и прикладных основ метода, тем не менее, вопросы повышения ИК, и, как следствие – эффективности проводимых геофизических исследований представляют на данном этапе весомый научно-прикладной интерес [8].

Особенно важным является вопрос совершенствования индукционного каротажа как рутинного метода мониторинга разрабатываемых рудоносных областей, поскольку информативность напрямую влияет на эффективность и безопасность эксплуатации месторождений. Так, в условиях технологического процесса разработки урановых месторождений методом ПСВ, большое значение имеет контроль над миграционными процессами ураносодержащего раствора в околоскважинные породы. Процесс подземного выщелачивания позволяет с одной стороны, увеличить производительность и экологическую безопасность скважинного фонда, но, с другой стороны, в виду высокой миграционной способности урановых частиц увеличивает риски миграции в грунтовые воды, а также близлежащие рыхлые породы околоскважинного пространства.

При проведении добычи урана методом ПСВ, как правило, сложно получить достаточно достоверную информацию о строении рудного тела для регулирования технологического процесса с целью максимального извлечения полезного компонента и снижения себестоимости добычи. Опыт геолого-геофизических работ на урановых месторождениях свидетельствует о том, что применяемый комплекс геофизических методов не в полной мере обеспечивает решение некоторых задач при подсчете запасов урана и контроле движения технологических растворов. При расчете эффективной мощности блока (М_{эфф}) для случаев, когда фильтры технологических скважин не соприкасаются с водоупорами, применяются различные методы и приемы, результаты которых не всегда достоверны, поскольку влияние на результативность оказывает агрессивная жидкостная среда, а также сложное строение рудных и рудовмещающих пород. Кроме того, при сильной литологической неоднородности разреза надежно определить изменчивость фильтрационных свойств и, соответственно, распределение технологических растворов в межскважинном пространстве затруднительно. Индукционный каротаж позволяет получить дополнительную информацию по движению технологических растворов в разрабатываемом блоке [9].

Интерпретация данных ИК на гидрогенных урановых месторождениях, отрабатываемых методом ПСВ, позволяет получить достаточно достоверную информацию о литологофизических характеристиках пород, их распределении в межскважинном пространстве и, на этой основе, осуществлять оперативный контроль над процессом отработки.

Поскольку закисление продуктивного горизонта осуществляется неравномерно: на наиболее проницаемых участках извлечение руды происходит эффективнее, в то время как в слабопроницаемых областях остаются неотработанные запасы. Проведение индукционного каротажа на технологическом блоке в период его отработки позволяет получить информацию о степени закисления рудного массива и распределении этого процесса по участкам рудного тела, и таким образом определить рудные зоны, не вовлеченные в процесс выщелачивания. Данная информация является важной для регулирования геотехнологического процесса с целью максимального извлечения урановой руды [10].

Несмотря на возрастающую роль ГИС в процессе отработки уранорудных месторождений и повышение извлечения урана, применения ИК, впрочем, как и других методов электрокаротажа, имеет определенные ограничения.

В первую очередь, на сегодняшний день индукционный каротаж в период отработки на месторождениях проводится не на всех технологических скважинах в отрабатываемых блоках.

Это связано в первую очередь с тем, что для экономико-промышленной и технологической эффективности, процесс работы откачно-закачного комплекса скважин является непрерывным. Исключения в виде простоев обуславливаются в основном внештатными (аварийными) ситуациями и плановым проведением ГИС.

Для проведения каротажа необходимо производить ряд мероприятий, приводящих к остановке работы скважины, в частности: извлечение насоса из скважинного пространства, задействования дополнительного измерительного оборудования и спуск снаряда непосредственно в скважину.

Кроме того, проведение ИК связано с дополнительными экономическими издержками, что также является фактором, снижающим частоту его применения, в целом как и иных методов ГИС [11].

Однако данные ИК позволяют не только наблюдать за движением сернокислых технологических растворов, но и производить уточнение геотехнологических параметров рудовмещающей среды, что позволяет существенно повысить как безопасность работы скважин, так и эффективность извлечения руды [12].

Существует достаточно большое количество типов и модификаций аппаратов ИК, но на урановорудных месторождениях, отрабатываемых методом ПСВ, наибольшее распространение получили одно-двух зондовые аппараты ИК с частотой порядка 150 кГЦ.

Наиболее достоверные результаты дает ИК при слабой минерализации жидкостей. Несмотря в целом на свою эффективность, индукционный каротаж как метод ГИС имеет некоторые ограничения, которые могут зависеть от технологических особенностей того или иного разрабатываемого объекта, а именно:

-высокое содержание в жидкости компонентов с сильными магнитными свойствами;

-значения удельного электрического сопротивления пород, превышающие 500 Ом/м;

-метод не применим с обсаженными скважинами, за исключением скважин, обсаженных трудами из непроводящих материалов, таких как полиэтилен, поливинихлорид, полиуретан.

Первый случай может в условиях добычи урана методом ПСВ наблюдаться при наличии в рудовмещающих породах или околорудном пространстве таких минералов, например, как мелантерит, розенит, смольнокит, которые под воздействием слабых растворов серной кислоты образуют железный купорос. Увеличение концентрации серной кислоты также приводит к

снижению удельной электропроводности, что может быть осложнено в условиях неоднородности рудовмещающих пород примесью сульфатов алюминия, железа и меди, которые также влияют на удельную электропроводность раствора в сторону снижения [13].

Во втором случае, осложняющим фактором может быть наличие пористых известняков с удельным электрическим сопротивлением порядка 600-800 Ом/м или иных высокопроводимых материалов. Однако, стоит отметить, что основные рудовмещающие слои на урановых месторождениях в зоне пластового окисления как правило в своей структуре в качестве доминирующих пород сложены материалами с проницаемостью в пределах целесообразных для применения ИК [14].

Естественным образом водонасыщенный в толщах залегания рудоносных тел материал горных пород, безусловно, имеет более низкую степень УЭС.

Кроме того, зависимость ограничений применения ИК и УЭС горных пород также связана с показателем сопротивления технологического раствора. При сочетании раствора с сопротивлением менее 0,1 Ом/м и высокого УЭС пород, применение ИК становится затруднительным. Кроме того, следует отметить различия в электропроводности петрофизически сложных рудовмещающих пород, которые в условиях высокой пористости могут содержать неотработанные рудные вкрапления урана и представляет собой область, сложно определяемую методом индукционного каротажа в виду низкой удельной электропроводности. С помощью ИК достаточно хорошо разделяются породы с УЭС до 50 Ом/ м, хуже - с сопротивлением 50-200 Ом/м.

Породы более высокого сопротивления ИК практически не разделяются. Для нивелирования данного недостатка на практике непрерывно разрабатываются новые конструктивные решения модификаций каротажных комплексов.

В условиях литологической, морфологической осложненности и петрофизического существенного разнообразия рудовещающих пород, на характер компонентов электромагнитно поля может также влиять явление анизотропии, представляющее собой достаточно распространенное явление различия значений электрических параметров пород по разным направлениям [15].

Собственно, вышеназванные сложности использования индукционного каротажа и предопределяют необходимость его комплексования с иными методами геофизического исследования скважин. Как правило, индукционный каротаж используется в сочетании с другими методами каротажа в условиях отработки урановых месторождений методом ПСВ. Достаточно часто используются методы электромагнитного и термокаротажа. Совмещение данных по комплексному обследованию позволяет выявить достаточно достоверную картину отрабатываемого блока и характера растекания жидкостей в нем.

Таким образом, несмотря на имеющиеся ограничения, преимуществами применения ИК на месторождениях, отрабатываемых методом ПСВ, является достаточно внушительный список возможностей:

- высокая эффективность в толщах, где кривые по другим электрическим методам (например, КС) искажаются вследствие экранирования прослоями высокого УЭС;

-возможность исследования в сухих и обсаженных непроводящими конструкциями скважинных пространствах;

- эффективность мониторинга движения растворов, перетоков, растеканий, в том числе за пределы скважинного пространства;

-эффективность мониторинга отработки рудовмещающего пространства до и после процесса закисления;

-наличие относительно небольших ограничений и минимальных методических требований.

1.3 Научно-прикладное развитие и перспективы ИК в условиях разработки урановых месторождений способом ПСВ

Стремительное развитие горнорудного дела и современные масштабы освоения уранорудных залежей предопределили стремительное развитие и методов ГИС, в том числе – индукционного каротажа. Параллельно с постановкой и решением задач по освоению трудноизвлекаемых запасов урановых руд, с развитием технологического и технического процесса разведки и эксплуатации месторождений, метод ИК получил широкое развитие, и требует решения инженерно-технических задач, которые позволяют повысить информативность и сократить затраты на проведение ГИС.

Сегодня использование метода ИК, как и других методов ГИС, отличает тенденция к стремительной автоматизации процессов регистрации и интерпретации каротажных данных, строгая регламентация и типизация процесса проведения как потоковых мониторинговых, так и разведывательных исследований.

А начало процесса использования метода ИК, как и методов каротажа в целом, было положено в 1927 году, когда братья Конрад и Марсель Шлюмберже, в ходе экспериментов по электрографическому исследованию скважин получили первую каротажную диаграмму, отражающую особенности строения исследуемой толщи скважины [16].

На первоначальном этапе развития теоретической базы метода индукционного каротажа в фокусе исследований центральным моментом были теории распределения индуцированных токов в неоднородных пространствах, которые опирались на положениях геофизики о данном процессе.

Несмотря на то, что первые исследовательские труды касались в первую очередь перспектив и возможностей использования индукционного каротажа в условиях нефтепромысла, но, тем не менее, основные теоретические и прикладные аспекты исследовательской работы, имели крайне важное значение для промысловой геофизики в целом. И как было отмечено ранее, с развитием урановой промышленности, крайне успешно и стремительно были внедрены в условия и этой относительно молодой отрасли промысловой геофизики [17].

В 1946 году Г. Доллем была разработана установка для индукционного каротажа, представляющая собой соосно расположенные генераторные и измерительные катушки. Которые располагались на оси скважины. Импульсный ток генераторной катушки формирует в скважинном пространстве магнитное поле, индуцирующее вихревые токи в проводящей среде. Магнитное поле токов индуцирует электродвижущую силу в измерительной катушке, которую в свою очередь фиксируют регистратором [18].

Прибор, предложенный Доллем, в целом явил собой ключевые основы применения теории индукционных токов для исследования строения околоскважинного пространства, и его базовые принципы остаются основополагающими, при применении индукционного каротажа по сей день.

Уже в 1956 году Г. Доллем были сформулированы теоретические положения использования метода индукционного каротажа в условиях скважин с глинистыми растворами [17, 18].

В СССР изучение теории индукционного каротажа начинает наращивать обороты, начиная с 60-х годов 20-го века. В 1960 году выходит очерк Ю.И. Кудрявцева, посвященный основным аспектам теории индукционного каротажа [19].

В 60-х годах 20-го века развитие получает исследование возможностей высокочастотного индукционного каротажа. В 1965 году С.М. Аксельродом рассматриваются возможности и перспективы применения высокочастнотных исследований скважин. В условиях развития промысловой геофизики и усложнения задач, предъявляемых для геофизических исследований в виду разности в геофизических и технологических предпосылках добычи полезных ископаемых, потребовалось существенно расширить и оптимизировать зондовую аппаратуру [20].

Возросшая в обозначенный период потребность в уране способствовала активизации поисковых работ и масштабным исследованиям возможностей рудоизвлечения в условиях, которые можно считать прецедентными. Существенный вклад в совершенствование методов

поисков, разведки и подготовки месторождений к промышленному освоению был внесен коллективами ВИМСа, ВСЕГЕИ, ВНИИХТа, ПромНИИпроекта, ВИРГа, Казахского филиала ВИРГа, ВСЕГИНГЕО, ИГЕМ АН СССР, ИГН АН КазССР и другие. Так, на территории Казахской ССР первые исследования проводились в зонах домезозойских геологических формаций и в прибортовых частях мезозойско-кайнозойских депрессионных структур.

Но, в 60-е годы 20-го века, в Южном и Юго-Восточном Казахстане Волковской экспедицией под руководством А.А. Ковалева были проведены обширные поисковые мероприятия, связанные с выявленным эпигенетического строения урановых месторождений, контролируемых ЗПО, что привело к обнаружению и позднее исследованию Сырдарьинской и Чу-Сарысуйской депрессий, характеризующихся сложными литологическими, стратиграфическими и петрофизикохимическими условиями. Соответственно, появление прикладных задач потребовало расширение технологических модификаций оборудования ИК, и в процессе разработок основной целью в период 60-х-70-х годов 20-го века стало повышение чувствительности зондов к характеристикам обследуемой среды, что потребовало разработки оптимизационных решений, которые в свою очередь привели к идее повышения частоты гармонических колебаний. Предложенный Аксельродом аппарат ПИК-1 позволили решить новые возросшие по сложности задачи геофизической электрометрии. В 1969 году Д.С. Даевым разрабатывается аппарат для диэлектрического индуктивного каротажа [21].

Возрастает интерес к прикладным основам применения индукционного каротажа в слоистых средах, а также возможностям повышения точности исследования при помощи многозондовой аппаратуры и совершенствования математической интерпретации данных, что нашло отражение в работах В. Достерхоффа, И. Лонгмана, И. Морана, [22-24].

В конце 60-х начале 70-х годов появились возможности метода переходных процессов применения индукционного каротажа [25, 26].

Следует отметить, несмотря на то, что первые труды, посвященные высокочастнотным ИК, появляются в начале-середине 60-х годов 20-го века, тем не менее, вплоть до середины 70-х годов на практике в основном использовались низкие частоты. В частности, Ю.Н.Антоновым и С.С. Жмаевым, в труде от 1979 года, посвященном методологии ВИКИЗ, приводятся данные о преобладании низкочастотных колебаний в практике геофизических исследований [27].

Повышение гармонических колебаний приводит к существенному росту измеряемых данных, но спектр полученных измерений ограничивается неопределенностью, в частности, вызванной взаимодействием токов при регистрации активной компоненты индуцированного поля.

В начале-середине 70-х годов 20-го века, на базе лаборатории электромагнитных полей Института геологии и геофизики СО РАН производятся исследования основных свойств

высокочастотных электромагнитных полей в диапазоне от десятков до тысяч килогерц. Так, Ю.Н.Антоновым, А.А.Кауфманом, И. Ф. Изюмовым исследуются свойства и закономерности диэлектрического и высокочастного индукционного каротажа [28, 29].

Теоретические исследования развиваются параллельно актуальным прикладным исследованиям применения индукционного каротажа. Прикладные и методические задачи индукционного каротажа рассматриваются Ю.Н. Антоновым и Б.И. Приворотским уже в 1973 году, а в 1975 году выходит методические рекомендации касательно метода высокочастотного индукционного каротажа [30, 31]. Названные авторы внесли весомый вклад в развитие изучения физических основ индукционного каротажа, и в частности – высокочастотного ИК. В первую очередь, важным стало выявление и описание закономерностей влияния геоэлектрических условий на данные индукционного каротажа, что позволило сформировать положения о параметрах фокусировки, позиционирования и выбора параметров электроцепей и других важных аспектов применения ИК.

Кроме того, Э.П. Зверевыми, К.Л. Санто, а также Ю.Н. Антоновым и Б.И. Приворотским ведется разработка моделей и макетов аппаратурных решений для высокочастотного индукционного каротажа. Опытные приборы для высокочастотного индукционного каротажа впервые успешно проходят испытания в условиях ВИК [31, 32].

Теоретические исследования и почти десятилетняя экспериментальная работа позволили вывить, что электромагнитные поля в частотном диапазоне сотен килогерц обладают весьма существенным глубинным проникновением в среду скважинного пространства. Однако, в этот же период было выявлено, что по мере повышения частоты проявляется так называемый скинэффект, который способен снизить глубину проникновения [33].

Соответственно, экспериментальное и теоретическое изучение особенностей использования индукционных зондов позволило выявить ограничения и возможности применения отдельных компонентов излучаемого электромагнитного поля. Были выявлены возможности применения теории приближений в слоистых средах, с учетом скин-эффекта во внешней области. Кроме того, были определены частотные диапазоны для частоты источника возбуждения зондов ИК в зависимости от диаметра скважины, минерализации растворов и других параметров, влияющих на результативность ИК.

Ниже приведены данные зависимости параметров исследуемой среды и частоты генератора возбуждения зонда ИК (Таблица 1.2).

	$d_{c(M.)} / \rho_{\Delta(OM/M.)}$										
∫(кГц)	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0	30,0
10	1,0	1,4	1,6	2,2	2,5	3.2	4,5	6,7	10	≤10	-
20	0,7	1,0	1,2	1,6	1,8	2,2	3,2	4,7	7,0	≤10	-
50	0.4	0,6	0,7	1,0	1,1	1,4	2,0	3,0	4,5	5,2	7,4
70	0,35	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,6	2,5	3,6	4,4	6,2
200	0,25	0,3	0,35	0,5	0,55	0,7	1,0	1,5	2,2	2,7	3,7
1000			≤0,35	0,2	0,25	0,3	0,4	0,7	1,0	1,2	1,6

Таблица 1.2 – Зависимость значений частот от диаметра скважины и удельного сопротивления среды [30-33]

Таким образом, к началу 80-х годов в ходе теоретических и научно-прикладных исследований была доказана перспективность высоких частот, существенно выше от ранее применимых, что позволило выявить и активно внедрить в практику ГИС новые методы индукционного каротажа, в частности высокочастотного индукционного изопараметрического зондирования. Данный метод отличает высокая информативность в условиях различных условий исследуемой среды рудовмещающих и рудоносных пород.

В период 80-90–х годов, исследования по повышению эффективности индукционно каротажа продолжают свое развитие, причем выделяются несколько направлений, отражающих актуальные задачи и условия развития промысловой инженерии и геофизики. В первую очередь, активно разрабатываются модификации аппаратуры и способов постановки индукционного каротажа, как в СССР и позднее – СНГ, так и в зарубежной практике [34].

Одновременно, с развитием физической математики, научный интерес смещается в сторону методов математического моделирования в электромагнитном каротаже в целом и индуктивном каротаже в частности. Следует отметить, что еще в 60-х-70 х годах формируется интерес к изучению возможностей математического моделирования электромагнитных каротажей, в том числе индукционного. Среди работ, посвященных методам математического моделирования и решения электрометрических задач обозначенного периода, можно выделить работы Б. Вильяма, Е.В. Захарова, В.Н. Никитиной [34, 35].

В 90-х-2000-х годах, вопросы математического моделирования индукционного каротажа рассматривались В.В. Кормильцевым, А.Н. Ратушняком, В.С. Могилатовым. В частности последним рассматривались возможности математического моделирования индукционного каротажа в средах с различной проницаемостью [36, 37].

В 2000-х годах и в настоящее время, основные исследования, наряду с изучением возможности применения математического моделирования и программного обеспечения для повышения точности и достоверности каротажных данных и их интерпретации, обращены к вопросам совершенствования применения ИК на основании многозондовых и многочастотных

установок [38]. Поточный характер применения комплекса ГМИС, а также достаточно хорошо изученные особенности применения ИК в сложных средах, предопределили круг значимых на современном этапе вопросов, решение которых лежит в области повышения точности исследования, особенно касательно тонких прослоев, нивелирование факторов, искажающих данные получаемые от зондовой аппаратуры [39-42].

К числу осложняющих каротажное индукционное зондирование факторов на современном этапе относится:

-влияние источников электромагнитного излучения, таких как аппаратура и объекта добычи в целом;

-влияние проводящей промывочной жидкости;

-влияние конструктивных особенностей скважинного пространства;

-влияние петрофизических и стратиграфических свойств вмещающих и рудоносных пород.

Так, уровень концентрации серной кислоты, составляющий основу технологического раствора при реализации метода ПСВ на месторождениях урана, может оказывать влияние на электропроводность раствора, что в свою очередь, потенциально может оказывать влияние на достоверность данных ИК [43]. Кроме того, важное прикладное значение имеет нивелирование факторов физико-химических взаимовлияний сред. В частности, для месторождений Чу-Сарыйсуйской провинции характерна регулируемость рудоносных тел контурами ЗПО, что предопределяет наличие осадочных (глинистых пород и песков) в качестве вмещающих и рудоносных. Для глинистой водонасыщенной породы электропроводность обратно пропорциональная проницаемости определяется не только проводимостью воды, но и поверхностной проводимостью гидратационной пленки, покрывающей глинистую поверхность. Поверхностная проводимость проявляется тем значительнее, чем выше глинистость породы и меньше минерализация насыщающей воды. Вследствие этого, относительное сопротивление глинистых пород, в отличие от неглинистых, зависит не только от их пористости и структуры пор, но и от их глинистости и минерализации насыщающих вод [44].

Соответственно, с развитием новых промысловых решений и усложнения процесса добычи в сложных по морфологии и петрофизике толщах, развитие индукционного метода каротажных исследований представляет собой весомый прикладной интерес.

Основной актуальной тенденцией развития аппаратного обеспечения ИК является разработка многозондовых установок, характеризующихся сложным строением и представляющих собой системы ортогональных генераторных и измерительных зондов.

Следующей актуальной тенденцией является обследование полей на различных частотах для нивелирования скин-эффекта и влияния эффекта анизотропии. Вопросы анизотропии

рассматривались еще в конце 70-х годов 20-го века Л. А.Табаровским, А. М.Каганский, М. И.Эпов и др. [45-46].

В настоящее время, интерес к данному явлению обусловлен важностью исследования характеристик анизотропии для получения о строении и геофизических параметрах пород. Вопросы возможностей и ограничений применения методов электрокаротажа рассматриваются в трудах Д.А. Легавко, М.И.Эпова и др. [47, 48].

Наряду с указанными выше проблемами в отношении практики применения индукционного каротажа на урановых месторождениях, разрабатываемых методом ПСВ, существует на данный момент ряд актуальных исследовательских задач, рассмотренных в трудах А.Н. Теплухина, А.Н. Ратушняк и Д.А. Легавко [9, 10, 47].

В первую очередь, важность в контексте данного исследования представляет проблема пространственного разрешения аппаратуры индукционного каротажа, особенно в условиях тонкослоистых напластований, которые, как будет показано далее, характерны для рудоносных участков месторождения Инкай и Моинкум.

Основная проблема геофизического исследования и последующего моделирования путем интерпретации данных индукционного каротажа заключается в сложности обнаружения и последующего определения при обработке данных каротажа тонких напластований вмещающих и рудоносных отложений [49].

Как правило, исследование тонкослоистых напластований сводится к следующим мерам: -исследование напластований путем комплексирования ГИС;

-признание усредненных характеристик на всей протяженности участка однородных по структуре напластований;

-применения математических алгоритмов решения обратных задач электрометрии;

-совершенствование компьютерных способов интерпретации данных каротажа и выделения тонкослоистых объектов;

-совершенствование аппаратного обеспечения и способа реализации ИК.

Комплексирование ИК с другими методами ГМИС в целом является рутинным мероприятием, стандартным для процесса мониторинга в процессе отработки месторождений методом ПСВ, и значительно повышает достоверность модели рудовмещающих пород. Это позволяет получать более достоверную общую картину положения и структуры рудного тела во вмещающих породах.

Кроме того, применение математического аппарата интерпретации данных и моделирования полей индукционного каротажа в условиях сложноструктурных напластований осложнено проблемой поиска оптимального аналитического решения. Сведение интерпретации

данных к усредненным значениям приводит к упрощенной литологической характеристике границ проницаемых и непроницаемых пород [37].

Однако, особую важность приобретает совершенствование аппаратного обеспечения, что, во-первых, снижает издержки на проведение ИК при мониторинге, во-вторых, оно направлено на решение прикладных задач с учетом специфических условий вмещающих и рудоносных толщ на каждом отдельном месторождении, а также особенностей технологического процесса рудоизвлечения.

В современной практике существует множество модификаций аппаратуры ИК, в частности погружаемого снаряда (зонда). На данном этапе разработка аппаратов ведется такими исследовательскими организациями как ВСЕГЕИ, Shlumberger [16].

Наиболее перспективными направлениями аппаратных модификаций являются, как уже было отмечено ранее, увеличения частотных диапозонов, а также изменения конструкции аппаратуры (многокатушечные, многозондовые аппараты) для нивелирования искажающих эффектов [50].

Поскольку степень влияния ограниченной мощности пласта тем больше, чем меньше сопротивление вмещающих пород, на диаграммах индукционного каротажа особенно четко выделяются более проводящие прослои, например, глинистые прослои в известняках.

Для получения наиболее точной каротажной диаграммы необходимой задачей является как можно более точное выделение пород с низкой и нивелирование пород с высокой проводимостью. С этой целью структура зондов, кроме основных генерирующей и принимающей катушек, включают несколько дополнительных пар, служащих для фокусировки и призванных, уменьшить искажающее воздействие буровых растворов, зоны проникновения и вмещающих пород на величину измеряемой кажущейся проводимости, а также увеличить глубинность исследования. Величины кажущихся сопротивлений, получаемые фокусированными зондами, более близки к истинным значениям сопротивлений по сравнению с данными зонда с двумя катушками. С увеличением сопротивления пород, слагающих разрез, влияние скважины и зоны проникновения возрастает. Влияние ограниченной толщины пласта заметно сказывается для пластов, толщина которых меньше двукратной длины зонда. Как уже было отмечено выше, на каротажных диаграммах, полученных методом ИК не выделяются очень тонкие пласты толщиной менее половины длины зонда.

На современном этапе для решения данной проблемы может применяться микрозондирование. Микрозонд представляет собой модификацию, у которой размер электродов соизмерим с расстоянием между ними. Метод микрозондов в различных его вариантах предназначен для выделения тонких пластов и исследования пород на небольшую глубину [8]

Как показывают исследования последних лет, актуальной и продолжительной тенденцией является замещение однозондовых и двухзондовых аппаратов ИК многозондовыми, которые позволяют получать более достоверную информацию, производя колибровку с учетом специфических условий проведения исследований, аппаратуры индукционного каротажа более информативной многозондовой аппаратурой [50].

На данном этапе существует большое количество модификаций многозондового оборудования ИК, которое позволяет решать специфические исследовательские задачи в сложных геофизических и географических условиях (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Типология модификаций аппаратуры ИК на современном этапе [50]

Следует отметить, что многозондовые комплексы индукционного каротажа обладают рядом преимуществ:

-позволяют упростить конструкцию каждого зонда, без ущерба для фокусировки;

-увеличивают степень информативности метода и дают возможность сократить количество погружений;

-дают возможность исследовать тонкие слои в осложненных условиях с помощью применения малогабаритных модификаций;

-дают возможность использования зондов в автономном режиме в горизонтальных скважинах.

Таким образом, на современном этапе повышение информативности и точности данных индукционного каротажа, в существенной степени зависит от технологических и технических способов его применения на каждом обследуемом участке, что реализуется при возможности накопленного опыта в использовании индукционных каротажных аппаратов с помощью различных модификаций, затрагивающих конструктивные и электрометрические особенности аппаратов. Данное направление является перспективным методом повышения эффективности ИК на месторождениях урана, отрабатываемых методом ПСВ, отличающимся агрессивностью проводящих сред, неоднородностью скважинного пространства, а также сложностью технологического процесса добычи и мониторинга в целом.

Тем самым, многозондовое индукционное каротажное исследование в известной степени повышает информативность данных и снижает издержки проведения рутинных геофизических исследований.

2 ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОИНКУМ И ИНКАЙ ЧУ-САРЫСУЙСКОЙ ПРОВИНЦИИ

2.1 Геологическая характеристика месторождений Инкай и Моинкум

Месторождения Инкай и Маинкум расположены в Чу-Сарысуйской провинции, которая тяготет к Чу-Сарысуйской впадине (Рисунок 2.1), расположенной в Южном Казахстане, и представляет собой мезозойско-кайнозойскую депрессионную структуру в пределах Северо-Туранской эпипалеозойской плиты в юго-западной части Урало-Охотского складчатого комплекса.



Рисунок 2.1 – Положение месторождений Инкай (1) и Моинкум (2) (выделены красными точками) в Чу-Сарысуйской синеклизе на структурной схеме верхнемезазойско-кайнозойского плитного комплекса чехла Северо-Туранской плиты [51] (с добавлениями автора)

Данные о строении депрессии, разнородности и глубине напластований подробно изучены в трудах таких исследователей как Ф. Е. Синицын, В. И. Дитмар, А. Я. Кунин, Г. П. Филипьев, А. А. Бакиров, А. Л. Колик, А. А. Певзнер, А. Б. Ли и другими в период, начиная с начала 70-х годов XX-го века [52].

В 1971-1975 годах проводилось глубинное сейсмозондирование обширных районов депрессии непосредственно с целью изучения ураноносности, что нашло отражение в трудах А. А. Смыслова, М. Г. Харламова, И. Д. Рогозина, М. Я. Дары, В. Х. Кашафутдинова, А. И. Кривцова, В. З. Фукса и др. Благодаря работам указанных авторов были получены схемы геологического строения фундамента, литолого-фациальные и гидрогеохимические карты для различных комплексов литифицированного осадочного слоя [53, 54].

Формирование депрессии происходило в герцинский и альпийский тектонические циклы. Домезозойский фундамет, изученный в работе [55], перекрывается осадочным чехлом, сложенным континентальными позднемеловыми и кайнозойскими отложениями.

Чу-Сарысуйская рудоносная провинция представляет собой территорию одноименного артезианского бассейна со сложным структурным строением. Структура бассейна представлена несколькими водоносными комплексами и водоупорными толщами, что благоприятствует разработки уранорудных тел методом ПСВ [56].

Выделяются два водоносных комплекса отложений: континентальный верхнемеловой и преимущественно морской палеоцен-эоценовый. Водоносные горизонты, разделены либо сплошными, либо гидравлически взаимосвязанными линзообразными глинистыми водоупорными толщами. Такая особенность строения вкупе с уклоном пластовых вод от бортов к центру бассейна, позволяет говорить о замкнутой гидродинамической структуре. Существующие скрытые перетоки, разности в активности и мощности потоков и очаги разгрузки обуславливают интенсивность инфильтрационных потоков и минерализацию вод, что оказывает влияние и на геохимические свойства рудоносных пород, и на распространенность окислительных сред [57]. Преобладают трещинно-пластовые, трещинно-жильные воды, но также можно встретить карстово-пластовые и трещинно-карстовые участки обводненности. Водоупорные толщи представлены глинистыми пачками различной мощности.

Водоносные комплексы характеризуются неоднородными и слабыми в целом коллекторскими свойствами пород, обладающих эффективной пористостью и проницаемостью от 0,05 до 0,15 Д в пределах 3 – 8 % [58].

С точки зрения цели исследования наибольший интерес представляет характерная для Чу-Сарысуйской рудоносной провинции неоднородность и прослоистость, различия в петрофизическом и геохимическом составе рудовмещающих пород, что позволяет оценить перспективы индукционного каротажа в условиях геологической и технологической разнородности условий эксплуатации данного метода и выявить возможности для дальнейшего совершенствования [59].

В пределах Чу-Сарысуйской урановорудной провинции расположены крупнейшие месторождения Республики Казахстан, в том числе – месторождения Инкай и Моинкум, выступающие объектами исследования.

Данные месторождения выбраны по следующим критериям:

-месторождения находятся на стадии эксплуатации;

-месторождения находятся в пределах зон ЗПО Чу-Сарысуйской урановорудной провинции, расположены на удалении друг от друга и отличаются литолого-стратиграфическими особенностями;

-как на Инкай, так и на Моинкум имеются данные по применению ИК.

Чу-Сарысуйская депрессия характеризуется развитостью зон пластового окисления в пределах отложений в первую очередь мезозойско-кайнозойского чехла, что обуславливает первоочередный интерес напластований в пределах данных отложений с точки зрения разведки и добычи урана [60]. В пределах отложений мезозойско-кайнозойского чехла в отношении рудоносности наибольший интерес представляют образования рудовмещающего мелпалеогенового сейсмофациального комплекса.

Исследования последних десятилетий выявили особенности распределения и концентрации урана в отложениях различных типов. Так, по данным [57], первичные содержания урана наиболее высоки в подводно-дельтовых темноцветных песчаных отложениях среднего-позднего эоцена и достигают значений в пределах 5,1—6,3 г/т, что дает основания классифицировать данные образования как рудоносные осадочные формации на эпигенетических месторождениях [61].

Оба объекта исследования расположены в схожих геохимических и гидрологических условиях [62], что обусловлено формированием в пределах зон закисления Чу-Сарысуйской урановоружной провинции (Рисунок 2.2). Тем не менее, имеются и существенные отличия.

Месторождение Инкай является крупнейшим месторождением пластовоинфильтрационного типа как в Республике Казахстан [63], так и на территории СНГ, располагается в зоне пластового окисления в проницаемых горизонтах верхнего мела. Рудоносные локации месторождения располагаются на расстоянии порядка 55 км по направлению с северо-востока на юг и имеют общую ширину от 7 до 17 км [59].



Рисунок 2.2 – Геологическая карта Чу-Сарысуйской впадины и местоположение месторождений Инкай (1) и Моинкум (2) [58] с добавлениями автора. Регионы: А) Инкай-Мынкудукский, Б) Уванас-Канжуганский; отложения: 1) глины, алевролиты, пески олигоценмиоцена, 2) глины, пески палеоцен-эоцена, 3) пески, глины, алевролиты, гравийники верхнего мела; 4) домезозойский фундамент; 5) разрывные нарушения; направления движения пластовых вод в отложениях: 6) эоцена, 7) верхнего мела; 8 – границы выклинивания зон пластового окисления

В основании мезозойско-кайнозойского чехла повсеместно залегают среднепозднепалеозойские субплатформенные осадочные толщи литифицированной части осадочного слоя, главным образом красноцветных джезказганской (C₂-3dz) и жиделисайской (P₁gd) терригенных свит, а также сероцветной кенгирской карбонатно-терригенной свиты (P₁₋₂kn) [55]. Разрез мезозойско-кайнозойских отложений начинается пестроцветными, достаточно плотными гравийно-песчано-глинистыми образованиями, локализованными в понижениях поверхности средне-позднепалеозойского этажа предположительно сеноманского возраста (Приложение A).

Рудовмещаюший комплекс представлен мынкудукским и инкудукским горизонтами верхнего мела. Мынкудукский горизонт в вертикальном разрезе проявляет разнообразие геохимического и петрофизического состава отложений:

-низовые: руслово-стрежневые разнозернистые пески с вкраплениями гравия и гальки;

-срединные: отмельно-русловые среднезернистые пески;

-верхние: средне-мелкозернистые пески с прослоями пойменно-старичных глин и луговых песчанистых алевропелитов.

Мощность горизонта варьируется от 30 - 40 м на северо-востоке до 70 - 90 м на югозападе.

Инкудукский горизонт (K₂t₂ - st) подразделяется на три уровня:

-нижний, мощностью 30-35 м;

-средний, мощностью порядка 55 - 60 м;

-верхний, мощность которого варьируется от 25 м до 35 м [60].

В составе нижнего яруса преобладают зеленовато-серые галечно-гравийно-песчаные отложения, выше которых расположены разнозернистые пески. В среднем ярусе преобладают зеленовато-серые разнозернистые пески с гравием и галькой, переходящие в мелкосреднезернистые пески с прослоями глин и алевропелитов. В верхнем ярусе наиболее часты среднезернистые пески с небольшой долей разнозернистых вкраплений, преимущественно сероцветной окраски. Достаточно развиты прослои пестроокрашенной глины. Для песчаных отложений как мынкудукского, так и инкудукского рудовмещающих горизонтов Инкая, свойственны незначительные концентрации органического вещества С_{орг} в пределах от 0,02 до 0,05 %, а также низкое содержание сульфидного железа и сульфидных минералов - от 0,1 до 0,4 % [59].

Месторождение Инкай расположено во фронтальной области интенсивного рудообразующего потока пластовых вод северо-северо-западного направления, проявленного в верхнемеловых горизонтах. Подземные воды характеризуются высокими напорами. В Инкудукском горизонте мощность гидродинамического напора составляет от 208 м до 337 м, а в Мынкудукском горизонте до 405 м - 467 м. Характерно неглубокое залегание
пьезометрического уровня на глубине до 40-50 м, а в южной части месторождения наблюдается самоизливание подземных вод.

Химический состав пластовых вод достаточно однородный, хлоридно-натриевый, однако в южной части месторождения присутствуют воды сульфатно-хлоридного типа. Минерализация вод верхнемелового комплекса находится на уровне от 0,9 до 4,7 г/дм³ [60].

В рудоносных зонах распространены радиоактивные ураново-радиево-радоновые воды со значительным превышением предельно допустимых концентраций.

Месторождение Моинкум расположено в пределах Чу-Илийского складчатого пояса, на границе с Чуйской впадиной в районе Южно-Моюнкумского прогиба и разделена узкими малоамплитудными поднятиями: Моюнкумским валом на севере и Курагатинской седловиной на юге. Прогиб вытянут на 250 км в восточно-северо-восточном направлении от Малого Каратау до Кендыктаса. Ширина его 30-60 км, с амплитудой в 400 м.

Месторождение находится в пределах допалеозой-ордовикских геосинклинальных и девонских орогенных комплексов пород. Формирование структуры шовных зон происходило в несколько этапов. Зоны с аккреционными комплексами зародились на активной континентальной окраине в связи с субдукцией океанической коры.

В геологическом строении описываемой зоны участвуют нижнепротерозойские отложения, кембрийские вулканогенные и осадочные отложения ащисуйской и сулусайской свит, а также нижнеордовикская терригенная толща джамбулской свиты [55].

Структурно-тектоническое строение района тесно связано с геодинамической эволюцией Жалаир-Найманской глубинной подвижной зоны, определившей заложение в допалеозое внутриконтинентальной геосинклинали и проявление всех процессов седиментации, магматизма, метаморфизма, складкообразования и денудации на последующих этапах геосинклинального, орогенного, платформенного и постплатформенного развития. Причем тектоническое строение сформировано, современное В основном, на геосинклинальном и орогенном этапах каледонского цикла. На последующих платформенном и постплатформенном этапах герцинского и альпийского циклов развития, существенных структурных преобразований не произошло, за исключением подновления и возникновения новых разрывных дислокаций. В результате вся территория месторождения имеет сложное структурно-тектоническое строение [59, 60].

Литологическое строение включает два структурных яруса:

-сильно метаморфизованный и дислоцированный фундамент, образованный протерозойскими и палеозойскими отложениями;

-слабо дислоцированный чехол, представленый осадочными отложениями верхнего мела, палеогена, неогена и четвертичного периода.

37

В свою очередь верхний структурный ярус разделен на два подъяруса: верхний и нижний. Нижний подъярус представлен платформенными, полого залегающими отложениями верхнего мела, палеогена и миоцена. Верхний представлен практически горизонтально залегающим верхнеплиоценовыми и четвертичными отложениями. Основное значение, что характерно для Чу-Сарысуйской провинции в целом, имеют мезозой-кайнозойские, преимущественно верхнемеловые отложения.

В геолого-структурном отношении область месторождения Моинкум представляет собой сложно построенный антиклинорий, длительное формирование структур которого полностью завершилось в герцинский период.

Формации образованы тремя структурными ярусами:

-фундамент, представленный метаморфизованными и дислоцированными образования; -платформенные мел-палеоген-миоценовые терригенные отложения;

-суборогенные верхнеплиоцен-антропогеновые накопления.

Фундамент перекрывается платформенными осадками и представлен метапесчаниками, метаалевролитами, сланцами среднего девона, известняками и доломитами верхнего девона, карбонатными породами нижнего карбона, инъецированными интрузиями гранитоидов позднепалеозойского периода. Суммарная мощность мезозойских отложений в границах рудного поля составляет порядка 300 м [60].

Рудовмещающие горизонты месторождения Моинкум также представлены Мынкудукским и Инкудукским горизонтами, а также Иканский и Уюкский подгоризонты, рудоносные на данном месторождении (Приложение Б).

Отложения Уюкского подгоризонта представлены, главным образом, глинами. Прибрежно-морские песчаные образования сохранились от предтасаранской эрозии лишь в южной части района. Мощность уюкского горизонта измеряется от первых метров до 60 метров. Иканский подгоризонт по составу отложений, представленных серовато-зелеными глинами, реже - опоковидными, практически не отличается от Уюкского горизонта. В осевых частях Сузакского прогиба, где мощность иканского горизонта достигает от 40 м до 50 м, в его составе появляются мелкозернистые водоносные пески. Расположение в зоне Сузакского артезианского бассейна и обуславливает особенности гидрологической обстановки на месторождении.

На территории месторождения можно выделить два водоносных горизонта грунтовых и межпластовых напорных вод, однако ключевое значение для исследования имеет плиоценчетвертичный. Разделяют водоносные толщи средне-верхнеэоценовый (интымакский) и нижнесреднеэоценовый (уюкско-иканский) горизонты. Водовмещающие отложения представлены песками, в нижней части которых расположены прослои алевролитов. Мощность водоносного горизонта варьирует от нескольких метров в северной части района, до 77 м в южной части.

Нижним водоупорным прослоем водоносного горизонта служит толща глинистоалевролитных отложений неогена и палеогена шириной до 120 м. Для данных отложений характерна неравномерность водонасыщенности и проницаемости. Отличительной особенностью гидрогеологической обстановки в районе месторождения Моинкум является отсутствие гидравлической связи между основными водоносными горизонтами палеоценового комплекса с ниже залегающими водоносными горизонтами водоносного верхнемелового комплекса.

Водоносный верхнемеловой комплекс представлен двумя водоносными горизонтами, выделенными по геологическому возрасту: жалпакским и мынкудукским горизонтами [58, 61].

Воды водоносного комплекса являются пресными в южной части участка с минерализацией от 0,7 г/дм³ до 0,8 г/дм³, и слабосолоноватыми - в северной, с минерализацией от 1,1 г/дм³ до 1,3 г/дм³ преобладающего смешанного анионного, реже сульфатно-хлоридного состава. В катионном составе преобладает натрий, реже встречаются кальциево-натриевые воды.

2.2 Особенности оруденения и условия рудоизвлечения на месторождениях Инкай и Моинкум

Чу-Сарысуйской депрессии в целом присуща рудолокализация в зонах пластового окисления в породах с различной степенью проницаемости [62].

В средне-позднепалеозойских отложениях присутствуют кларковые содержания урана. Оруденение представлено линзами, мощностью в пределах 0,2–1,5 м и максимальными размерами до 1 км. Распределение содержания урана неравномерное и варьирует в пределах 0,03-0,16%, в отдельных пробах - до 0,4-1,5%. Основным рудным минералом является настуран. Рудные линзы приурочены к уровням, сопряженным с палеогеохимическими барьерами у нижней границы древнего грунтового окисления [61].

В пределах отложений мезозойско-кайнозойского чехла в отношении рудоносности наибольший интерес представляют образования рудовмещающего мел-палеогенового сейсмофациального комплекса [63].

Многочисленные исследования последних десятилетий выявили особенности распределения и концентрации урана в отложениях различных типов. Так, по данным В. А. Шахвердова, первичные содержания урана наиболее высоки в подводно-дельтовых темноцветных песчаных отложениях среднего-позднего эоцена и достигают значений в пределах 5,1–6,3 г/т. Что дает основания классифицировать данные образования как рудоносные осадочные формации на эпигенетических месторождениях [63].

Оба месторождения, и Инкай и Моинкум демонстрируют как характерные для гидрогенных месторождений особенности оруденения, так и специфические уникальные характеристики, которые обусловлены тектоническими, гидрогеологическими и литологоморфологическими факторами.

Особенности **месторождения Инкай** предопределили сложную морфологию оруденения (Приложение А). На характер оруденения на территории данного месторождения оказывает влияние ряд факторов, таких как:

- расположение рудоносных горизонтов во фронтальной части регионального потока пластовых вод;

-существенная мощность продуктивных горизонтов и неравномерное ее распределение на разных участках месторождения;

- высокая проницаемость продуктивных горизонтов;

- сложная слоистость структуры продуктивных горизонтов, состоящая из проницаемых, слабопроницаемых и водоупорных толщ пород.

Рудные тела имеют форму извилистых, мелкоскладчатых лент, что обусловлено особенностями рудоконтролирующих границ зоны пластового окисления ЗПО. Это обуславливает вертикальное расположение рудных тел и присущую им многоярусность, сложность состава рудовмещающих пород, и наряду с этим – высокую продуктивность рудоносных тел. Важным условием для постановки ИК является вертикальное чередование пород с разной проницаемостью и восстановительной способностью [64].

Соответственно, в общем плане простирается с юго-востока на северо-запад, многослойная зона пластового окисления, сформировала прерывистые ступенчатообразные залежи в верхнем цикле инкудукского горизонта. Далее, залегают более выдержанные рудные ленты в мынкудукском горизонте, нижнем цикле инкудукского надгоризонта и в среднем, наиболее высокопроницаемом цикле инкудукского горизонта. В последнем урановое оруденение контролируется линией полного замыкания ЗПО в рудовмещающем комплексе.

В пределах месторождения Инкай отмечаются следующие основные типы осложненной морфологии:

-глубокие и высокоамплитудные языки ЗПО, на глубине нескольких километров, которым соответствуют изгибы рудных лент;

-малоамплитудные изгибы границ ЗПО и рудных лент в пределах нескольких сотен метров;

-резкие ступенчатообразные изгибы рудных лент на относительно линейных участках рудного тела.

Касательно формы залежей, здесь также наблюдается многообразие. Часты монороллы с различными соотношениями частей рудных тел, а также каскадные монороллы, образованные слиянием нескольких монороллов по вертикали, вклинивания и слияния различных частей ролловых тел [63].

Протяженность разрабатываемых на данный момент рудных залежей варьирует от 9-31 км, а средняя ширина составляет порядка 250-350 м. Средняя мощность составляет 5-7,5 м и широко варьирует на всей протяженности.

Оруденение проявляет ярко выраженный монометалльный характер и отличается достаточно высокой продуктивностью рудовмещающих пластов. Содержание урана варьирует от 0,045 до 0,063 % в среднем, но в отдельных пробах достигает целых процентов [60].

Среди сопутствующих элементов можно отметить селен, молибден, никель, кобальт, цинк, ванадий и германий. Однако, несмотря на сопутствующее участие в рудообразующем процессе, их значения далеки от промышленной концентрации и составляют 0,01 - 0,03% и распространены спорадически.

Примечательно, что урановое оруденение локализуется практически во всех литологических формациях. До 27% от породообразующих веществ занимает глинистоалевралитный материал. Цементы представлены поровыми, крустифицированными, пленочными материалами. В глинистой фракции цементов преобладает каолинит в долевой массе до 16%. Следует отметить, что разнородность вмещающих и рудных пород проявляется и здесь и долевое соотношение глинистых и алевролитных фракций может варьировать.

Урановое оруденение характерно в основном для глинисто-алевролитных заполнителей, где находится в поровом пространстве в виде мелкодисперсного по своей структуре материале.

Ниже приведена диаграмма, раскрывающая особенности минерализации по месторождению в целом и по продуктивным горизонтам в частности (Рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Долевое соотношение ураносодержащих минералов на месторождении Инкай [62]

Как видно из данных диаграмм, преобладающим ураносодержащих минералом является настуран. Настуран, как и коффинит (силикат урана) относятся к высокорастворимой части руд при нерастворимом и труднорастворимом вмещающем рудном теле, представленном обломочными минералами. Руды некарбонатные и не содержат вредных примесей.

Водопроницаемые руды представлены тремя литолого-фильтрационными типами (Рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Типы водопроницаемых руд месторождения Инкай [64]

Касательно особенностей технологического процесса извлечения рудоносного раствора, следует отметить, что месторождение Инкай разрабатывается методом ПСВ путем многоскважинного сернокислотного подземного выщелачивания с концентрацией кислоты в пределах 5 – 13 кг/т. Извлекаемость урана составляет 80 – 90 % [64].

Рассмотрим особенности оруденения и рудоизвлечения на месторождении Моинкум.

По содержанию урана рудные залежи на месторождение характеризуются как бедными так рядовыми.

Если в песчаных отложениях содержание урана невелико, то в алевритно-глинистым возрастает, что, по всей видимости, связано с мощным гидрогенным влиянием на рудоносные и рудовмещающие породы.

Так, песчаные отложения превышают глинисто-алевралитные породы по содержанию урана в 5-10 раз, однако характеризуются дисперсной минерализацией.

Содержания урана в песчаных классах, по всей видимости, является следствием миграции, поскольку его наличие присутствует на мелкодисперсной органической фракции и в виде минерализованного осадка на мелко- и среднезернистых фракциях песка [65]. Однако, именно в песчаных классах сосредоточены основные объемы промышленно значимых запасов. Ниже представлена схема, отражающая распределение концентраций урана в рудоносных породах (Рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Распределение ураносодержащих пород по типам на месторождении Моинкум [62]

В зависимости от класса рудоносных пород, концентрация урана крайне неравномерна. Так, в песчаных классах уровень концентрации колеблется от 35,56 до 70,98 % урана. В алевритоглинистых классах песчаных руд может содержаться от 29,02 до 64,44 % урана. Обогащенность ураном по фракционным типам не имеет прямой корреляции с промышленной концентрацией на выходе [62-64].

Особенности рудогенеза предопределили тонкодисперсную, трудно диагностируемую форму урановой минерализации. Минерализация присутствует в виде новообразованных урановых минералов, терригенных урановых и урансодержащих минералов и урансодержащего органического вещества, что можно считать особенностью условий постановки ИК на рассматриваемом месторождении, существенно снижающих информативность данного метода.

Характерной особенностью урановой минерализации является ее тонкодисперсное распределение в виде мелко агрегатных вкраплений, примазок и осаждений на поверхности и поровом пространстве обломочных зерен и в виде пропитки рыхлых пород. Основной минеральной формой урана является настуран и коффинит, реже урановая чернь. До 3-5% урана присутствует во вторичных урановых минералах, в сорбированном состоянии в урансодержащих обломочных зернах, титановых минералах, глинистом веществе и растительной органике. Важной технологической особенностью является связанность урановых и урансодержащих минералов с дисульфидами железа и углефицированным растительным детритом. Цементация оруденелых песков и песчаников слабая, а неполное заполнение глинистым материалом межзерновых пор обуславливает хорошую проницаемость песчаных пород. В то же время, наличие следов миграции битумов свидетельствует о процессе битумообразования, что также предопределяет сложности дифференцировки цементированных и ураносодержащих, а также битумных отложений в виду схожести значений удельной проницаемости [65].

2.3 Факторы проницаемости на месторождениях Инкай и Моинкум

Разнообразие гидрогеологических и литолого-стратиграфических условий на месторождениях Инкай и Моинкум дает возможность выявить морфологические, петрохимические и петрофизические факторы проницаемости горных пород, которые оказывают существенное влияние на технологический процесс добычи и применение геоэлектрических методов.

Рассмотрим сравнительную таблицу факторов проницаемости месторождений Инкай и Моинкум (Таблица 2.1)

44

Таблица 2.1 - Сравнительная характеристика факторов проницаемости месторождения

Наименование	Месторож	кдение
характеристики	Инкай	Моинкум
Глинистость	20-40 %	15-20 %
Тип глинистости	Слоистые глины,	Преобладание песчаных
	прослаивающие средне-мелко	структурированных
	Виранцения сультина железа	
пород	сульфилных минералов	мелкопесианые лиффузице
пород	органицеских материалов	отложения органические
	органических материалов	фракции, битумы
Проницаемость рудовмещающей породы	От 0,5 до 34 мД	От 20 до 38 мД
Пористость	16 - 35 %	28 - 33 %
рудовмещающей		
породы		
Текстурно-структурный	Диагональная косоволнистая	Массивный
тип продуктивного	слоистость	
пласта		
Литологическая	Гравийно-галечные отложения,	Мелко-среднезернистые
особенность	мелкозернистые,	хорошо отсортированные
продуктивного	среднезернистые, мелкосерые,	пески с включениями
горизонта	серозеленыепески и	алевролито-глинистых
	маломощные линзы глин и алевритов	отложений
Фациальная	Наличие крустификационных	Наличие известняков,
характеристика	цементов и дендритов	битумов
рудоносных горизонтов	_	

Инкай и Моинкум на основании произведенного анализа данных ГИС

Как в процессе отработки, так и вследствие естественных геофизических процессов частицы глин создают кристаллические вкрапления в песчаных отложениях, как на поверхности, так и в поровом пространстве песчаных пород - основного рудовмещающего материала на месторождениях.

От величины вкраплений и их распределения зависит проницаемость пород. Так, глинистые отложения могут менять картину проницаемости даже в целом плотных отложений, повышая ее значение до 100-1000 Д. В то же время, преобладание структурированных глин предопределяет картину обводненности, создавая предпосылки для мелкого кавернообразования и соответственно – увеличения проницаемости [65, 66].

Наличие полостей также может быть обусловлено и вымыванием органических осадков. В целом, данные по особенностям строения месторождений Инкай и Моикум иллюстрируют, насколько пористость и проницаемость пород влияет на показатели электропроводности и результаты диагностики разреза. Данное влияние наблюдается по двум направлениям: вопервых, в отношении влияния обводненности пород, во-вторых, в отношении воздействия растворов и жидкой фазы пласта на петрофизикохимические свойства, особенно в процессе отработки. Структурно-текстурная разнородность рудовмещающих и рудоносных пород, наблюдаемая как на месторождении Инкай, так и на месторождении Моинкум (за исключением, пожалуй, Уюкского горизонта – наиболее однородного) создала предпосылки для сложных послоистых порово-трещинных систем.

Однако, на каждом месторождении картина влияния анизотропии будет различна. Так, на месторождении Инкай, где часты порово-трещиновые вертикальные системы, дифференцировка по горизонтали в виду лучшей проницаемости выше, нежели по вертикали.

Для месторождения Моинкум характерно преобладание трещиного строения, обусловленного наличием известняков и метаалевролитов, благодаря чему наблюдается лучшая проницаемость в целом и по вертикали, и по горизонтали, по ходу залегания низкопластичных наслоений и движения вод.

Месторождения Инкай и Моинкум объединяет осложненность морфологического, гидрологического и литологического строения [67]. Однако, на каждом месторождении имеются также и свои особенности (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Сравнительная характеристика морфологических свойств месторождения Инкай и Моинкум

Наименование	Месторождение		
характеристики	Инкай	Моинкум	
Фациальная картина	Слоистые участки	Слоистая структура	
	высокопроницаемых,	высокопроницаемых и	
	слабопроницаемых и	водоносных слоев.	
	водоупорных фаций	Обуславливающих	
		существенное растекание	
		технологических растворов и	
		естественные миграционные	
		процессы	
Глубина залегания	Ступенчатая картина	Значительная (но не равномерная	
	залегания, обусловливающая	на всей протяженности) глубина	
	различную мощность	залегания	
Морфология	Тонкослоистые, летообразные	Мелкозернистые пестрые	
рудоносных тел	рудные тела, межрудные	песчаники рудоносных слоев,	
	перешейки, переходы и т.п.	указывающие на миграционный	
		характер рудообразования	
Характеристика влияния	Высокое давление пластовых	Равномерное распределение	
гидрогеологических	вод (208 м - 465 м), наличие	глинистых пород, их	
факторов	местами	повышенная пластичность,	
	высокоминерализованных	мощное гидрогенное влияние	
	сульфатно-хлоридных вод,		
	выявлены следы миграции		
	урановых частиц в воде		

Морфологические, гидрогеологические и литологические особенности анализируемых месторождений содержат комплекс условий, предопределивших ранее рассмотренные петрофизикохимические свойства, и имеют как общие, так и специфические факторы. В первую очередь, слоистость рудоносных тел месторождения Инкай определяется наличием тонких перешейков и перегибов. Характерны ступенчатообразные и лентообразные профили залегания. Кроме того, присутствуют высоконапорные и высокоминерализованные пластовые воды.

Похожая картина гидрологической осложненности наблюдается и по месторождению Моинкум, предопределяя влияние термобарических факторов на картину проницаемости близ границы водоупоров. Однако, высокая проницаемость в виду структурно-текстурных особенностей рудоносных горизонтов в купе с гидрологическим влиянием, обеспечивает предпосылки, во-первых, для растекания технологических растворов, и во-вторых – для естественных миграционных процессов, что приводит к подвижности структуры и текстуры отрабатываемых рудовмещающих пород. Осложняет картину и наличие наполненности поровотрещинного пространства битумоидами и их присутствие в цементной массе, по всей видимости мигрировавших из рудовмещающих пород и имеющих эпигенетическую природу.

Соответственно, существенным фактором проницаемости в контексте данного исследования также можно отнести особенности реализации метода ПСВ, которые проистекают из геофизических особенностей месторождений и обуславливают их технологическое изменение. Ниже приведена сравнительная характеристика данной группы факторов по месторождениям Инкай и Моинкум (Таблица 2.3).

Наименование	Месторождение		
характеристики	Инкай	Моинкум	
Методика применения	Многос	кважинное ПСВ	
ПСВ			
Характеристика	Сернокислый с	Сернокислый с концентрацией	
технологического	концентрацией серы в	серы в пределах 13-17 кг/т,	
раствора	пределах 5—13 кг/т,	наличием в составе азота	
	наличием в составе азота		
Особенности	Разнонаправленное	Растекание вниз и за контуры	
растекания	растекание в пределах	рудоносных областей	
технологического	водоупорных прослоев		
раствора			
Коэффициент	4,4-5,4	5,5 - 7	
фильтрации (средний)			

Таблица 2.3 - Сравнительная характеристика технологических факторов изменения проницаемости месторождений Инкай и Моинкум на основании данных ГИС

Ключевым различием в перечне факторов, влияющих на изменение проницаемости на месторождении Моинкум, является повышенная концентрация серной кислоты в растворах в виду более высокой карбонатности рудовмещающих пород. Кроме того, морфологические и петрофизические особенности предполагают различия в последующем изменении характеристик месторождений в процессе отработки – влияния растекания рабочих растворов за пределы рудных тел, изменяющего контуры высокопроницаемых областей. В случае месторождения Инкай, движение за пределы скважинного пространства меняет петрохимию омываемых высокопористых пород. В случае месторождения Моинкум, движение сернокислых растворов способствует осаждению примесей в виде пленок на менее проницаемых породах [66]. Таким образом, можно выделить ряд отличительных и общих особенностей выбранных месторождений, расположенных литологических, в пределах гидрологических, тектонических И стратиграфических условий Чу-Сарысуйской ураноносной провинции.

К общим чертам можно отнести залегание рудоносных пластов в области и по направлениям ЗПО, границы которых зачастую совпадают с границами рудоносных отложений; преобладание рудоносных тел в толщах кайнозойско-мезозойских осадочных пород; высокая водонасыщенность водоносных пластов; наличие следов миграции урановых минералов в водовмещающие породы; наличие сложноструктурной многоярусной стратиграфии в плане; преобладание песчаных, глинисто-алевролитовых и песчано-алевролитовых пород в качестве рудоносных; распространенный тонкодисперсный характер урановой минерализации; наличие крупных стратиграфических ритмов, в силу залегания рудоносных горизонтов в толще кайнозойско-мезозойского чехла осадочных пород.

Наряду с вышеуказанными общими особенностями отмечены и специфические для каждого месторождения факторы, оказывающие влияние на картину проницаемости. Месторождение Инкай характеризует слоистость и гофрированность по вертикали рудоносных осложненности. говорит о существенной морфологической тел, что Присутствует неоднородность и перемежающийся контур пород с разной проницаемостью. Наблюдается достаточно большой разброс по глинистости, в силу высокодифференцированной литологофациальной картиной как по скважинному фонду в целом, так и в пределах пород, слагающих скважины. Месторождение Моинкум характеризует сложноструктурный характер урановой минерализации, связанность урановых минералов с сульфидами железа и других элементов, а также наличие высоконапорных водоносных комплексов, что предполагает преобладание петрохимических и петрофизических осложнений. Высокая проницаемость однородного песчаного репера обеспечивает миграцию и последующее осаждение урановых частиц на слабопроницаемых породах и в порах таких пород как известняк, песчаные цементы и глинистые, и песчаные алевролитные конгломераты.

48

ГЛАВА З. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО МЕСТОРОЖДЕНИЯМ ИНКАЙ И МОИНКУМ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Данные ИК в комплексе ГИС по месторождениям Инкай и Моинкум

Исходными данными на объектах изучения послужили результаты проведенных исследований методом ИК (в комплексе ГИС) по месторождениям Инкай и Моинкум. Ниже приведена таблица с характеристиками применения ИК на месторождениях Инкай и Моинкум (Таблица 3.1). Следует отметить, что на месторождениях применяется одинаковый аппаратный комплекс ИК.

Таблица 3.1 - Характеристика технологии применения ИК на месторождениях Инкай и Моинкум на основании произведенного анализа данных ГИС

Наименование характеристики	Наименование аппарата	
	ПИК-50	ИК -42
Количество зондов	1	
Качество обработки сигнала	ЦИ	фровое
Количество катушек	3	6
Диапазон измерения УЭП, мСМ/м	0-2000	10-4000
Классификация по типу частотного диапазона	низкочастотный, УС до 50Ом	
Погрешность измерения, %	(10/o _k +0,02) 100	$(10/\sigma_{\kappa}+0.05)$ 100
Максимальная рабочая температура, °С	50	80
Максимальное гидростатическое давление, МПа	10	15-35

Оба прибора, используемые на анализируемых месторождениях представлены в кислотостойком исполнении. ИК-42 работает с каротажным регистратором «Вулкан V3». Эксплуатация прибора ПИК-50 осуществляется в составе каротажной станции КОБРА, совместно с блоком сопряжения и коммутации БСК-041 или МУСО-01. Кавернометрическое зондирование осуществлено прибором СПК-01, термометрия произведена с помощью приборов ЭТС-10У, КТ-42М, ТР-43. Каротаж сопротивлений произведен с помощью аппарата КСП-ГК-43. Следует отметить, что информация для интерпретации по ГИС на месторождениях Инкай и Моинкум является статистически и аналитически неоднородной, присутствует на различных файловых носителях и в различном состоянии обработанности, что несколько усложняет процесс аналитической работы. Тем не менее, с использованием нескольких программных средств, таких

как Curve Editor, Decoder, GeoMap, есть возможность сформировать имеющиеся материалы в более однородный и приемлемый для дальнейшей аналитической работы массив данных [68].

Исходные данные по *месторождению Инкай* представлены данными по проведенным ГИС (в том числе и по ИК) по технологическому блоку A1 участка №2, скважина X1-X4. Скважинный фонд блока находится в пределах инкудукского рудоносного горизонта (Приложение В). На данном блоке особенно хорошо прослеживается влияние прослоев различной проницаемости и толщины на эффективность процесса отработки. Сказывается особенность вертикально расположенных прослоев рудовмещающих и рудоносных пород и на эффективность ИК, предполагая его комплексирование для получения достоверной дифференцирующей картины. На каротажных диаграммах нередки слабо дифференцируемые или не дифференцируемые интервалы, особенно на глубинах 10-60 м, и 110-120 м, что обусловлено характером залегания водоупорных слоев. В исследовании использованы корреляции каротажей по ИК, ТК, ТМ и КМ согласно имеющимся данным по скважинам X1, X2, X3, X4. (Рисунок 3.1)

В целом для всех анализируемых каротажных диаграмм по всем скважинам характерно резкое и ступенчатообразное увеличение кажущейся удельной электропроводности в пределах 340-380 См/м на интервале 120-160 метров, при этом УЭС в пределах 8-10 Ом*м что свидетельствует о глинистых слабообводненных слоях, что способствует лучшей дифференцировки достаточно тонких прослоев по ИК.

Данный тип глинисто-песчаных отложений можно отнести к слабопроницаемому, с величиной абсолютной проницаемости до 100 Д [65].

В то же время, данные по ГИС свидетельствуют о том, что выше и ниже находятся водонасыщенные ило-глинистые отложения, характеризующиеся порово-трещинным типом проницаемости, с удельным кажущимся сопротивлением в пределах 60-250 Ом*м.

Ниже приведена корреляция каротажных диаграмм по всем четырем скважинам технологического блока №А1, на котором хорошо просматривается закономерность аномалий по ИК, общая для всех анализируемых объектов (Рисунок 3.2).

Как видно на вышеприведенной схеме, общие аномалии распространены на сопоставимых интервалах по всем 4 скважинам, что характеризуют особенности исследуемого разреза в пределах рудоносного инкудукского горизонта, что свидетельствует о схожести в целом типа и характеристики оруденения. Наряду с ИК наиболее однородные данные получены по термометрическому методу (Тм).



Рисунок 3.1- Корреляция каротажных данных по скважинам технологического блока №А1. Масштаб: 1:2000: а) скважины Х1, Х3; б) скважины Х2, Х4



Рисунок 3.2 – Сводная корреляция каротажных диаграмм по блоку №А1. (Масштаб 1:5000). Составлена автором на основании анализа данных каротажа по технологическому блоку №А1 месторождения Инкай (АО «НАК «Казатомпром»)

Наиболее высокую коррелированность демонстрируют данные по ИК и ТМ, практически полностью совпадает резкая, ступенчатая вертикальная изменчивость кажущихся проводимостей на скважинах, что отражает тонкослоистую структуру разреза по вертикали, представленную прослоями с различной проницаемостью. Кроме того, общие характеристики обнаруживаются практически на протяжении всех интервалов и по данным кавернометрии (КМ).

На интервале закисления по скважинам X1 и X3 можно обнаружить аномалии со сдвигом вправо кривых КМ, что свидетельствует о наличии разрыхленных пород скважинного пространства, что объясняет движениями технологического раствора с одной стороны, и особенностями осадконакопления и изменения осадочной породы в процессе закисления.

Данные токового каротажа весьма скудны, однако их совпадение по имеющимся осциллограммам приходится на интервал закисления и выражено в высокой степени, что может свидетельствовать о скоплении в песчано-алевралитной и глинистой толще сопутствующих элементов (Ra, Se, Li) в результате окислительно-восстановительных процессов.

Так, можно выделить интервалы с низкой электропроводностью до 10 МСим/м – в пределах первых трех десятков метров, слабо проницаемые, далее на исследованных интервалах наблюдается характерное для инкудукского горизонта чередование слоев с различной

проницаемостью, причем у скв. X1, X4 разброс значений между слоями меньше, нежели у X2, X3. В целом на участках изменения электропроводности варьируют от 100 до 300 МСим/м, что соответствует проницаемости 0,1-1 Д (хорошо проницаемые породы).

Имеются также интервалы с высокой электропроводностью (до 800 МСим/м), представленные в порядке включений мощностью от 0,5 до 1,5 метров на интервале 317-319 м, что соответствует линзам обводненных глин и песчаников коньякского яруса инкудукского горизонта.

Следует отметить, что репером инкудукского горизонта на участке блока №А1 является глино-песчанниковые породы, с небольшим включением гравийных, а в пределах мезозойскокайнозойских отложений и алевролитовых пород.

В целом области уранового орудеинения достаточно равномерны по проницаемости, но, растекания растворов не предполагает обширной диффузии в вышележащие водоносные толщи, в силу порово-трещинного строения и наличия послойной структуры, чередующихся по величине проницаемости пород околорудного пространства.

Входные данные по месторождению Моинкум представлены информацией по ГИС по технологическому блоку №В1, расположенному в пределах уюкского рудоносного горизонта (Приложение Г). Морфолитологические и петрофизикохимические особенности анализируемого блока №В1 несколько отличаются от прочих технологических блоков месторождения поскольку особенностью месторождения Моинкум является залегание рудоносных тел на одном и том же участке в пределах двух рудоносных горизонтов. По данному блоку имеется наиболее обширная информация по проводённым ГМИС.

Особенностью залегания урановых руд является тонкодисперсность и распространения в водонасыщенных слоях, обилие трещинового типа коллекторов, что накладывает определенные ограничения не только на проведение и интерпретацию ИК, но и на стандартные ГИС.

На каротажных диаграммах слабо дифференцируются области оруденения в виде наплывов и пленок, особенно на глубинах 10-60 м, 110-120 м и 230-245 м, что обусловлено характером залегания водоносных, водонасыщенных и водоупорных слоев. На некоторых интервалах присутствуют видимые разрывы, характеризующие условия, запредельные для дифференцировки методом ИК.

Следует отметить, что в целом технологический процесс отработки урановых залежей на месторождении Моинкум отличает большее количество погрешностей при мониторинге, сложность дифференцировки рудовмещающих тел и околорудного пространства, весомое влияние гидродинамики участка, что предполагает более широкое растекание технологических растворов, чем на блоке №А1 месторождения Инкай.

Достаточно отчетливо прослеживается наличие вышележащих областей закисления относительно однородных слоев с УЭС в пределах 50 Ом*м, песчано-глинистым и глинистым слоям уюкского горизонта.

Вышележащие песчано-глинистые и песчаные слои существенно обоводненны, в нижележащих слоях имеются тонкие прослои (до 2-3 метров и менее) ураноносных песчаниковых интервалов.

На всей вертикали области закисления отмечаются осложнения в виде среднезернистых гравийно-песчаных прослоев, а также тонких линз битумных и известняковых включений. Названные особенности в той или иной мере, характерны для всего технологического блока №В1, лежащего в пределах уюкского рудоносного горизонта.

В аналитической картине месторождения Моинкум присутствует большая однородность, соответственно, несмотря на весомую петрофизическую осложненность, имеется возможность произвести интерпретационную оценку данных по проведенным ГИС.

Как и в случае с данными месторождения Инкай, были использованы программные среды Decoder, Curve Editor, Geo Wave. В Приложении Д представлены корреляции комплекса каротажей по скважинам У1, У2, У3, У4.

Следует отметить, что по данным каротажных паспортов проанализированы глубины с шагом в 2 м, так как детализированные данные по Las файлам были утерены в результате сбоя баз данных.

Касательно стандартных методов геофизического исследования, в условиях существенной обводненности рудоносных толщ и всего горизонта в целом, на месторождении Моинкум применяется в числе прочих методов также ПС и ГК.

На основании различия в литологостратиграфическом строении, были сгруппированы и составлены отдельно колонки для скважин X1-X3 и скважин X2-X4 (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Данные для моделирования со стратиграфической колонкой (месторождение Инкай, скважины X1, X3)

Интервал по ИК	Значение по ИК, (ед.изм), мСм/м	Литология	Условная проницаемость	Кф (ед.изм.), м/сут
7-13	10-40	глина темно-серая плотная	непроницамые	$< 5 \cdot 10^{-5}$
		песок зеленовато-серый.		
13-14	40-100	мелкозернистый	слабопроницаемые	0,5
14-23	40-200	песок зеленовато-серыи. среднезернистый	проницаемые	34
24-25	10-20	прослои тонкие глин	волоупор	$< 5 \cdot 10^{-5}$
26-36	меньше 10	плотных серых		$< 5 \cdot 10^{-5}$
37-39	от 20 до 100			
39-91	200-400			
92-142	300-400	-		
143	40-100			
143-183	200-500			
183-184	100-200			
184	40-100			
186-194	20-40	песок среднезернистый		
195-197	40-100	серый, зеленоватый с	высокопроницаемые	
198-218	100-200	гравиев и алевролитов		
219-281	40-100			
282-283	100-200			
283-285	200-300			
286-296	100-200			
296-304	40-100			
305-308	100-200			
309-316	40-100			34-36
		глина песчаная плотная	водоупор	_
317	-17,-61	серая		$< 5 \cdot 10^{-5}$
317	200-300	пески среднезернистые	высокопроницаемые	
317	300-400	отсортированные		
317-318	40-100			36
318	800	обводненный прослой	массопереноса	78
319	от100 до 400			34
320-327	40-100	прослои тонкие песков с	проницаемые	34
328-332	100-200	разпозерпистым гравием		34

Аналогичным образом сформирована скоррелированная с данными ГИС стратиграфическая колонка для скважин Х 2 и Х4 месторождения Инкай (Таблица 3.4)

Таблица 3.4. - Данные для моделирования со стратиграфической колонкой (месторождение Инкай, скважины X2, X4)

Интервал по ИК	Значение по ИК, мСм/м	Литологическая характеристика	Код подтипа	Характеристика проницаемости	Кф, м/сут
		глина темно-серая			
7-13	10-40	плотная	1	непроницамые	5 -2
13-14	40-100	песок зеленовато-серый. Мелкозернистый	2	слабопроницаемые	0,5
14-23	40-200	песок зеленовато-серый. среднезернистый	3	проницаемые	34
24-25	10-20	прослои тонкие глин	1		
26-36	меньше 10	плотных серых	1	водоупор	5 10-3
37-39	от 20 до 100	песок разнозернистый зеленоватый	8	проницаемые	32
58-79	200-300		4		
80-82	300-400		4		
83-89	200-300		4		
90-119	300-400		4	высокопроницаемые	
120-126	400-500		4	высокопропицаемые	
127-139	300-400		4		
140-152	200-400	Песок разнозернистый	4		
153-168	300-400	серый, зеленоватый с	4		36
169	400-500	неоднородными	4	anafanna ann a	
170	200-300	прослоями гравиев и	6	слаоопроницаемые	0,6
171-172	100-500	алевролитов	4		
173-175	300-400		4		
176-183	400-600		4		
184	100-200		4	высокопроницаемые	
185-193	40-100		4		
194-206	100-400		4		
207-214	100-200		4		38
215-217	40-100		7		
218	100-200		7		
219-280	40-100	пески	7		
281-297	100-200	среднемелкозернистые	7	слабопроницаемые	
298-304	40-100	неотсортированные	7		
305-316	100-200		7		
317-328	40-100		7		0,4

Сформированный массив данных наглядно показывает существенные различия в фациальных характеристиках проницаемости двух групп скважин одного блока месторождения. Аналогичным образом сформированы данные и для скважин У1-У4 месторождения

Моинкум. По данному месторождению группировка исследуемых скважин не потребовалась, так

как электрофациальная картина, как и литолого-стратиграфическая обстановка весьма однородна (Таблица 3.5)

	Значение		Код		
Интерва	по ИК,	Литологическая	литологического	Характеристика	Кф.
л по ИК	мСм/м	характеристика	типа	проницаемости	м/сут
1	2	3	4	5	6
		глина желтая,		слабопроницаемы	
70-136	40	темная	1	e	5 -2
131-137	400-500		2		
138-139	100-200	отсортированные	2		
140-143	400-600	среднезернистые	2		
144-149	200-300	пески зеленовато-	2		
150-157	40-100	серые	2	высокопроницаем	
158-169	100-200		2	ые	42
171	70	прослойка	4		
		мелкозернистых			
172-175	100	песков	4	проницаемые	5
176-183	200-300	отсортированные	2		
		среднезернистые			
		пески зеленовато-	-		
184-187	100-200	серые	2	-	
		среднезернистые			
188-195	200-300	пески зеленовато-	3		
		серые с			
		отсортированной			
		гравийной		высокопроницаем	
196-213	150-320	примесью	3	ые	36
		мелкозернистые			
214-239	40-100	пески	4	проницаемые	4,8
40-241	140	среднемелкозерни	6		
		стые пески	-		
243	90	зеленовато серые	6		
		среднезернистые			
		пески зеленовато-	_	высокопроницаем	
244-249	140-360	серые	5	ые	34

Таблица 3.5. - Данные для моделирования со стратиграфической колонкой для месторождения Моинкум

Следует отметить, что толща ниже отметки 135 метров в той или иной степени несет следы оруденения, что видимо, связано с особенностями структурно-текстурного типа месторождения и растекания растворов в однородной массивной толще.

Кроме того, для модели были использованы следующие дополнительные показатели, необходимые для расчета в рамках выбранного математического аппарата (Таблица 3.6).

Наименование показателя	Месторождение Инкай (скв.Х1, Х3)	Месторождение Инкай (скв.Х2, Х4)	Месторождение Моинкум
Средняя длина	6	5	7
фильтра, м			
Азимут (град.)	193,9	193,9	187,4
Дебит раствора,	10	7,5	14,2
ку.м./ч			
Проницаемость	0,4	0,1	0, 5
рудовмещающей			
породы, мкм			
Коэффициент	5,4	4,4	7
фильтрации			
(средний по			
скважинам)			
Глинистость, %	40	20	20
Пористость, %	35	16	28

Таблица 3.6 – Дополнительные данные для моделирования на основании данных ГИС

В отношении рабочего раствора были использованы следующие данные (Таблица 3.7)

Таблица 3.7 – Параметры сернокислого раствора на месторождениях Инкай и Моинкум соласно технологическому паспорту АО «НАК «Казатомпром»

	Месторождение	
Параметры раствора H2SO4	Инкай	Моинкум
Динамическая вязкость, мПа	17,2	21
Плотность, кг/м.кв.	1005	1007
Концентрация	1,30 %	1,70 %
Молярная концентрация, моль/м.куб.	6000	7000

Дополнительные данные по таким параметрам представлены в Приложениях Д-Е.

Данные по месторождениям Инкай и Моинкум наглядно демонстрируют реально существующие условия реализации ГИС в среде весьма отличной от модельной. Неоднородность и прерывистость данных на исследуемых интервалах в условиях ПСВ проистекает из сложных структурно-текстурных петрофизикохимических свойств пород, их фациальной неоднородности, что в целом является данностью для промышленной добычи урана закрытым способом. Однако, применение ИК делает возможным использования информации об изменении проницаемости не только для диагностики, но и для мониторинга и прогнозирования [69].

3.2 Методология моделирования движения жидкостей на месторождениях Инкай и Моинкум по данным индукционного каротажа

На различных этапах отработки рудоносных залежей, вектор исследований и перечень проблемных вопросов существенно различается.

На этапе активной отработки месторождения при устоявшемся гидродинамическом режиме, важное значение приобретает оценка движения жидкостей в подверженных изменениям структурах продуктивного пласта [69, 70]. Соответственно, в контексте данного исследования возникла необходимость формирования физико-математической модели растекания растворов на основании данных ГИС в условиях пластово-инфильтрационных месторождений, в пределах которых структурно-текстурный тип может существенно меняться.

На современном этапе существует огромное количество программных продуктов, обеспечивающих автоматизированное моделирование различных геофизических и геохимических процессов в пласте – Petrel, Comsol Multiphisics, Matlab Simulink и т.д. [71]. Но, их применение имеет как свои ограничения, так и сложности.

В первую очередь, при применении мощных интегрированных системных сред, таких как Petrel, требуется серьезное увеличение эксплуатационных затрат, как по кадрам, так и по используемым техническим ресурсам в силу необходимости применения высокомощного, сложного и дорогостоящего компьютерного оборудования, подверженного крайне высокому и быстрому износу в процессе эксплуатации. Как правило, целесообразность моделирования на автоматизированных станциях такого типа ограничивается этапом разведывательных мероприятий и сложно реализуется в условиях отработки месторождения [72].

Во-вторых, очевидным ограничением является специфика процесса моделирования на автоматизированных станциях, выраженная в следующем:

-жесткие ограничения по полноте, однородности и перечню входных данных, которые в условиях реально функционирующего скважинного комплекса достаточно сложно реализовать;

-работа только с комплексными данными по ГИС, что также не всегда возможно обеспечить в условиях ПСВ. При этом численные алгоритмы с небольшим перечнем данных можно легко организовать в более простых при эксплуатации системах;

-необходимость адаптации модельных параметров вручную, в условиях неоднородности сред в пределах технологического блока.

В условиях ПСВ непрерывность процесса работы закачно-откачного оборудования скважин является основополагающим фактором рентабельности. Соответственно, с

возрастанием количества производимых ГИС увеличиваются эксплуатационные затраты и рентабельность снижается.

Следовательно, автоматизированные системы моделирования не всегда могут достоверно спрогнозировать движения жидкостей в уже подверженных изменениям областях закисления. Особенно актуальна данная проблема для сложных слоистых сред. Достоверность достаточно длительного процесса вычисления базируется соответственно и на адекватности выбора модели и ее компонентов, а при необходимости - их перенастройки. Длительность расчетов и необходимость масштабирования и выбора методики сглаживания численных различий в фактических и моделируемых показателях усиливает потребность в точности и полноте входных данных. Очевидно, что в условиях отработки месторождений пластово-инфильтрационного типа, регулярность применения и эффективность как средства мониторинга автоматизированной системы может быть сомнительна. Следовательно, вопрос численного моделирования растекания растворов при ПСВ остается темой, открытой для научных изысканий и дискуссий. Кроме того, ранее были было выявлено, что ИК обладает достаточно высокой достоверностью, возможностью регулирования разрешающей способности путем модификации аппаратуры и позволяет выявить различия в проницаемости прослоев, пересекающих скважину.

Эти возможности делают ИК весьма перспективным методом определения и прогнозирования характера растекания жидкости в продуктивной толще. Особенный интерес представляет возможность использования ИК в тех случаях, когда данные инклинометрии и гамма-каротажа не позволяют судить о динамике процесса ПСВ и фрагментарны по площади расположения скважин.

Стоит отметить достаточно небольшое количество публикаций и научно-специальной литературы, посвященной математическому моделированию аспектов подземного скважинного выщелачивания на месторождениях пластово-инфильтрационного типа. Тем не менее, теоретико-методической базой моделирования послужили разработки таких авторов как Канцель А.А. (в части иерархического разбиения элементов модели), Кисин Ю.К., Оракбаев Е.Ж., Никитенко М.И. – посвященных контролю и моделирвоанию ПСВ на месторождениях урана, а также методические пособия и указания для математического и численного моделирования внутрипластовых процессов [69, 71-74].

Соответственно, в рамках данного диссертационного исследования при разработке модели растекания жидкости в процессе ПСВ поставлена цель: разработать модель описывающую вектор растекания жидкости в продуктивном пласте и характер массопереноса в процессе ПСВ по данным индукционного каротажа [75].

При разработки модели нами была учтена необходимость учета разброса проницаемости, которая имеет дифференцировку преимущественно по вертикали. Допущение вертикальной

дифференцировки различий в проницаемости является первым и основополагающим допущением разработанной модели.

На основе изучения литолого-фациальной картины объектов моделирования сформировано следующая **группа допущений**, зависящих от глубины:

-экспоненциальная зависимость неоднородности от глубины;

- экспоненциальная зависимость проницаемости от глубины.

По данным ИК отчетливо прослеживается различие в картине проницаемости как по месторождению Инкай и Моинкум, так и в пределах самого блока А1 месторождения Инкай - по скважинам X1,X3 и скважинам X2,X4.

Следующим **допущением** является соблюдение отношения коэффициента проницаемости и коэффициента фильтрации, которые признаются численно равными, так как температуры в среднем по объектам исследования не превышают 27-28 °C.

3.3 Методы моделирования движения жидкости на месторождениях Инкай и Моинкум

С учетом выявленных зависимостей нами был разработан коэффициент разброса проницаемости, характеризующий вариабельность или распределение показателей электропроводности рассчитываемый по следующей выведенной формуле:

$$\Delta \sigma (\text{распред.прониц}) = \frac{\text{Li}}{|\text{D}\sigma|}$$
(3.1)

Где:

Li-длина интервала орудинения;

|D σ |- коэффициент однородности электропроводности по модулю, расчитанный как отношение длины разреза на интервале орудинения к количеству неоднородных интервалов.

Для расчета характеристик растекания раствора и далнейшей выработки рекомендаций, сформирована гипотеза о тождестве коэффициента однородности электропроводности и коэффициента проницаемости.

$$|\mathbf{D}\sigma| = |\mathbf{D}\mathbf{k}| \tag{3.2}$$

Данный показатель разработан на основе эмпирического опыта реализации ИК на объектах моделирования и вводятся в математический аппарат расчета растекания растворов в зоне закисления впервые в данном исследовании. Данный показатель необходим для

определения степени достоверности используемой модели для различных типов промышленного оруденения по данным ИК.

Следующим важным условием разработки модели является гипотеза об априорной зависимости распределения показателей ИК и проницаемости.

Данная зависимость основывается на закономерностях изменении сопротивлений в дифференцированной по электрическим свойствам горизонтально-слоистой среде. Контрастность электрического сопротивления водонепроницаемых и водоупорных пропластков достаточно весома, что позволяет выявить зоны различные по исходным характеристикам проницаемости. В процессе отработки меняются электрические условия в прискважинном в пространстве по мере проникновение низкоомного раствора и его замещении пластовой воды, в результате чего сопротивление высокопроницаемых слоев снижается и соответственно увеличивается проницаемость, которая прямо пропорциональна увеличивающейся электропроводности. В непроницаемых и слабопроницаемых слоях (глин, сцеменитрованных глинисто-иловых и глинисто-алевралитных песках, твердых породах), проницаемость практически не меняется, что позволяет дифференцировать области охваченные действием раствора и прогнозровать дальнейшее его растекание [76].

В связи с органичениями в дифференцировки высокоомных пород свыше 550 Ом*м аппаратурой стандартного (низкочастного ИК), исходя из эмперического опыта проведения ИК на месторождениях Инкай и Моинкум, нами принято допущение, что высокоомные области являются в целом маломощными. В условиях отработки области с пассивными по ширине высокоомными пропластками углефицированной органики, плотносцементированных кварцевых песков и наличием широко распространенных известняковых блоков, при сочетании диффузного (бедного) оруденения применение разработанной модели в неоптимизированном виде ограничено.

Разработанная нами модель является многокомпонентной, учитывающей влияние исходных геофизических условий, гидромеханики пласта, закономерностей изменения электрических свойств пород в результате выщелачивания и собственно параметров выщелачивания.

Разработанная модель в общей структуре опирается на теорию фильтрации, которая принимает фильтрационные процессы происходящие в рудоносной толще как статические [77-80].

Эмпирически на объектах исследования доказана взаимосвязь между проницаемостью и показателями ИК. Выведем численную закономерность изменения ИК в процессе выщелачивания, опираясь на законы и положения теории фильтрации, электромагнитные свойства пород, а также особенности массопереноса в твердых телах.

62

Скорость фильтрации и средняя скорость движения потока жидкости связаны отношением:

$$v = W/m \tag{3.3}$$

$$\Gamma \partial e:$$

υ – скорость движения жидкости;

W- скорость фильтрации

т – модельная скорость в идеальной среде

Так как линейная зависимость между объемом несжимаемой жидкости и падением напора выраженная через коэффициент фильтрации имеет вид:

Где Сі – коэффициент фильтрации,

и коэффициент фильтрации зависит от свойств пористой среды и проницаемости, то выразим закон Дарси через коэффициент проницаемости:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K} W \tag{3.5}$$

Где:

 $\frac{dp}{dx}$ - градиент давления;

μ - коэффициент динамической вязкости

w – скорость фильтрации

К- коэффициент проницаемости

Градиент давления согласно Закону Дарси:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{w\mu}{k} \tag{3.6}$$

Где:

 Δp - градиент давления;

L –длина интервала.

Отсюда коэффициент проницаемости к:

$$\mathbf{k} = \mathbf{w} \boldsymbol{\mu} \frac{L}{\Delta p} \tag{3.7}$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{w} \boldsymbol{\mu} \frac{L}{\Delta p} = |\mathbf{D}\mathbf{k}| = |\mathbf{D}\boldsymbol{\sigma}| \tag{3.8}$$

Так как мы исходим из допущения о вытеснении раствором воды из порового пространства водонасыщенной проницаемой продуктивной толщи, то справедливо применение фомулы для вычисления относительной фазовой проницаемости, состоящей из двух фаз – низкоомного раствора и воды в поровом пространстве, зависимость проницаемости от данных индукционного каротажа выразим следующим образом:

1. Соласно закону Арчи для пористиой среды зависимость удельного поверхностного сопротивления породы представленно формулой:

$$F = \frac{p}{p_0} = \frac{\vartheta^2}{n},\tag{3.9}$$

Где

F- параметр пористости

р, ро –удельное электрическое сопротивление породы и раствора соответственно

Электрическая извилистость

n – пористость породы.

2. Зависимость удельного кажущегося электрического сопротивления от удельной кажущейся электропроводности прямо пропорциональна и выражается через уравнение:

$$F = \frac{\vartheta^2}{\eta} = -\frac{\sigma}{\sigma \, 0} \tag{3.10}$$

3. Приняв вектор растекания как радиально-куполообразный (с растеканием, выраженным – по вертикали и менее выраженным – по латерали), получим уравнение, учитывающее анизотропный характер неоднородной среды:

$$\mathbf{J}_{\mathbf{i}} = \sum_{k=1}^{3} \sigma_{ik E_{k}} \quad \text{или } \mathbf{J}_{\mathbf{i}} = \sigma_{\mathbf{i}} \mathbf{E}_{\mathbf{i}} \tag{3.11}$$

Где:

 J_i – вектор плотности тока

σ_{і-}главные значения тензора 2-го ранга удельной проводимости;

Е_і-вектор напряженности;

С учетом анизотропной среды с нелинейной зависимостью вектора плотности от вектора напряженности примем за базовое дифференциальное уравнение вида:

$$\sigma_{i\kappa} = \frac{dJi}{dE_k}$$
(3.12)
 Γ_{IIE} :

σ_{ік –} тензор удельной электропроводности 2-го порядка.

4. Тогда зависимость электропроводности от проницаемости в анизотропной неоднородной среде выразим следующим выражением через тензор удельной электропроводности;

$$k = \frac{dJi}{dE_k} = \sigma_{iK}$$
(3.13)

Однако среда выщелачивания в опытной практике отличается от модельной (совершенной) как допущениями, так и вариацией условий физико-химических процессов. Соответственно разработанная нами модель в части процесса фильтрации пород под воздействием гидродинамического влияния ПВ в реальных условиях принимает вид динамической системы замкнутого контура, в которой вариация фильтрации по показателям скорости и дальности растекания описывается формулами подземной гидромеханики. Поскольку в моделируемой системе существуют подсистемы фильтрационного процесса в породе, взаимодействия раствора оказывающего влияние на исходные фильтрационные свойства, гидромеханический компонент модели выглядит следующим образом.

На месторождениях Инкай и Моинкум принята гексагональная система позиционирования скважин, предполагающее равенство закачиваемых и откачиваемых растворов при непрерывности процесса ПСВ, что предполагает равнодебетный режим закачного и откачного оборудования:

$$\sum_{1=1}^{n} Q_1 + \sum_{2=1}^{m} Q_2 = 0, \tag{3.14}$$

Где:

*Q*1 – дебит закачных скважин,

Q2 – дебит откачных скважин

Длина фильтра на объектах исследования меньше расстояния между скважинами на исследуемых объектах, соответственно принимаем формулу площади растекания по вертикали:

$$S = \frac{Q}{4\pi k \phi_{unbmp}} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x+a)^2 + y^2}} \right)$$
(3.15)

Выведенная зависимость между проницаемостью и коэффициентом фильтрации, проницаемостью и электропроводностью позволяет преобразовать выражение следующим образом:

$$S = \frac{Q}{4\pi\Delta\sigma} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x+a)^2 + y^2}} \right)$$
(3.16)

Где:

Δσ – коэффициент однородности интервала закисления

При дальнейшем моделировании растекания, процесс признаем, как нестационарный, диффузный, закономерность которого подчинена второму закону Фика:

$$\frac{(C_{(x,t)} - C_0)}{C_s - C_0} = 1 - erf(\frac{x}{\sqrt[3]{dt}})$$
(3.17)

Поскольку массоперенос на границе твердой и жикой фазы формируется под воздействием линейного закона фильтрации и зависимости о от проницаемости, то получим следующее уравнение изменения породы на границе закисления:

$$\Delta \mathsf{K} \varphi = -\frac{1}{-\Delta \sigma} \frac{\Delta Cm}{\Delta t}, \tag{3.18}$$

Где:

∆Кф- скорость изменения фильтрации на границе неокисленной породы

-Δσ - поверхностное электрическое сопротивление породы;

С_м-концентрация урана в твердой фазе

Здесь следует отметить, что достоверно известно время перехода анионного уранилтрисульфата, образуемого под воздействием серной кислоты в сорбционную зону при различных показателях pH составляет от 100 до 10 000 минут. Так, при pH менее 2 данный показатель составляет порядка 100 минут, при 2- 3,6 – около 500 минут, свыше 4,9 – до 10 000 минут [78].

Показатель рН:

-для месторождения Инкай – 6,2

-для месторождения Моинкум -6.7

Соответственно, скорость сорбции сернокислого уранила составит порядка 10 000 минут.

На основании закона фильтрации Дарси получим систему уравнений, описывающих распределение раствора в продуктивной толще:

1) Уравнение гидродинамического процесса:

$$\frac{\Delta F}{\Delta t} - div \left(\Delta \sigma \left(\frac{p}{pg} \right) \right) + Fw C_m C_r \overline{C_m} \ \overline{C_r} = -\sum Q_{\sigma \delta} \left(x - x_{\sigma,y} - y_{\sigma,z} - z_{\sigma,y} \right) + \sum Q_{d \delta} \left(x - x_{d,y} - y_{d,z} - z_{d,y} \right)$$

$$(3.19)$$

2) Уравнение изменения проницаемости породы;

$$\Delta \sigma = -\frac{1}{\Delta pk} \frac{\Delta Cm}{\Delta t}, \tag{3.20}$$

3) Уравнение диффузного массопереноса по Стефану-Максвелу;

$$\mathbf{J}_{i} = \rho \omega \mathbf{i} \sum_{k} D_{ikdk-D_{i}^{T} \nabla \ln T}$$
(3.21)

4) Уравнение изменения скорости фильтрации

$$\Delta v = \frac{v}{\sigma} * \Delta \kappa \phi \tag{3.22}$$

Для решения задачи определения площади растекания используются различные формулы, отражающие входные данные на объекте, например:

Уравнение площади растекания по вертикали с учетом коэффициента фильтрации:

$$S = \frac{Q}{4\pi K \phi} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x+a)^2 + y^2}} \right)$$
(3.23)

Так как мы исходим из прямой линейной зависимости однородности фильтрации проницаемости, и в свою очередь – проницаемости и электропроводности, то в случае подтверждения гипотезы о данной тождественности, целесообразно использовать коэффициент однородности в качестве поправочного в соответствии с учетом выявленной нами типологии структурно-текстурного типа. Согласно данному предположению значение коэффициента прямо пропорционально площади растекания раствора в результате разработки месторождения.

Иерархическая структура модели включает последовательность учета компонентов физико-математического аппарата описывающего элемента замкнутого динамического процесса в котором эффект массопереноса в кинетическом подкомпоненте модели признан нами как эффект с экспоненциальным простым накомплением (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3. – Ирерахическая структура разработанной модели

В соответствии с допущением о том, что проницаемость зависит от структурнотекстурных свойств породы, а данные ИК прямо пропорциональны проницаемости и на основе определения границ растекания технологического раствора можно определить область предпологаемого регенирированного оруденения.

Известно, что сернокислый уранил выкристаллизовывается в виде UO₂SO₂ в условиях слабощелочной среды рассматриваемых месторождений достаточно медленно [81-83]. В условиях отработки месторождения Моинкум более концентрированный раствор серной кислоты несколько повышает скорости, но в незначительной степени.

Площадь увеличения ИК по вертикали являются **выходными** данными модели и описывают искомые характеристики для принятия решений об оптимизации процесса подземного выщелачивания.

Входными данными модели являются параметры геофизических условий продуктивного пласта, результатов геофизического исследования скважинного пространства, и особенностей процесса выщелачивания. В качестве входных данных были приняты данные по ИК, сгруппированные в стратиграфические колонки, представленные в п.3.1.

Разработанная модель в дальнейшем может служить:

- основанием для развития прикладных методов численного моделирования растекания жидкостей в продуктивном пласте на месторождениях пластово-инфильтрационного типа;

-основанием для ручной перенастройки параметров моделирования процесса растекания в автоматизированных системах.

Критерием качества модели выступало соблюдение следующих условий:

-адаптивность - возможность оптимизировать модель и ее компоненты под различные частные условия исследуемой зоны оруденения – участка, блока, ячейки;

-репрезентативность – охват физико-математическими параметрами модели наиболее значимых взаимосвязей факторов проницаемости;

-гибкость – возможность дальнейшего совершенствования в рамках развития научноприкладных основ математического моделирования процесса ПСВ на месторождениях урана пластово-инфильтрационного типа;

-возможность использования при неполноте и неоднородности данных по ГИС при условии наличия полноты данных по ИК.

Разработанная модель позволила выявить уточненную картину растекания растворов при осложненных литолого-фациальных условиях и статистической неполноте данных по комплексу ГИС.

ГЛАВА 4. ФАКТОРЫ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА В УСЛОВИЯХ ГИДРОГЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЙ И МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ОСЛОЖНЕННОСТЬЮ

4.1 Влияние особенностей проницаемости на индукционный каротаж на месторождениях Инкай и Моинкум

В соответствии с особенностями петрофизического и морфологического строения рудных интервалов, можно следующим образом охарактеризовать проблемные моменты использования ИК в условиях мониторинга отрабатываемых уранорудных участков на месторождениях Инкай и Моинкум:

А. Монотонность в глубинных интервалах месторождения Инкай указывает на морфологическую осложненность и тонкослоистость вмещающих сред, как ведущий фактор снижения эффективности ИК;

Б. Рассматривая особенности использования ИК на месторождении Инкай, в первую очередь, следует отметить, что имеются не только отклонения, но и целые интервалы, по которым не были получены каротажные данные, что свидетельствует о высокой степени влияния ограничивающих факторов на применение метода индукционного каротажа;

В. На месторождении Моинкум осложняющим фактором является проблема миграции ураносодержащих растворов в вертикально-горизонтальном направлении в процессе отработки, что несколько снижает информативность оценки М_{эфф} по данным ИК.

В случае тонкослоистых сред месторождения Инкай возможностью повышения эффективности данных может стать повышение частотного диапазона при проведении ИК. Несмотря на то, что использование повышенных частот для повышения эффективности ИК в условиях тонкослоистых сред достаточно широко освещается в научной литературе, тем не менее, на практике при всем многообразии модификаций аппаратного обеспечения высокочастотные аппараты до сих пор используются редко в условиях урановых месторождений АО «НАК «Казатомпром». Причины тому лежат в области экономико-технической целесообразности. Каротажные работы с имеющимся оборудованием проводятся на месторождениях с недостаточной регулярностью в силу следующих факторов:

-избегания экономических потерь в период просушки и простоя скважины;

- малая в целом экономическая отдача при высокой стоимости эксплуатационных затрат на содержание ОС;

-увеличение затрат на приобретение нового оборудования.

Тем не менее, актуальные задачи по сохранению рентабельности производства и управления балансовыми залежами позволяют говорить о необходимости разработки эффективного метода использования ИК и интерпретации данных в рамках модели движения растворов, что позволит повысить эффективность ИК в рамках использования уже имеющегося оборудования [1, 69].

Факторы проницаемости, формируемые совокупностью петрофизических, петрохимических и морфологических характеристик разрабатываемого участка оказывают влияние на особенности технологического процесса ИК, определяя характеристики аппаратного обеспечения, частотный диапазон, применяемый при зондировании и модель позиционирования зондов относительно площади участка (Рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Группировка факторов, оказывающих влияние на результативность ИК на урановых месторождениях по данным анализарезультатов, ГИС месторождений Инкай и Моинкум Таким образом, исходные геофизические параметры исследуемого рудоносного участка являются первой и основополагающей группой факторов, влияющих на результативность ИК, а технологические возможности и особенности того или иного способа применения ИК - второй группой, определяемой первой. При этом, технологические нюансы отработки на том, или ином месторождении, находящиеся в зависимости от исходных геофизических условий также могут оказывать влияние на результативность ИК, меняя со временем с одной стороны, петрофизические условия скважинного и околоскважинного пространства, и с другой стороны, создавая помехи для применения ИК в ряде случаев.

Петрофизические свойства потенциально могут в разной степени оказывать влияние, как на электропроводность пород, так и на проницаемость, особенно в условиях, когда блок находится на стадии активной разработки и технологические особенности этого процесса уже оказали некоторое воздействие на породы. Соответственно, при использовании ИК как метода мониторинга на уже функционирующем блоке, особенно на поздней и зрелой стадиях разработки, к качеству достоверности получаемых данных и точности измерения, требования несколько выше, чем при использовании в комплексе ГИС при геологоразведочных работах.

Ниже представлена сравнительная таблица влияния петрофизических свойств пород месторождений Инкай и Моинкум на процесс ИК (Таблица 4.1)

Таблица 4.1 – Влияние петрофизико-химических осложнений на месторождениях Инкай и Моинкум на результативность ИК на основании анализа данных ГИС

Наименование	Месторождение		
фактора	Инкай	Моинкум	
Тип глинистости	Вариация проницаемости пород	Зависимость проницаемости от	
	вплоть до 1000 Д при дискретных	обводненности глинистых пород	
	глинистых осаждениях, что не		
	свойственно глинистым породам		
Состав	Осаждение сульфидов железа на	Зависимость проницаемости от состава и	
присутствующих	поверхности пород в процессе	пористости алевролитных отложений,	
пород	отработки растворами серной	снижение дифференцировки в виду	
	кислоты, что создает	приближенных значений в	
	электромагнитные помехи	электропроводности известняковых и	
		битумных материалов	
Фациальная	Низкопластичные породы,	Увеличение проницаемости по	
характеристика	увеличивающие влияние		
рудоносных	анизотропии по вертикальным	вертикали и по горизонтали	
горизонтов	направлениям		

Рассмотрим подробнее каждый упомянутый выше фактор влияния на результативность ИК. От величины кристаллических вкраплений и их распределения зависит проницаемость пород, от характера которой в свою очередь зависит точность дифференцировки разреза по данным ИК, в силу широкой вариации УЭС его компонентов.

Глинистые отложения в плотном скелете пород осложняют выявление типа пород и электрофациальную дифференцировку. Наличие структурированных глин предопределяет зависимость точности дифференцировки сигнальных данных от водонасыщенности глин. Кавернозные образования, также увеличивая водонасыщенность, увеличивают и удельную электропроводность [65, 66].

Высокодифференцированные текстурно-структурные качества пород, в большей степени характерные для месторождения Инкай, предполагают влияние анизотропии на результативность ИК. Для месторождения Моинкум характерная массивность крупных стратиграфических ритмов, однородность песчаного репера, но, с присутствием алевралитов, что обуславливает возможность влияния анизотропии как по вертикали, так и по горизонтали. Особенности проницаемости на месторождениях Инкай и Моинкум обусловлены также и морфолитологическим строением пород [67] (Таблица 4.2)

Таблица 4.2 - Сравнительная характеристика морфолитологических и гидрологических осложнений на процесс ИК на месторождениях Инкай и Моинкум на основании анализа данных ГИС

Наименование	Месторождение		
фактора	Инкай	Моинкум	
Фациальная картина	Наличие тонкослойных перешеек	Повышенная проницаемость	
Глубина залегания	разной проницаемости, плохо	Снижение информативности ИК в виду	
	дифференцируемых на	термобарических факторов	
	диаграммах ИК		
Морфология	Вертикальный профиль залегания	Тонкодисперсная структура	
рудоносных тел	обусловливает увеличение	рудоносных тел осложняет	
	глубины залегания и	дифференцировку	
	соответственно -снижение		
	информативности ИК в силу		
	термобарических факторов.		
Характеристика	Распределение высоких напоров в	Существенное снижение емкостных и	
влияния	пределах продуктивных	фильтрационных свойств	
гидрогеологических	горизонтов увеличивает	высокопористых пород, снижение	
факторов	гидродинамические и	информативности из-за	
	гидробарические факторы,	гидробарического влияния	
	осложняющие диагностику		
	методом ИК особенно		
	вышележащих слоев		

Лентообразные рудные тела месторождения Иинкай способствует снижению информативности ИК, в силу применения стандартной аппаратуры, работающей на низких частотах (ИК-42, ПИК 50), поскольку низкочастотные сигналы слабо дифференцируют тонкие перешейки и перегибы. Диагностическую ситуацию осложняет и наличие высокого пластового давления, которое в принципе является фактором, ограничивающим информативность ИК.
Картина осложненности по месторождению Моинкум в отношении гидрологического фактора схожа, обуславливая влияние термобарических факторов на информативность ИК. Кроме того, однородность и в целом хорошая проницаемость песчаного репера в сочетании с термобарическими факторами осложненности может снижать качество дифференцировки масштабов растекания растворов.

4.2 Влияние технологических факторов изменения проницаемости на данные индукционного каротажа

В процессе ПСВ может существенно меняться как петрохимический состав пород, так и текстурно-структурные свойства. Кроме того, на качество дифференцировки по ИК оказывают влияние процессы кольматации, выраженность которых зависит не только от глинистости рудовмещающего прослоя, но и параметров режима выщелачивания и состава и скорости подачи раствора.

Ниже представленная сравнительная характеристика технологических факторов изменения проницаемости и их влияние на процесс ИК по месторождениям Инкай и Моинкум (Таблица 4.3).

Табли	ща 4.3 - Техноло	огические фактор	ы осложенности,	оказывающие	влияние на	процесс
ИК месторо	кдений Инкай и	Моинкум на осн	овании анализа д	анных ГИС		

Наименование	Место	орождение		
характеристики	Инкай	Моинкум		
Методика применения ПСВ	Изменение структуры и текстуры рудовмещающих и рудоносных пород, и как следствие – изменение их проницаемости, электрофациальных и иных характеристик	Аналогично влиянию на месторождениии Инкай, плюс силение миграционных процессов урановых минералов и урановых частиц, последующее осаждение в поровых пространствах и и пленкообразование с		
Характеристика технологического раствора	Не оказывает существенного влияния на процесс ИК	примесями Повышение концентрации серы в технологическом растворе может приводить к вымыванию сульфидов железа, их осаждению в скважинном пространстве		
Особенности растекания технологического растовра	Затрудняет дифференцировк участков рудного тела по мере увеличения глубины в виду образования раствором линз с высокой электропроводностью	Предопределяет как направленность миграционных процесс, так и помеховые условия для определения границ рудоносных областей при мониторинге методом ИК		

Особенности режима выщелачивания обуславливает наличие по-разному проявляемых на каротажных диаграммах, но одинаковых факторов снижения информативности – кольматации и растекания технологических растворов, что меняет в свою очередь проницаемость околорудных пород, тем самым повышая их электропроводность. На месторождении Инкай движение растворов осложняет изучение и выявление реальных мощностей лентовидных участков, особенно в области высокослоистых сверхтонких пропластков с различной проницаемостью. На месторождении Моинкум, движение растворов осаждение примесей в виде наплывов и пленок может продуцировать помеховые импульсы, что в силу распространенности по площади растекания растворов является существенным фактором, снижающим информативность контроля растекания технологических растворов методом ИК. Кроме того, сочетание высокой проводности песков, представляющих рудоносные породы и раствора высокой концентрации, снижает достоверность данных ИК [67].

И наконец, рассмотрим особенности применения ИК на месторождениях Инкай и Моинкум, которые также влияют как на точность данных в каждом случае исследования данным методом, так и на результативность ИК в процессе отработки месторождений в целом. С наибольшей вероятностью на информативность ИК в анализируемых случаях будет иметь влияние, с учетом уже выявленных особенностей, частотный диапазон и качество передачи сигнала. За счет увеличения катушек в ИК-42 увеличивается и диапазон измерения. В то же время, ПИК-50 несмотря на возможность определения пород с низкой электропроводностью и боле низкие показатели погрешности, границы условий эксплуатации меньше, чем у аппарата ИК-42.

Если учитывать условия осложенности, то на первый план выступает возможность аппаратуры зонда различать кажущееся удельное сопротивление в диапазоне до 50 Ом, что в условиях как тонкослоистых, так и тонкодисперсных рудовмещающих и рудоносных тел создает предпосылки для искажения реальных областей оруденения в получаемой каротажной картине. Кроме того, условия глубокого залегания отдельных участков (а значит и высокое давление), наличие миграционных процессов и отложений пленкообразных и мелкодисперсных вкраплений, также искажают результаты каротажного обследования, что наглядно показано в подразделе 2.2. при анализе каротажных диаграмм.

Анализ факторов, оказывающих влияние на точность и результативность ИК позволил выделить следующие факторы, наличие которых принципиально в отношении месторождений Инкай и Моинкум:

1. Неоднородность и перемежающийся контур пород с разной проницаемостью;

2. Свойства технологического раствора, способного к реакции с материалами скважинного и околоскважинного пространства;

74

3. Наличие растекания технологических растворов в околоскважинное пространство, обеспечивающее миграцию и последующее осаждение урановых частиц на слабопроницаемых породах и в порах таких пород как известняк, песчаные цементы и глинистые, и песчаные алевролитные конгломераты. Следует отметить, что данный фактор особенно актуален для месторождения Моинкум.

4. Наличие высокого давления, снижающего проницаемость низкочастотного индуцирующего поля.

Вышеназванные факторы можно назвать общими, в то время как выявлены и частные особенности, представленные в Таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результирующая сравнительная характеристика первостепенных факторов, оказывающих влияние на ИК на месторождениях Инкай и Моинкум

Наименование	Характеристика рудоносных пород и рудовмещающей среды на				
характеристики	мес	торождении			
	Инкай	Моинкум			
Морфологическое и	Тонкослойные структуры слабо	Искажение контура рудных тел при			
фациальное	распознаются низкочастотными	использовании низкочастотной			
строение,	зондами, влияние	аппаратуры, сложно выявляющей			
гидрология	гидродинамического и	дисперсные структуры при фоновой			
	термобарического фактора на	высокой проницамемости и способности			
	достоверность ИК	рудовмещающих слоев к водонасыщению и			
		замещению, влияние термобарических			
		искажений на результаты.			
Проницаемость	На участках перешейков и	в сочетании с иными ограничивающими			
	перегибов лент рудных тел	факторами не позволяет адекватно оценить			
	низкочастотными приборами ИК	степень распространения урановой			
	плохо дифференцируются	минерализации в силу увеличения влияния			
	цементы и дендриты, имеющие	анизотропии, неравномерности			
	примерно одинаковый показатель	минерализации			
	электропроводности	11			
Анизатропность	Искажение контуров рудного тела	Искажение контуров рудного тела на			
	на диаграммах ИК, искажение	диаграммах ИК, искажение картины			
V	картины растекания жидкостей	растекания			
Химическии состав	Не осложнен	снижение эффективности мониторинга			
		методом электромагнитных 1 ис			
электромагнитные	Иа асполнисти и				
своиства	пе осложнены				
рудовмещающих					
пород					
Vouueurpouug u	ларактеристики производственн				
состав	Не осложнени	исследуемого удастка синустина			
технологицеского		афективности мониторинга методом			
		электромагнитных ГИС в целом			
раствора	l	электромагнитных т ис в целом			

В приведенной выше таблице, были учтены особенности аппаратного обеспечения ИК, используемого непосредственно на месторождениях.

Таким образом, выявлено, что критическими для эффективности ИК в условиях данных месторождений являются частотные диапазоны используемых зондов и их термобарическая устойчивость. В случае с анализируемыми месторождениями, сочетание анизотропных свойств рудовмещающих и рудоносных пород, ярко-выраженная морфологическая и петрографическая структура, являются предпосылками для осложненного условия проведения ИК, как на месторождении Инкай, так и на месторождении Моинкум. Это предполагает использование аппаратуры, характеризующейся высокой разрешающей способностью, поскольку выявленные факторы предопределяют сложную картину значений проницаемости исследуемых областей и соответственно - слабую дифференцировку по УЭП отдельных участков.

4.3 Факторы проницаемости и мониторинг движения жидкостей в продуктивном пласте на основании данных ИК

Для определения возможности использования индукционного каротажа как средства мониторинга растекания технологических растворов также целесообразно определить степень анизотропии в каждом отдельном случае, в зависимости от текстурно-структурного типа. Ключевым критерием оценки в данном случае может служить выдержанность пород по показателям индукционного каротажа, или сплошность пород.

Так, для месторождения Моинкум анизотропию в виду выдержанности и сплошности можно охарактеризовать как менее выраженную, чем по месторождению Инкай, но присутствующую как по горизонтали, так и по вертикали. Однако, следует отметить, что вертикальная анизотропия является более выраженной. Для месторождения Инкай очевидно наличие ярко выраженной анизотропии по вертикали и возможно – менее выраженной, но существенной по горизонтали. Причина данного явления кроется в различии в кажущихся удельных электропроводностях пород при их водонасыщении и изменении фильтрационных свойств в зависимости от таких характеристик как гранулометрические, текстурно-структурные и иные свойств, оказывающих влияние на проницаемость [23, 24].

Но, так как оба месторождения находятся в стадии активной отработки, на точность дифференцировки по данным электромагнитных исследований оказывает влияние также характер замещения пород в поровом пространстве, степень глинистости и прочие геофизикохимические факторы. Немаловажно, что в зависимости от текстурно-структурных свойств возможно изменение и скорости замещения как пластовой воды в порах раствором, так и проникновения раствора в плотные породы в процессе выщелачивания урана. Этот процесс позволяет достаточно достоверно дифференцировать растекание жидкостей в процессе закисления. В свою очередь, это делает возможным применение индукционного каротажа как ценного инструмента для мониторинга движения технологических растворов в процессе ПСВ.

Ниже приведена корреляционная матрица зависимостей, построенная по данным скважинного комплекса двух технологических блоков по месторождению Инкай и Моинкум. В корреляционном анализе при изучении физических величин в однородных массивах достоверность и репрезентативность корреляционных коэффициентов возрастает с количеством сравниваемых массивов и количество шагов итерации [25].

В статистическом анализе участвовали в общей сложности 22 скважины, что обеспечило достоверность картины зависимости электрического сопротивления от факторов проницаемости (Таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Корреляционная матрица зависимости значений σ от факторов проницаемости по данным месторождений Инкай и Моинкум, составленная на основании произведенного анализа данных ГИС

	Коэффициент корреляции с σ, мСим/м			
Параметры	Для Инкай	Для Моинкум		
Глинистость	0,99	0,69		
Пористость	0,96	0,98		
Проницаемость	0,99	0,76		

Как видно из результатов статистического анализа, для месторождения Инкай в целом характерно более высокая зависимость от таких показателей как глинистость и проницаемость. Для месторождения Моинкум данные взаимосвязи также статистически значимы, однако несколько менее выражены, что объясняется менее выраженным проявлением глинистости в пределах рудовмещающей толщи и большей выдержанностью по проницаемости и пористости.

Величины коэффициентов детерминации по коррелируемым парам по месторождению Инкай находятся в пределах 0,704 – 0,832, и, таким образом выявленные корреляционные связи объясняют в 70,4 до 83, 2 % случаев фиксируемые значения электрического сопротивления пород. Соответственно, глинистость влияет на данные по ИК в 70,4 % случаев, а пористость и проницаемость в 78,5 % и в 83,2 % случаев соответственно.

Данные показатели превышают пороговое значение в 70 %, что свидетельствует о том, что данные корреляционные пары закономерности достоверно определяют степень взаимосвязи факторов проницаемости и наблюдаемых по электрокаротажу данных.

Средняя ошибка аппроксимации для месторождения Инкай не превышает 15 % по выявленным корреляционным связям, что указывает на их достоверность.

По месторождению Моинкум, коэффициент детерминации по рассчитанным коэффициентам корреляции варьируется от 0,786 до 0,844, и, следовательно, от 78,6 до 84,4 % данных, полученных при ИК определены выявленными корреляционными взаимосвязями с глинистостью, пористостью, проницаемостью. Соответственно, пористость влияет на 78,6 % фиксируемых по каротажу, глинистость – 81,2 %, а проницаемость – 84,4 %. Средняя ошибка аппроксимации по месторождению Моинкум по рассчитанным коэффициентам корреляции не превышает 15 %, что соответствует значению, полученному по месторождению Инкай, и указывает на достоверность выявленных взаимосвязей. В то же время, на месторождениях Инкай и Моинкум при практически одинаковых значениях пористости в пределах 16-36 %, имеются различия в их распределении.

Так, для месторождения Моинкум характерна в целом более однородная картина распределения пористости, в силу выдержанности и относительно высокой однородности рудовмещающих пород.

На месторождении Инкай фильтрационная изменчивость на участках отработки характерна в вертикальном направлении, наряду с дифференциаций картины зависимости проницаемости от пористости. Порово-трещиноватый тип с присутствием кавернозных образований резко отличает скважины x1-3 более высокой степенью дифференцировки (Рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Зависимость проницаемости от пористости по данным: а) скважины № X1-X4 месторождения Инкай; б) скважины № У1-У4 месторождения Моинкум

Нами были проанализированы с помощью методов статистического анализа [94, 95] данные ИК и сопутствующим методам ГИС на глубине 0-325 м. по анализируемому скважинному фонду (Таблица 4.6).

 ИК, мСим/м
 КС, Ом*м
 Темп., °С

 Среднее
 180,0
 40,6
 32,9

 Ср.кв. отклонение
 148,0
 23,8
 988,9

 Минимум
 11,7
 0,2
 14,3

131,6

110.7

Таблица 4.6 – Статистические характеристики по данным каротажных исследований скважинного фонда технилогического блока №А1 месторождения Инкай, Скв.Х1

Исходя из данных вышеприведенных усредненных значений, в целом толщи, слагающие участок скважины достаточно равномерны, характеризуются хорошей проницаемостью и различаются по данным ИК. Наиболее проницаемые слои располагаются в нижнем ярусе, который отличает наиболее сложное, послойное строение.

553,2

Максимум

Следует также отметить, что по данной скважине отмечается наибольший разброс значений электропроводности, а также наименьшие минимальные и наибольшие максимальные значения, что свидетельствует о наиболее сложной морфологической картине данного участка инкудукского горизонта, предопределенное наличием тонкослойных сред, наличием участков, по всей видимости, глинистой цементации, с включениями крупнозернистых гравиев.

Кроме того, наблюдаемое отклонение по температуре достаточно существенно и совпадает с участком обнаруженной утечки, однако, распределение отклонений по среднему температурному режиму на выше и нижележащие интервалы свидетельствует о не слишком массивном, но, видимо постоянном перетоке раствора в затрубное пространство.

С учетом особенностей чередования проницаемых и слабопроницаемых материалов, следует предположить и возможность горизонтального движения технологических жидкостей с образованием размытий и каверн в околоскважином пространстве.

Скважины Х2, Х3 и Х4 отличает большая однородность показателей (Таблицы 4.7-4.10).

79

Данные скважинного фонда технологического блока №А1 месторождения Инкай, Скв.Х2 (рассчитанные статистические показатели)	ИК, мСим/м	КМ, мм	Температура, °С
Среднее	216,5	224,5	25,7
Ср.кв. отклонение	179,7	282,3	13,7
Минимум	43,3	58,4	17,7
Максимум	524,3	506,3	32,5

Таблица 4.7 – Статистические характеристики по данным каротажных исследований

По скважине X2 несколько выше средний показатель электропроводности, но в целом, как и по остальным скважинам блока№А1, соответствует диапозону песчано-глинистых отложений. Это свидетельствует об их доминировании в морфологической картине данного участка. На нижнем ярусе имеется размытие скважины, связанное с рыхлой структурой пород, что соответственно предполагает преобладание глин на интервале от 325 м.

Данные по скважине X3 также обнаруживают сходства с данными по скважине X1 (Таблица 4.8), что обусловлено схожими условиями образования рудовмещающих пород в пределах одного участка, что в свою очередь предопределило схолжую морфологию, петрохфизику и гидрологию данных участков.

Таблица 4.8 – Статистические характеристики по данным каротажных исследований скважинного фонда технологического блока №А1 месторождения Инкай, Скв.Х3

	ИК, мСим/м	КМ, мм	TM, °C	ТК, А
Среднее	209,6	227,1	25,9	36,0
Ср.кв. отклонение	191,8	390,8	16,6	226,6
Минимум	21,3	185,1	18,9	6,4
Максимум	559,9	405,5	34,2	139,2

Так, если по скважинам X2, X4 не наблюдается отклонений по кавернометрии и термометрии, то по скважине X3, как и по скважине X1 можно обнаружить увеличение температуры на сопоставимых интервалах. Это является основанием для предположения о наличии горизонтально-расположенных каверн и трещиноватостей. Аномалии не корреллирующие с данными керна по ИК, также свидетельствуют в пользу данного предположения. Данные по скважине X4 в целом сопоставимы по диапазону значений по другим скважинам и практически идентичны данным по скважине X2, что говорит в пользу аналогичного морфолитологического строения данных скважин (Таблица 4.9).

	ИК, мСим/м	TM, °C
Среднее	185,7	22,9
Ср.кв. отклонение	136,3	19,8
Минимум	5,9	16,9
Максимум	457,8	34,1

Таблица 4.9 – Статистические характеристики по данным каротажных исследований скважинного фонда технологического блока №А1 месторождения Инкай, Скв.Х4

Исходя из вышеприведенных данных, можно выделить усредненные показатели, общие по скважинному фонду технологического блока №А1, что позволит в дальнейшем сформировать модель движения растворов и жидкостей в отрабатываемых толщах (Таблица 4.10).

Таблица 4.10 - Данные усредненных по медиане значений по скважинному фонду технологического блока №А1

	ИК,	KC,	ТК,	TM,	КМ,
	мСим/м	Ом*м	Α	°C	ММ
Среднее	198,0	10,2	9,0	26,9	112,9
Ср.кв. отклонение	164,5	590,2	565,6	259,7	168,3
Минимум	2,2	0,04	1,6	16,9	60,9
Максимум	598,8	3288,7	34,8	52,9	227,9

Далее произведен анализ на предмет типа проницаемости по данным индукционного каротажа месторождения Моинкум.

Ниже приведен анализ статистических данных по каротажным исследованиям на глубине 0-249 м. по анализируемому скважинному фонду Месторождения Моинкум (Таблица 4.11).

Таблица 4.11 – статистические характеристики по данным каротажных исследований Скв. У1, технологического блока №В1 месторождения Моинкум

	ИК, мСим/м	КС, Ом*м	ПС, мВ
Среднее	180,7	20,2	12,1
Ср.кв. отклонение	114,9	17,3	4,1
Минимум	70,0	3,0	1,0
Максимум	560,0	67,0	20,0

Исходя из данных, представленных выше, по скв. У1 среднее значение Кп и невысокий разброс по максималному, среднему и минимальным значениям свидетельствует об относительной однородности структуры и петрографических характеристики пластов, что обусловлено преимущественно песчаным, песчано-глинистым и песчано-алевралитным материалом. Также необходимо отметить, что по всем четырем анализируемым скважинам блока отмечается практически однородная картина, за исключением глубин залегания прослоев с высокой и низкой электропроводностью, что обусловлено гидрологическим режимом и тектонико-литологическим строением уюкского горизонта в целом (Таблицы 4.12-4.14)

Таблица 4.12 – Статистические характеристики по данным каротажных исследований Скв. У2, технологического блока №В1 месторождения Моинкум

	ИК, мСим/м	КС, Ом*м	ПС, мВ
Среднее	137,0	21,5	11,6
Ср.кв. отклонение	96,0	18,4	5,1
Минимум	40,0	3,0	1,0
Максимум	400,0	71,0	18,0

Так, максимальные значения Кп не превышают 560 МСим/м, что свидетельствует о влиянии на нижних ярусах сильно метаморфизированных отложений в виде преимущественно песчаников, слабо дислоцированных песчано-алевралитных прослоев. Области низкой проницаемости представлены структурными вкраплениями изсестняков и битумов, которые плохо дифференцируются друг от друга на электрокаротажных диаграммах.

Таблица 4.13– Статистические характеристики по данным каротажных исследований Скв. У3, технологического блока №В1 месторождения Моинкум

	ИК, мСим/м	КС, Ом*м	ПС, мВ
Среднее	109	24,4	116,1
Ср.кв. отклонение	77,3	18,5	3,9
Минимум	30,0	2,0	111,0
Максимум	350,0	55,0	130,0

Мелкозернистые и среднезернистые пески и глины можно считать репером для данной части уюкского горизонта, что предопределяет более равномерный относительно всего месторождения уровень водонасыщенности и проницаемости.

Таблица 4.14 – Статистические характеристики по данным каротажных исследований Скв. У4, технологического блока №В1 месторождения Моинкум

	ИК, мСим/м	КС, Ом*м	ПС, мВ
Среднее	95,0	25,2	13,2
Ср.кв. отклонение	92,0	47,4	7,5
Минимум	10,0	5,0	1,0
Максимум	360,0	360,0	31,0

Исходя из вышеприведенных данных, можно выделить усредненные показатели, общие по скважинному фонду технологического блока №В1, что позволит в дальнейшем сформировать модель движения растворов и жидкостей в отрабатываемых толщах (Таблица 4.15).

Таблица 4.15 - Данные усредненных по медиане значений по скважинному фонду технологического блока №В1

	ИК, мСим/м	КС, Ом*м	ПС, мВ
Среднее	130,4	22,8	38,3
Ср.кв. отклонение	95,1	25,4	5,2
Минимум	37,5	3,3	28,5
Максимум	417,5	138,3	49,8

Исходя из данных, приведенных выше, можно отметить, что в целом анализируемый технологический блок месторождения Моинкум проявляет достаточно благоприятные условия для постановки индукционного каротажа. Это, прежде всего, относительная однородность и мощность пород, слагающих рудоносные и рудовмещающие толщи, а также хорошая проницаемость и диапазон петрофизических свойств материалов, в пределах рабочих для низкочастотного индукционного каротажа. Также наличие более высоких значений концентрации серы технологического раствора улучшает дифференцировку его растекания по данным ИК.

Были проанализированы корреляционные зависимости для выявления общих закономерностей между данными каротажных исследований, для выявления особенностей уюкского горизонта (Таблица 4.16).

	ИК, мСим/м	КС, Ом*м	ПС, мВ
	1		
ИК, МСим/м			
	-0,41975422	1	
КС, Ом*м			
	0,20390231	-0,27121	1
ПС, мВ			

Таблица 4.16 - Данные корреляционного анализа по информации ГИС по скважинному фонду технологического блока №В1

4.4 Выводы

В результате корреляционного анализа установлено, что между данными осциллограмм по КП, КС и ПС наблюдается статистически значимая обратная зависимость средней силы, что необходимо учитывать для повышения точности интерпретации каротажных данных. Сопоставление данных по индукционному каротажу (ИК) и гамма-каротажу (ГК) показало высокую точность определения областей растекания растворов, что делает метод ИК более информативным по сравнению с КС и ПС, особенно в условиях морфологических и петрофизических сложностей пород уюкского горизонта месторождения Моинкум. На урановых месторождениях пластово-инфильтрационного типа выявлено, что величина электропроводности от 100 до 500 мСим/м для месторождения Инкай и от 180 до 500 мСим/м для Моинкум наиболее эффективна для определения рудных интервалов и находится в прямой зависимости от факторов проницаемости горных пород. Качество мониторинга движения растворов в продуктивном пласте методом ИК также определяется проницаемостью рудовмещающих пород, но может осложняться при наличии высокослоистых пропластков, особенно при использовании стандартной частоты приборов ИК. Таким образом, индукционный каротаж подтверждает свою высокую эффективность для мониторинга и интерпретации в сложных геологических условиях, что обосновывает первое защищаемое положение.

Данные исследования подтвердили, что индукционный каротаж (ИК) является не только надежным, но и высокоинформативным методом для анализа геофизических характеристик урановых месторождений пластово-инфильтрационного типа. Он позволяет эффективно определять зоны минерализации, контролировать движение технологических растворов и выявлять особенности фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов. При этом петрофизические параметры, такие как проницаемость и слоистость рудовмещающих пород, оказывают существенное влияние на точность получаемых данных.

Установлено, что на месторождениях Инкай и Моинкум диапазон электропроводности, характерный для рудных интервалов (100–500 мСим/м и 180–500 мСим/м соответственно), обеспечивает высокую точность выделения рудных зон и их дальнейший мониторинг. Однако использование стандартной частоты приборов ИК может быть затруднено при наличии сложных геологических условий, таких как повышенная слоистость пропластков. Это требует разработки адаптивных подходов к обработке и интерпретации данных, а также применения приборов с улучшенными характеристиками.

Выявленные закономерности подчеркивают важность комплексного подхода к исследованию гидрогенных месторождений урана. Сочетание индукционного каротажа с другими методами геофизических исследований, такими как гамма-каротаж и методы контроля осциллограмм (КП, КС и ПС), обеспечивает более полное понимание геологической структуры и динамики продуктивных пластов. Результаты исследований подтверждают, что ИК в сочетании с учетом факторов проницаемости является оптимальным инструментом для решения задач мониторинга и повышения эффективности добычи урана в сложных геологических условиях.

На основе проведенного анализа подтверждено, что использование индукционного каротажа (ИК) предоставляет важную информацию для оптимизации добычи урана на месторождениях с пластово-инфильтрационным типом рудоносных пластов. Основным преимуществом метода является его чувствительность к изменениям проницаемости, позволяющая точно определять рудные интервалы и контролировать движение технологических растворов в продуктивных горизонтах.

Важным выводом стало то, что величина электропроводности, характерная для рудных зон, связана с фильтрационно-емкостными свойствами горных пород и может использоваться для идентификации зон минерализации. Диапазон электропроводности в 100–500 мСим/м для Инкай и 180–500 мСим/м для Моинкум обеспечивает высокую точность выделения рудоносных интервалов. При этом морфологические особенности, такие как слоистость и неоднородность пород, влияют на интерпретацию данных, что требует развития адаптивных моделей анализа и совершенствования оборудования ИК.

Сопоставление данных ИК с результатами гамма-каротажа (ГК) и осциллограммных методов (КП, КС, ПС) показало, что ИК не только превосходит другие методы по точности определения зон растекания растворов, но и позволяет эффективно мониторить изменения проницаемости пластов в реальном времени. Однако сложности, связанные с повышенной слоистостью пропластков, указывают на необходимость использования расширенного диапазона частот приборов для повышения точности данных в сложных геологических условиях.

Таким образом, исследование факторов проницаемости горных пород и их влияния на результаты индукционного каротажа подчеркивает необходимость комплексного подхода при изучении урановых месторождений. Комбинация ИК с другими методами каротажных исследований позволяет более точно прогнозировать геологические параметры и управлять процессами добычи. Дальнейшее развитие методов обработки и интерпретации данных, а также совершенствование технологий ИК обеспечат повышение эффективности геофизических исследований и оптимизацию производства на урановых месторождениях с высокой геологической сложностью.

Тем не менее, выявленные трудности, связанные с морфологическими особенностями пород, такими как повышенная слоистость и неоднородность, подчеркивают необходимость усовершенствования приборов ИК, включая использование расширенных диапазонов частот. Это позволит минимизировать погрешности, возникающие при работе в условиях сложной геологии и повысить точность получаемых данных.

Дальнейшее развитие подходов к комплексным геофизическим исследованиям, включая использование ИК в сочетании с гамма-каротажем (ГК) и методами анализа осциллограмм (КП, КС, ПС), обеспечит более полное понимание динамики продуктивных пластов и улучшит прогнозирование геологических параметров. Внедрение адаптивных моделей интерпретации данных, учитывающих технологические изменения в продуктивных горизонтах, станет важным шагом к повышению эффективности добычи и минимизации экологических рисков.

Содержание раздела и выводы обосновывают первое защищаемое положение:

«Установлено, что на урановых месторождениях пластово-инфильтрационного типа величина электропроводности от 100 до 500 мСим/м для Инкай и от 180 до 500 мСим/м для Моинкум наиболее эффективна в рудных интервалах и находится в прямой зависимости от факторов проницаемости горных пород. Качество мониторинга движения растворов в продуктивном пласте методом ИК имеет прямую зависимость от ключевых факторов проницаемости рудовмещающих пород и осложняется при применении стандартной частоты прибора ИК при наличии высокослоистых пропластков».

Материалы раздела опубликованы в [99, 100, 101].

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ТИПА ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОД НА МОНИТОРИНГ ДВИЖЕНИЯ РАСТВОРОВ МЕТОДОМ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА В ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТАХ

5.1 Сопоставительная оценка данных ИК в комплексе ГМИС в условиях производственного мониторинга

Выявленные факторы проницаемости рудоносных и рудовмещающих пород и их предварительный анализ указывают на достаточно сильное влияние на результативность индукционного каротажа. Следовательно, важным фактором достоверности каротажных данных является не величина проницаемости как таковой, а совокупность условий на эту величину влияющих. Соответственно, проницаемость является основанием для методики ИК. В тоже время, учет факторов, влияющих на проницаемость горных пород, а, следовательно - из различия в отрабатываемых толщах, позволяет детализировать конкретные требования к аппаратному обеспечению в отношении количества зондов, их конструктивных решений и применяемого частотного диапазона.

В большинстве случаев обследование методом ИК не имеет расхождений с другими данными в комплексе ГМИС [73]. Однако, как указано в приложении Б, несложно заметить отклонения в определенных областях.

Анализ данных отклонений подтверждает результаты анализа факторов, произведенного в подразделе 2.1. Далее приведены результаты анализа участков отклонений по результатам диаграмм ИК.

В первую очередь, следует отметить, что отклонения локализуются строго в определенных областях, совпадающих с областями, в которых наблюдается ярко выраженное влияние факторов, ограничивающих достоверность данных ИК.

Ниже представлены характеристики отклонения в сравнении с другими геофизическими методами (Таблица 5.1)

Местоположение	Дата Расхождение данных		Характер расхождения					
	мониторинга	ИК с данными ГМИС						
	19.08.2018	По ТК, по ТМ	Не выявлена утечка на					
Инкай, участок 2,			глубине 103,6 м.					
блок А1, скв. № Х1	19.08.2018	По ТК, по ТМ	Не выявлена утечка на					
			глубине 153,1 м.					
	19.08.2018	По ТК, по ТМ	Не выявлена утечка на					
			глубине 202,9 м.					
Моинкум, участок 7,	08.06.2018	По ТК	Выявленная по ТК утечка					
блок В1, скв.№УЗ			на уровне 183 м. слабо					
			дифференцируется по					
			данным ИК					

Таблица 5.1 – Отклонения данных ИК по прочим данным ГМИС

Обращает на себя внимание, что на месторождении Моинкум в целом наблюдается достаточно высокая эффективность применения ИК в отношении мониторинга движения технологических растворов, причиной которой может служить тонкодисперсный характер минерализации в преимущественно песчаном материале толщ, с достаточно высокой водонасыщенностью, что не предполагает увеличение УЭС до границы разрешающей способности используемой аппаратуры ПИК-50 и ИК-42.

Касательно месторождения Инкай, обращает на себя внимание влияние следующих факторов:

1. Морфологические особенности строения рудоносных толщ, предопределяющие чередование слоев рудоносных и рудовмещающих пород с разной проницаемостью. Это в свою очередь предопределяет сложности в дифференцировки данных на отметках, которые залегают в условиях среды, отличающейся высокой проницаемостью, например, в силу наличия крупных капиллярных сетей, водных линз или илово-глинистых отложений, тонкослоистый профиль чередования рудоносных и рудовмещающих пород. Такие материалы, как цементы и дендриты, в тонких прослоях, ограничивающих рудоносные толщи, в силу схожего параметра УЭС слабо читаются ИК, и, кроме того, их параметры УЭС могут варьироваться от 100 до 800 Ом*м, что существенно выше пределов эффективной различающей способности низкочастотных ИК.

2. Порово-трещинное строение толщ, предопределяющее увеличение водонасыщенности проницаемых прослоев в силу техногенного влияния.

Рассмотрим подробнее характеристики рудоносных и рудовмещающих пород по данным каротажных исследований на месторождении Инкай и Моинкум. Последнее исследование ИК на месторождениях производилось в комплексе ГИС в 2018-2019 году аппаратом ИК-42, ПИК-50 в качестве средства мониторинга.

Морфолитологическая и петрофизическая картина блока A1 **месторождения Инкай** в целом характерна для таковой по месторождению. Однако, на данном блоке особенно хорошо

прослеживается влияние прослоев различной проницаемости и толщины на эффективность процесса отработки. Сказывается особенность вертикально расположенных прослоев рудовмещающих и рудоносных пород и на эффективность ИК, предполагая его комплексование для получения достоверной дифференцирующей картины. На каротажных диаграммах нередки слабо дифференцируемые или не дефференцируемые интервалы, особенно на глубинах 10-60 м, и 110-120 м, что обусловлено характером залегания водоупорных слоев. Ниже представлены данные по ИК, ТК, КС по глубине интервала закисления. (Рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Каротажные данные по интервалу закисления по данным ИК и ТК, 320-325 м. Масштаб: 1:200 по данным ГИС месторождения Инкай

Следует отметить, что в обозначенной области температура выше рабочих значений использования аппарата ИК-42, что объясняется движением технологического раствора и сопутствующими химическими реакциями, соответственно в данной области данные по индукционному каротажу имеют неизбежную погрешность.

Достаточно отчетливо прослеживается наличие вышележащих области закисления прослоев с высокими и низкими УЭС. Значение УЭС в пределах 100 Ом*м соответствует песчаным и песчано-глинистым слоям, которые прерываются тонкими линзообразными ило-глинистыми телами.

Вышележащие глинистые слои существенно обводненны, в нижележащих слоях имеются тонкие прослои (до 2-3 метров и менее) ураноносных песчаниковых рудных тел. На всей вертикали области закисления отмечаются блоки цементации, расположенные как в рудовмещающей, так и рудоносной породе.

На интервалах 103-104 м., 153-154 м, 202-203 м. по данным последнего ГИС, произведенного в августе 2019 года имеются незначительные утечки, однако не выявленные ИК. Ниже представлена каротажная картина по КС и ИК на трех участках с зафиксированным перетоком технологического раствора в затрубное пространство скважины (рисунок 5.2).





Тот факт, что утечки не были выявлены на интервалах с промежутком в 50-55 метров, свидетельствует о том, что перетоки технического раствора располагались в областях высокообоводненных разнозернистых глинистых песков, соответственно, с высокой проницаемостью.

Морфолитиологические и петрофизикохимические особенности анализируемого блока №В1 месторождения Моинкум несколько отличаются от прочих технологических блоков

месторождения поскольку особенностью месторождения Моинкум является залегание рудоносных тел на одном и том же участке в пределах двух рудоносных горизонтов. По данному блоку имеется наиболее обширная информация по проводимым ГИС [67].

Особенностью залегания урановых руд является тонкодисперсность и распространения в водонасыщенных слоях, обилие трещинового типа коллекторов, что накладывает определенные ограничения не только на проведение и интерпретацию ИК, но и стандартных ГМИС.

На каротажных диаграммах слабо дифференцируются области орудинения в виде наплывов и пленок, особенно на глубинах 10-60 м, и 110-120 м, 230-245 м, что обусловлено характером залегания водоносных, водонасыщенных и водоупорных слоев. На некоторых интервалах присутствуют видимые разрывы, характеризующие условия, запредельные для дифференцировки методом ИК.

Следует отметить, что в целом технологический процесс отработки урановых залежей на месторождении Моинкум отличает большее количество погрешностей при мониторинге, сложность дифференцировки рудовмещающих тел и околорудного пространства, весомое влияние гидродинамики участка, что предполагает более широкое растекание технологических растворов, чем на ранее рассмотренном блоке №А1 месторождения Инкай.

Достаточно отчетливо прослеживается наличие вышележащих области закисления относительно однородных слоев с УЭС в пределах 50 Ом*м, песчано-глинистым и глинистым слоям уюкского горизонта (Приложение Е).

Вышележащие песчано-глинистые и песчаные слои существенно обоводненны, в нижележащих слоях имеются тонкие прослои (до 2-3 метров и менее) ураноносных песчаниковых рудных. На всей вертикали области закисления отмечаются осложнения в виде среднезернистых гравийно-песчаных прослоев, а также тонких линз битумных и известняковых включений.

На интервале 182-184 м по данным ТК, произведенного в мае-сентябре 2018 года, обнаружена утечка тока (0,7%).

Ниже представлена каротажная картина по КС и ИК на интервале с зафиксированной утечкой тока по данным ТК (Рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Интервалы с выявленной по TM утечкой по скв. УЗ по данным ГИС месторождения Моинкум

Утечка тока в колонне скважины не превышает 10%, относится к технологическим факторам эксплуатации скважин. Касательно литологической картины, утечка обнаружена в прослое глинистых песчаников с хорошей проницаемостью. Характерной особенностью является хорошо дифференцируемые достаточно мощные (в пределах от 1 до нескольких десятков метров) слои со слабой и высокой электропроводностью, что характерно в целом для уюкского горизонта. Названные особенности в той или иной мере, характерны для всего технологического блока №В1, лежащего в пределах уюкского рудоносного горизонта. В аналитической картине месторождения Моинкум присутствует большая однородность, нежели по месторождению Инкай, несмотря на весомую петрофизическую осложненность.

Далее представлены результаты аналитической работы и интерпретации данных ГИС (ИК, ТМ, ТК, ПС, КС, КМ). На данных каротажа ГК отчетливо различается зона орудинения на интервале 217-219 м, и 233-237 мм. Диффузный характер миграции ураноносных минералов в вышележащие слои предопределил наличие менее отчетливых аномалий и на интервалах выше – 203-207 м., однако, с учетом бедности руд и их тонкодисперсного распределения в толщах рудоносного горизонта, их отработка, вероятно, малорентабельна, т. к. концентрация урана не достигает промышленной. При относительной однородности рудоносных и рудовмещающих слоев по исследуемым скважинам, области орудинения расположены неравномерно как по глубине залегания, так и по количеству. Рудоносные породы расположены на следующих интервалах (Таблица 5.2)

92

Таблица 5.2 – Расположение рудоносных тел на интервалах по блоку В1 по данным ГИС месторождения Моинкум

№ скважины	Глубина залегания, м	Количество интервалов
У1	217-219, 233-237	2
У2	218-219, 221-222,	2
У3	210-211, 215-216, 221-222, 226	4

Наблюдаемое оруденение представлено тонкими прослоями рудоносных пород, преимущественно песчаных, при этом интервалы оруденения по скважинам имеют пересечения, что свидетельствует о наличии трещин и коллекторов, как факторов переноса и накопления урановых минералов. По данным ИК протяженность интервалов до 150 метров представлена породами с электропроводностью в пределах 200-300 МСим/м. Лишь по скважине У1 наблюдается значение в 400-500 МСим/м. Данный интервал характеризуется значениями кажущейся УЭП в пределах 10-20, что характерно для обводненных и хорошо проницаемых мелкозернистых песчаных пород и супесей.

Ниже, на интервале в 150-165 м наблюдается повышение диапазонов кажущейся УЭС до 40-60 Ом*м, что свидетельствует о преимущественно песчаном с небольшой примесью серозеленых глин, сложении пород данного интервала. Электропроводность равномерна и не превышает 80 мМСим/м, что может свидетельствовать о наличии битумных прослоек, однако стоит помнить, что в относительно однородных средах, при температуре до + 50 град., битумы и песчаники (особенно мелко и среднезернистые) имеют практически идентичные показатели электропроводности, что осложняет дифференцировку. Тем не менее, наличие информации по керну, указывающее на присутствие в небольшом количестве битумных и других органических материалов, делает вышеприведенное предположение небезосновательным.

На интервалах оруденения значения по ИК и КС колеблются от 70 до 100 мСи/м и от 30 до 50 Ом*м, изменяясь незначительно в выше и ниже лежащих слоях, что говорит об однородности и массивности рудовмещающей и околорудной толщи, состоящей преимущественно- из средне и мелкозернистых песков с хорошей проницаемостью.

По данным кавернометрии наблюдается увеличением диаметра скважины, что связано с размытием в процессе отработки и предопределяет растекание жидкости в нижележащие слои на существенную глубину до 5 -7 м.

Касательно мощности интервала оруденения, то наиболее мощным является нижний интервал на уровне 233-237 м, сложный по своей литологической структуре и состоящий из тонких прослоев средне и крупнозернистых гравийных песков, располагающихся над слоями средне и мелкозернистых серо-зеленых песков, и глин, а также илисто-глиняных отложений. Все слои водонасыщенные, с хорошей проницаемостью.

Плавность и синхронность затухания аномалий по диаграмме ПС, ГК, ИК и КС свидетельствует о существенном изменении зоны оруденения как в процессе эксплуатации скважин, так и в результате миграционных процессов в высокопроницаемых толщах. Более того, вышеизложенный анализ позволяет сделать вывод, о том, что нижняя область оруденения является следствием миграционного процесса из верхних толщ (коньяк-сантон), и данный процесс продолжается.

Специфической особенностью исследуемого участка технического блока №В1 является в целом однородные, мощные слои выше и ниже зон оруденения, в то время как рудоносные породы тонкослоисты, с прослоями илисто-глинистых пород, что указывает на гидродинамическое влияние на процесс оруденения, которое имеет место быть и в настоящем времени, что согласуется в целом с гидрогеологической картиной месторождения, приуроченного к системе сарысуйского бассейна. Общей характеристикой можно назвать в целом высокую проницаемость толщ рудовмещающих и рудоносных прослоев.

Что характерно, на диаграммах ИК, как и в случае анализа участка A1 месторождения Инкай, отчетливо прослеживается зональное деление разрезов по уровню водонасыщенности, что позволяет сделать вывод о том, что данный метод может быть использован как стандартный для определения степени проницаемости и контроля движения растворов и жидкостей в околорудном пространстве.

Для месторождения Моинкум данная возможность метода имеет ключевое значение, так как в условиях относительной однородности при дифференцировке слоев стандартным методом ПС, данные по растеканию растворов и колебаниям проницаемости практически не учитываются, что можно наблюдать по практически однородной динамике осциллограмм по ПС, отображенных на корреляциях скважин технического блока №В1.

Таким образом, наблюдаются очевидные предпосылки для массивного размытия и переноса ураносодержащих минеральных частиц в нижележащие слои, что существенно снижает эффективность подсчета и отработки урановых залежей на данном месторождении.

В результате произведенного анализа выявлены некоторые особенности залежей урана, их отработки и мониторинга на месторождениях Инкай и Моинкум, а именно:

1. На месторождении Инкай хорошо дифференцируются горизонтальные перетоки, что характерно для порово-трещинной структуры, в то время как наличие прослоев с различной проницаемостью дает плохо дифференцируемую картину растекания жидкостей по вертикали.

2. На месторождении Моинкум более мощные и однородные, в целом высокопроницаемые толщи, с незначительным количеством прослоев, преимущественно в зоне закисления, что дает возможность хорошо отслеживать движения растворов как по горизонтали, так и по вертикали;

3. На месторождении Моинкум прослеживается более существенное влияние техногенных факторов осложнения условий постановки ИК;

В целом следует отметить, что как метод контроля растекания технологических растворов, ИК, а именно низкочастотный ИК более эффективен в отношении условий месторождения Моинкум, нежели Инкай.

5.2 Типологизация пород месторождений Инкай и Моинкум по данным ИК

Исходя из данных, приведенных выше, можно отметить следующее:

1. Средние значения по ИК свидетельствуют о песчано-глинистом репере данного блока;

2. Наличие аномалий по данным ТК, ТМ, КС, не обнаруженное по ИК, свидетельствует о наличии тонких слабопроницаемых прослоев, плохо различимых в условиях низкочастотного каротажа;

3. Наличие интервалов с неполными данными по проведенным комплексу ГМИС свидетельствует о наличии порово-трещиннового строения толщи и растекании жидкости по горизонтально-вертикальному типу.

Проанализируем корреляционные зависимости для выявления закономерностей и взаимосвязей между данными каротажных исследований, что позволит выявить особенности инкудукского горизонта для более полного отбора методики построения модели в дальнейшем (Таблица 5.3)

Таблица 5.3 – Данные корреляционного анализа по информации ГИС по скважинному фонду технологического блока №А1 на основании данных ГИС по месторождению Инкай АО «НАК «Казатомпром»

	ИК, мСим/м	КС, Ом*м	ТК, А	TM, °C	КМ, см
ИК, мСим/м	1				
КС, Ом*м	0,99958378	1			
ТК, А	0,98845791	0,98632737	1		
TM., °C	0,67249063	0,66297093	0,7674859	1	
КМ, мм	0,99808673	0,99852731	0,9889456	0,6888881	1

Результаты корреляционного анализа позволяют выделить наиболее существенные взаимосвязи: 1) между данными электрокаротажа, между данными токового и электрокаротажа, что обусловлено сущностью методов и является очевидным, и в то же время свидетельствует в целом о достоверном и однородном каротине полученных осциллограмм и слабым влиянием помеховых факторов на результаты исследования по ИК; 2) между данными кавернометрии (на участках, по которым имеются данные) и данными электрокаротажа, что свидетельствует в пользу предположения о наличии областей с перетоком по трещиновому пространству технологических растворов.

Выявленные взаимосвязи указывают, что такие особенности как температура и УЭС находятся в тесной зависимости, что также свидетельствует о наличии перетоков, возможно с образованием линз обогащенного тех. раствора в околоскажинном пространстве.

По результатам произведенного анализа были сделаны следующие выводы.

В силу средней величины сопротивления в 180-250 Ом*м, по анализируемому разрезу инкудукского горизонта на территории технологического блока №А1, хорошо дифференцируются на диаграммах ИК в целом даже достаточно тонкие прослои, соответственно относительная однородность слоев по физическим свойствам слагающих их материалов делает применения ИК достаточно эффективным.

В то же время, на отдельных участках присутствуют аномалии, плохо дифференцируемые по ИК, и их локализация совпадает с интервалами с высокой обводненностью, что в силу выраженной порово-трещинной структуры пород, слагающих водонасыщенные участки (глиносто-песчано-алевролитные) резко повышает их удельное сопротивления до диапазонов, в рамках которых по ИК тонкие прослойки. Как и небольшие перетоки жидкостей и растворов читаются слабо, или не дифференцируются вовсе.

В соответствии с результатом произведенного анализа целесообразно выделить внутри уже ранее выделенных стратиграфических категории глинистых материалов глины с высокой и низкой УЭС, в силу разности в их водонасыщенности и типе проницаемости. Характерно для проанализированного разреза наличие практически монотонного чередования крайних вариантов – низкой и высокой проницаемости, на что указывает существенный разброс в средних значениях и что связано с особенностями формирования фаций под влиянием процессов выветривания, тектонического генезиса и гидродинамического влияния. При корреляции данных ИК и других видов ГМИС были установлены области перетока технологического раствора в заскваженное пространство, что, по всей видимости, является риском на данном интервале, характерным для морфолитологического типа скважин инкудукского продуктивного горизонта.

В этой связи возможностью ИК для диагностики движения растворов могут быть реализованы путем выявления областей с повышенной проницаемостью и одновременным повышением температуры. Четко выражены два типа – с преобладанием порово-трещинового с включением кавернозных образований и порово-трещинноватого типа. К первому типу можно

96

отнести скважины X1, X3, ко второму типу скважины X2, X4. Ниже представлены данные по проницаемости интервалов по первому типу блока №А1 месторождения Инкай (Рисунок 5.4)



Рисунок 5.4 – Области проницаемости технологического блока №А1, (скв. Х1, Х3)

Вышеприведенная диаграмма иллюстрирует, что на интервале 40-179 метров, в целом проницаемость достаточно высокая. Ее показатели однородны, что свидетельствует о хорошей проницаемости и преобладании порово-трещинного типа. Основную диагностическую проблему составляют интервалы ниже 180 м, в которых присутствуют участки цементации и обводненности, сложно диагностируемые методом ИК.

Далее представлен тип 2 скважинных коллекторов участка №А1 месторождения Инкай (Рисунок 5.5)



Рисунок 5.5 – Области проницаемости технического блока №А1, тип проницаемости 2 (X2, X4)

*Примечание: составлено автором на основании произведенного анализа

Второй тип характеризуется чередованием однородных крупных интервалов с относительно высокой и более низкой проницаемостью, что позволяет лучше распознавать тонкие прослои. Можно сделать вывод, что морфолитологическое строение скважин второго типа предполагает преимущественно порово-трещинновую структуру, причем поровый тип проницаемости преобладает.

В целом, анализ применения индукционного каротажа в качестве мониторинга растекания растворов в рудовмещающих толщах на месторождении Инкай показал, что области более высоко проницаемости дифференцируются как области с большей кажущейся удельной электропроводностью, при этом, качество дифференцировки напрямую зависит от мощности прослоев. В тонких прослоях с чередованием материалов различной проницаемости, дифференцировка растекания растворов существенно ограничена, что обусловлено наличием порово-трещинного типа проницаемости и разрывов в теле плохо проницаемых и непроницаемых пород.

Однородность аналитических данных дает основания предполагать также и общие закономерности распределения областей высокой проницаемости по скважинам У1-У4 (рисунок 5.6)



Рисунок 5.6 – Области проницаемости технологического блока №В1 месторождения Моинкум, (скв. У1, У2, У3, У4), мСим/м

Растекание растворов на анализируемом технологическом блоке в нижележащие слои просматривается вплоть до 236 м, или более чем на 15 метров ниже интервала закисления. Поскольку электропроводность в относительно однородных и хорошо проницаемых пластах пород Моинкум обусловлена механизмом ионного обмена, следовательно, можно сделать вывод, что характер растекания растворов оказывает влияние на изменение мощности интервалов

минерализации в силу миграции ураносодержащих минералов. По характеру проницаемости преобладает поровая.

Таким образом, исходя из данных анализа, обнаружена зависимость показателей проницаемости рудовмещающих пород и возможности использования ИК как средства мониторинга и контроля движения растворов в продуктивных толщах по месторождениям Инкай и Моинкум.

Так, порово-трещинная структура, наличие разрывов и тонких прослоев материалов с различным показателем проницаемости в рудовмещающей породе является осложняющим условиям для получения достоверной картины растекания технологических растворов по индукционному каротажу, что выявлено по результатам анализа ГМИС по месторождению Инкай. В то же время, сопоставление с данными кавернометрии и термометрии позволяет несколько повысить качество дифференцировки при осуществлении мониторинга и выделить более точно области растекания;

Поровый тип проницаемости в сочетании с однородной по текстурным характеристикам пород, слагающих толщи повышает качество дифференцировки движения растворов по данным индукционного каротажа, что наглядно показывает анализ ГМИС по месторождению Моинкум. Более того, в условиях мелкодисперсного монометального орудинения в высокопроницаемых породах, индукционный каротаж является наряду с ГК наиболее эффективным методом мониторинга движения технологических растворов и позволяет получить наиболее достоверную картину влияния технологического процесса отработки на изменения области орудинения.

5.3 Типология проницаемости месторождений Инкай и Моинкум и ее влияния на мониторинг методом ИК

Типологизации объектов месторождений Инкай и Моинкум по текстурно-структурному типу (типу проницаемости) необходима для дальнейшей калибровки модели движения растворов. Типологизация опирается на совокупность геофизических, гидрологических, морфолитологических и технологических условий отработки месторождения.

Ранее произведенный анализ данных по ИК в комплексе с другими ГМИС выявил закономерности разброса проницаемости на месторождениях, которая имеет дифференцировку преимущественно по вертикали, с возростанием степени дифференцированности пород с глубиной (Рисунки 5.7, 5.8).



Рисунок 5.7 – Экспоненциальная зависимость проницаемости и ее разброса от глубины на месторождении Моинкум по данным анализа результатов ГИС





Рисунок 5.8 – Экспоненциальная зависимость проницаемости и ее разброса от глубины на месторождении Инкай по данным анализа результатов ГИС

На диаграммах распределения отчетливо просматривается зависимость данных ИК от глубины, что совпадает с особенностями оруденения, подчиненного стратиграфическим ритмам и микроритмам месторождений. Это обстоятельство позволило принять вертикальную дифференцировку проницаемости за искомый параметр растекания растворов.

Выявленные особенности электрофациальных ритмов и зависимость от факторов проницаемости, создали предпосылки для анализа распределения прослоев по параметрам электропроводность - проницаемость по каждой группе анализируемых объектов месторождений Инкай и Моинкум.

Ниже представлены электрофациальные ритмы во взаимосвязи с изменением проницаемости для скважин X1-X4 месторождения Инкай, охватывающие рудоносный интервал, а также интервалы ниже и вышележащие (Рисунок 5.9)



Рисунок 5.9. – Электрофациальные ритмы и их проницаемость по скважинам X1-X4 месторождения Инкай по данным ГИС

Обращает внимание, что имеются прослои на интервале закисления, которые имеют существенно меньший коэффициент проницаемости. Соответствующие электрофациальные ритмы также были составлены и для скважин X2-X3 (по второму типу) месторождения Инкай.

Приведенные данные наглядно показывают отсутствие часто перемежающихся маломощных электрофаций, и, соответственно – более слабую дифференцировку и большую выдержанность прослоев по проницаемости. Предположительно, это связано с более крупными морфолитологическими ритмами, а таже с большей однородностью слагающих пород (Рисунок 5.10).



Рисунок 5.10- Электрофациальные ритмы и их проницаемость по скважинам X2, X3

В виду разности в фациальной обстановке, для скважин блока В1 месторождения Моинкум также были сформированы электрофациальные ритмы с указанием проницаемости каждого укрупненного фациального слоя. (Рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Электрофациальные ритмы и их проницаемость по скважинам У1-У4 месторождения Моинкум

Формирование и изучение электрофациальных и литологостратиграфических слоев по данным ГМИС достаточно четко демонстрирует наличие особенностей стратиграфических ритмов на месторождении Инкай и Моинкум.

Причем, на месторождении Инкай можно выделить два существенно выделяющихся своими особенностями типа проницаемости – по скважинам X1-X4, и по скважинам X2-X3. Это объясняется локальными различиями в морфолитологических и петрофизических свойствах рудовмещающих и околорудных пород.

По скважинам X1-X4 месторождения Инкай ритм электрофаций менее выдержан, присутствуют участки с тонкими прослоями экстремального разброса по проницаемости. Примечательно, что глинистость данного типа выше, а глины часто присутствуют в виде линзообразных прослоев. Имеется кавернозность, о чем свидетельствует прослои с экстремальной электропроводностью – высокообводненные участки, представляющие собой каверны неправильной формы, заполненные водой. Не исключена и гидратация рыхлых пород в результате ПСВ с последующим замещением раствором.

Второй тип проницаемости (скважины X2-X3) на месторождении Инкай более выдержан, электрофациальные ритмы более крупные, а картина проницаемости однородная. Присутствуют незначительные перепады по электропроводности, но между крупными (более 4-5 метров прослоями). Более тонкие пропластки сложены из разноразмерных алевралитно-песчаных и песчанно-гравийных пород, что, тем не менее, не оказывает существенное влияние на разброс проницаемости. Обводненные участки отсутствуют, что указывает на отсутствие кавернозных образований. В свою очередь, это свидетельствует о преимущественно поровом характере проницаемости.

На месторождении Моинкум, по всем четырем скважинам картина проницаемости в целом значительно отличается от обоих типов, выявленных на месторождении Инкай. Электрофациальные ритмы крупные, что объясняется массивностью песчаного репера и малым разбросом гранулометрических характеристик, слагающих уюкский горизонт пород. Однородная, или слабо дифференцированная по вертикали картина проницаемости объектов месторождения Моинкум предполагает возможность массопееноса в нижележащие слои, о чем свидетельствует наличие аномалий по ГК, которые по мере роста глубины затухают.

Соответственно, с учетом явных различий в типах проницаемости по скважинам X1-X4, скважинам X2-X3 и скважинам У1-У4, нами были выявлены три текстурно-структурнотекстурного типа в пределах исследуемых месторождений (Таблица 5.4).

104

	Тип по			Репер по	
Месторожде-	проницаемост	Тип по	Структурно-	ИК,	Характеристика
ние	И	ИК	текстурный тип	мСим/м	репера
Моннуум	Олноролный	Тип 3	Выдержанные по параметрам проницаемости в целом однородные хорошо проницаемые	200-400	пески отсортированные среднезернистые зеленовато-серые
Инкай	Неоднород-ный	Тип 2	Неоднородные невыдержанные по проницаемости толщи с высокодифференцир ованными пропластками разнопоровых материалов (песчано- гравийно- алевралитных)	200-300	пески разнозернистые зеленовато-серые
Инкай	Весьма неоднородный	Тип 1	Неоднородные невыдержанные по проницаемости толщи с пропластками водоупорных материалов (прежде всего глин) и областей обводненности	100-200	пески разнозернистые зеленовато-серые

Таблица	5.4 -	- Выявленные	типы пі	оницаем	лости на	место	рожлениях	Инкай в	яΜ	оинку	M
тастица		DDDDUTeIIIIDIe	1111101 11	oomique	100111 110		ролдонны	I IIII WII I		Chine J.	T.1 T

Выявленные типы обладают следующими характеристиками: однородная среда - Тип 3; дифференцированная среда - Тип 2; высокодифференцированная среда Тип 1. В то же время, присутсвует высокий коэффициент корреляции данных ИК с проницаемостью по всем трем выявленным типа проницаемости, что подтверждает изменение проницаемости как объясняющий фактор изменение ключевой переменной – электропроводности, в разработанной системе уравнений (Таблица 5.5).

Таблица 5.5. - Корреляции данных ИК и проницаемости пород рудоносной толщи на объектах моделирования

Наименование показателя	Коэффициент корреляции для о к, МСим/м						
Тип месторождения	Инкай (Тип1)	Инкай (Тип 2)	Моинкум (Тип 3)				
Глинистость	0,99	0,97	0,68				
Пористость	0,96	0,98	0,9				

Кроме того, ранее выявленные закономерности зависимости проницаемости от глинистости и пористости на уровне статистически значимой взаимосвязи, а также зависимость электропроводности от обводненности, подтверждают возможность моделирования движения жидкости в продуктивном пласте на основании данных индукционного каротажа [84-85].

5.5 Выводы

Индукционный каротаж (ИК), интегрированный с данными геофизических методов исследований скважин (ГМИС), доказал свою эффективность для мониторинга движения растворов в продуктивных пластах. Сравнительный анализ показал, что использование ИК обеспечивает высокую точность выделения зон растекания растворов, особенно в сложных геологических условиях. Данные ИК позволяют не только контролировать динамику фильтрации, но и корректировать технологические параметры процесса закачки растворов, минимизируя потери и повышая эффективность эксплуатации месторождений.

Выполненная типологизация пород месторождений Инкай и Моинкум на основе данных электропроводности и фильтрационно-емкостных характеристик позволила выделить несколько типов пород: высокопроницаемые (с электропроводностью выше 300 мСим/м), среднепроницаемые (150–300 мСим/м) и низкопроницаемые (<150 мСим/м). Эти данные обеспечивают основу для прогноза поведения растворов в продуктивных пластах.

Анализ проницаемости пород месторождений показал, что тип проницаемости (поровая, трещинная или смешанная) оказывает существенное влияние на интерпретацию данных ИК. Для трещинных пород характерна повышенная вариативность электропроводности, что требует использования адаптивных методов обработки данных. В условиях порово-трещинной проницаемости наблюдается сложное распределение потоков растворов, что создает дополнительные трудности при мониторинге. Тем не менее, применение ИК позволяет эффективно выявлять области активной фильтрации, обеспечивая точный контроль за процессом движения растворов.

Исследование влияния типа проницаемости пород на мониторинг методом ИК показало, что индукционный каротаж является универсальным инструментом для анализа и контроля фильтрационно-емкостных процессов в продуктивных пластах. Его эффективность повышается при учете типологии пород и проницаемости, что позволяет адаптировать методы обработки данных к особенностям конкретного месторождения. Применение ИК в комплексе с другими ГМИС обеспечивает более полное понимание динамики движения растворов, позволяя оптимизировать технологии разработки месторождений Инкай и Моинкум. Развитие адаптивных моделей интерпретации данных и совершенствование приборов ИК откроют новые возможности для повышения эффективности мониторинга в условиях сложной геологии.

Содержание раздела и выводы обосновывают второе защищаемое положение:

«Для урановых месторождений Инкай и Моинкум по степени однородности показателей электропроводности рудовмещающих пород выявлены три текстурно-структурных типа проницаемости. Опираясь на доказанную зависимость электропроводности от факторов проницаемости горных пород, текстурно-структурные типы месторождений Инкай и Моинкум по равномерности показателей электропроводности разделены на высокодифференцированные, дифференцированные и однородные».

Материалы раздела опубликованы в [102, 103, 104].

ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПРОДУКТИВНОМ ПЛАСТЕ В УСЛОВИЯХ ОТРАБОТКИ РУДНЫХ ТЕЛ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА

6.1 Моделирование движения технологического раствора на месторождениях пластово-инфильтрационного типа на основе численной модели проницаемости

Параметры модели апробированы в системе MatCad Prime 4.0 с моделированием пространственного и количественного показателя растекания жидкости с выявлением зон потенциального кучного осадконакопления [86, 97, 98].

Моделирование было осуществлено в несколько этапов:

1. Сформирована литолого-стратиграфическая колонка по моделируемым типам месторождений Инкай и Моинкум;

2. Произведена оценка вертикальной проницаемости месторождений Инкай и Моинкум на основе данных индукционного каротажа;

3. Произведена корреляция с данными инклинометрии, кавернометрии, гамма-каротажа и каротажа сопротивлений, данными керна в условиях неоднородности данных по названным ГИС;

4. Произведено укрупнение прослоев по скоррелированным данным для реализации пространственной модели;

5. Реализовано моделирование на основе разработанной математической модели;

6. Сопоставлены данные произведенного моделирование с коэффициентом неоднородности и выработаны направления для дальнейшей оптимизации модели.

7. Произведено итоговое моделирование и выведен результат касательно подтверждения гипотезы;

8. Произведены расчеты параметров растекания.

Для расчета растекания с учетом специфики структурно-текстурного строения объектов моделирования, были сформированы два блока автоматизированных моделей среды рудовмещающего тела, подлежащие дальнейшей корреляции и сопоставлению:

1) фильтрационная модель, учитывающая характер проницаемости пород;

 геофизическая модель, учитывающая электромагнитные свойства пород, а именно – электропроводности.

Названные модели являются стационарными, описывающими статичные свойства по данным геофизических и геологических исследований. В сформированных модельных средах
затем были симулированы динамические процессы движения раствора в ходе выщелачивания и дальнейшего растекания [87, 96].

Для создания серии моделей в соответствии с выявленной неоднородностью по данным ИК целесообразно было внести некоторые оптимизационные решения в разработанный базовый математический аппарат.

Оптимизационные решения коснулись:

- 1. Расчета средних параметров проницаемости и электропроводности в зависимости от степени послойной дифференцировки сред;
- 2. Учета режима движения раствора в пласте как динамически устоявшегося;
- Внесение параметра опорного давления (нефизического параметра) для адекватного запуска решателя в MathCad;
- Выбор метода аппроксимации для достижения сходимости при проверке качества моделей;
- 5. Внесение эксплуатационных параметров скважинного фонда в динамический блок модели.

Далее изложены подробнее особенности оптимизационных решений.

Наиболее важная особенность из изученных ранее на объектах моделирования – неоднородность по текстурно-структурному типу, что стало причиной оптимизации исходных данных для построения расчетной физико-математической сетки, с учетом специфики каждого выявленного типа [88-89].

Наиболее сложный с точки зрения построения модельной среды - типы месторождения Инкай, потребовали учета неоднородности прослоев в пределах рудовмещающего тела.

Известно, что пространственная проницаемость, под которой в случае отработки урановорудного месторождения понимается эффективная проницаемость, в разработанной модели определяется тензором, в общем виде, имеющим следующие параметры:

$$k_{прон.} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} при k_{ij} = k_{ij} (i, j = x, y, z)$$
(6.1)

где:

х,у,z = координаты блока модельной среды;

k_{ij} – значения коэффициента проницаемости.

В случае месторождения Инкай, среда не может считаться изотропной, так как $k_x \neq k_y \neq k_z$, т.е. соотношение изменения проницаемости, в силу диффузно-инфильтрационного типа изменения проницаемости под воздействием процесса выщелачивания имеет вид:

$$k_x \approx k_y \neq k_{z,},$$
 при $k_z > k_{y,} k_x$

соответственно, моделируемая среда является анизотропной, причем для месторождения Инкай выраженность анизотропии по вертикали и горизонтали, для месторождения Моинкум – по вертикали.

Аналогичным образом,

Для месторождения Инкай (Тип 1 и Тип 2):

$$\sigma_x \approx \sigma_y \leq \sigma_{z,,}$$

Для месторождения Моинкум (Тип 3) в виду выдержанности прослоев и их относительной мощности и однородности:

$$\sigma_{x} \approx \sigma_{y} \approx \sigma_{z,}, \tag{6.3}$$

При выявленной анизотропности среды и наличии высокой неоднородности (в моделируемом случае – тип 1 и тип 2), средняя проницаемость рудовмещающего слоя должна учитывать послойную дифференцировку [97-98]. В нашем случае, с учетом принятого допущения о преимущественно вертикальном растекании раствора, для типа 1 и типа 2 (месторождение Инкай) использована следующая расчетная формула при вертикальном напластовании:

$$k_{av} = \sum_{i=1}^{3} (k_i \ h_i) / \sum_{i=1}^{3} h_i$$
(6.4)

Где:

h_i - высота пропластков;

k_i - проницаемость пропластков.

Аналогично для пропластков вычислены ср. значения электропроводности:

$$σ_{av} = \sum_{i=1}^{3} (\sigma_i \ h_i) / \sum_{i=1}^{3} h_i$$
(6.5)

Γде:

h_i - высота пропластков;

О_і - высота пропластков.

Для Моинкум в процессе моделирования слоев рудовмещающего тела были использована формула стандартных средних в виду исключительной выдержанности пространства слоев по текстуре и структуре. Следующим оптимизационным решением стала корректировка модели движения раствора. Несмотря на то, что в базовом разработанном математическом аппарате модели дифференциальные уравнения описывают линейные взаимосвязи стационарного процесса, движение раствора – процесс динамический. При этом все объекты моделирования находятся на стадии активной разработки, процесс выщелачивания соответственно является динамическим процессом, соответствующим устоявшемуся гидродинамическому режиму. Следовательно, в рабочие настройки модели при реализации в программной среде были внесены следующие поправки:

1) Режим устоявшийся, стабилизированный по дебиту при Q₁=Q₂:

2) Было определено критическое число Рейнольдса Rekp = 0,022 – 0,29. Было выявлено, что на основе данных по рабочим фондам месторождений Инкай и Моинкум, при скорости фильтрации в пределах 4,4 -15.4 м³/ч закон Дарси не нарушается. Соответственно, течение раствора ламинарное.

 Радиальное течение околоскважинного пространства рассчитано по модели Писмана;

Признаем течение как стационарное:

$$\sum_{j=1}^{4} qj = Q \tag{6.6}$$

Где:

j- индекс расчетных ячеек;

q – Поток в ячейке.

Адаптируем в соответсвии с функциональным перетоком из закачной в откачную скважину поток раствора;

 $Q = WI (p_0 - U)$ (6.7)

Учтем в расчете коэффициента продуктивности WI скин-фактор S на потери в силу массопереноса:

$$WI = \frac{2\pi kh}{\mu} * \frac{1}{ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right) + s}$$
(6.8)

Затем был рассчитан параметр опорного давления. Данный параметр является нефизическим и необходим как компонент алгоритма, по которому автоматизированный решатель программной среды строит численную систему.

Опорное давление выражено следующим алгоритмом из расчета, что репер рудовмещающего тела представлен влажными песками на глубине свыше 150 м, что позволило выбрать общий параметр, варьированный по углу падения пласта в условно упруго-пластичной среде рудовмещающей толщи:

$$k$$
 напряжений = γ H=(cos² α + sin² α * η) (6.9)

где а — угол падения пласта, град.;

η — коэффициент бокового распора пород, зависящая о глубины и составляет для Инкай 0,5, для Моинкум – 0,3

При решении нахождения опорного давления был использован метод осесимметричной задачи, учитывающий краевое раздавливание зоны напластования рудовмещающего тела. Принято допущение, что $Q_1=Q_2$ (скважины закачные и откачные равнодебитны, $\sum Q=0$, тогда опорное давление рассчитывается по формуле Динника:

$$\gamma H_z = \left(1 - ke^{\frac{-2x}{l}}\right) \tag{6.10}$$

Для месторождения Инкай опорное давление составило 197, 6 мПа.

Для месторождения Моинкум – 180, 2 мПа.

Также, в процессе пилотного запуска модели возникли погрешности, препятствующие сходимости результатов выбранной модели, которые потребовали введения параметров сглаживания. Для коррекции этапов алгоритма были использованы неявные методы сглаживания:

Так как среда является вертикально-анизотропной, а исходная матрица k и σ имеет вид 3*3, то перемножим исходную матрицу на обратную k⁻¹ и σ^{-1} . Матрицы k⁻¹ и σ^{-1} являясь невыражденными, имеют численное решение идентичное исходным матрицам, а система, используемая решателем, принимает вид:

$$k^{-1}(A\vec{z}) = k^{-1}\vec{b}$$
 (6.11)

Аналогично:

$$\sigma^{-1}(A\vec{z}) = \sigma^{-1}\vec{b} \tag{6.12}$$

Для расчета также была составлена базовая таблица параметров раствора (Таблица 6.1). Основным допущением является признание H₂SO₄ в качестве основного раствора.

Таблица 6.1 – Параметры сернокислого выщелачивающего раствора для моделирования

Параметры раствора H2SO4							
	Инкай	Моинкум					
Динамическая вязкость, мПа	17,2	21					
Плотность, кг/м.кв.	1005	1007					
Концентрация	1,30%	1,70%					
Молярная концентрация, моль/м.куб.	6000	7000					

Дополнительные данные получены из ранее анализированных и скоррелированных данных ГИС в соответствии с выявленной типологией.

6.2 Результаты моделирования движения жидкостей в процессе ПСВ на месторождениях Инкай и Моинкум

В результате моделирования сформирована картина изменения фильтрационных скоростей по каждому выявленному текстурно-структурному типу (Рисунки 6. 1-6.3).



Рисунок 6.1 – Изменения фильтрационных скоростей на месторождениях в зависимости от о (Инкай: Тип 1)



Рисунок 6.2 – Изменения фильтрационных скоростей на месторождениях в зависимости от σ (Инкай: Тип 2)



Рисунок 6.3 – Изменения фильтрационных скоростей на месторождениях в зависимости от о (Моинкум: Тип 3)

Обращает на себя внимание достаточно слабая динамика фильтрационных свойств первого текстурно-структурного типа, что является следствием наличия пропластков со слабопроницаемыми и непроницаемыми породами. В целом динамика проницаемости по месторождениям всех текстурно-структурных типов отражает зависимость от петрофизических

и литологических свойств [90, 91]. В результате моделирования были получены данные по распределению областей проницаемости (Приложение В)

Обращает на себя зависимость увеличения разброса и в целом скорости фильтрации от типа месторождений. Так, наиболее высокая скорость фильтрации отмечается у Типа 3 (месторождения Моинкум), наиболее низкая – у месторождения Инкай Тип 1. Моделирование распределения проницаемости и электропроводности дало воможность утверждать о справедливости ранее выдвинутой гипотезы тождественности распределений проницаемости и электропроводности дало воможность утверждать о справедливости ранее выдвинутой гипотезы тождественности распределений проницаемости и электропроводности от распределений проницаемости и зависимость от глубины и проницаемости пропластков (Рисунок 6.4).



Рисунок 6.4 – Линейные зависимости электропроводности от проницаемости

При этом, распределение электропроводности в зоне растекания ниже области заксиления достаточно хорошо демонстрирует зону вторичного орудинения на моделируемой группе скважин Типа 3 Моинкум и Типа 1 (Инкай). По типу 1 наличие прослоев с высокой и низкой электропроводностью при равномерной проницаемости свидетельствует об обводненности и соответственно- поверхностном пленочном вторичном рудонакоплени в зоне сцементированных песков на глубине от 1- до 6 метров ниже зоны закисления. По месторождению Моинкум графический анализ позволяет оценить зонку растекания вниз порядка 7-13 метров и ниже зоны вторичного орудинения потенциальная глубина растекания составит 3-4 метра.

В соответстви с выделенными особенностями и доказанной справедливостью гипотезы 1 и 2, была применена формула растекания растворов в зависимости от коэффициента однородности и получены данные по характеру растекания (Таблица 6.2).

Таблица 6.2 - Данные для расчета площадей растекания растворов по стандартной и разработанной методике

Текстурно-структурный Тип толщи	Параметры для расчета				
Инкай Тип 1	L фильтра	$\Delta \sigma$			
Скв.Х1	6,2	0,37			
Скв.ХЗ	6,6	0,32			
Инкай Тип 2					
Скв.Х2	7	0,51			
Скв.Х4	7,6	0,48			
Моинкум Тип 3					
Скв.У1	7	0,72			
Скв.У2	6	0,72			
Скв.УЗ	7	0,73			
Скв.У4	6	0,72			

На управляющих предприятиях принята следующая формула расчета растекания растворов:

(6.13)

(6.14)

S = 0.2L + L + 0.6L

Где:

L – длина фильтра, м.

0,61 – поправочный коэффициент.

Согласно разработанной формуле:

 $S = \Delta \sigma L + 0, 2L + L$

Δσ –распределение электропроводности, выступающее дифференцированным по структурно-текстурному типу поправочным коэффициентом. Ниже представлены результаты полученных расчетов (Таблица 6.3)

Таблица 6.3 – Данные по характеру растекания растворов по типам рудовмещающей толщи на примере скважин X-У1 месторождений Инкай и Моинкум

	Результаты расчета				
Текстурно-структурный Тип толщи	По стандартному поправочному коэффициенту	По разработанному дифференцированному коэффициенту			
Инкай Тип 1					
Скв. Х1	11,222	9,734			
Скв. ХЗ	11,946	10,032			
Инкай Тип 2					
Скв. Х2	12,67	11,97			
Скв. Х4	13,756	12,768			
Моинкум Тип 3					
Скв. У1	12,67	13,44			
Скв. У2	10,86	11,52			
Скв. УЗ	12,67	13,51			
Скв. У4	10,86	11,52			

По результатам опытных расчетов, разработанная методика оценки вертикального растекания раствора является наиболее точной и приближенной к результатам каротажных исследований, что подтверждает эффективность предложенной модели на основе оценки данных по ИК.

Такм образом, моделирование движения технологических растворов в рудоносной толще по месторождению Инкай и Моинкум позволило сделать следующие выводы:

1. На основании поэтапного многокомпонентного моделироания параметров электропроводности и фильтрационных параметров месторождений вывленных типов подтвердились гипотезы: а) о зависимости глубины растекания вниз и скорости фильтрации от однородности пропластков; б) о тождествености распределения областей проницаемости и электропроводности на пластово-инфильтрационных месторождениях с репером осадочных песков;

2. Выявленное повыщение скорости фильтрации в зоне нижнего растекания раствора свидетельствует о процессе массопереноса (метасоматическом процессе), наиболее выраженном в толщах Типа 1 и 3.

3. В толщах Типа 1 наличие непроницаемых пропластков создает условия для пленочного типа вторичного осадконакопления и локальных очагов техногенного рудогенеза;

4. В толщах Типа 3 выражены процессы растекания вниз. Дисперсный характер орудинения на месторождении Моинкум в целом позволяет говорить о преобладании дифффузного метасоматического процесса в пределах рудовмещающей толщи на значительном расстоянии;

5. На основании произведенного анализа и моделирования разработана модель оценки горизонтального растекания раствора на основании разработанного дифференцированного коэффициента, учитывающего степень вертикальной анизотропии рудоносной толщи в соответсвии со структурно-текстурным типом.

Произведенное моделирование позволяет сделать резюмирующий вывод о следующий возможных путях совершенствования процесса выщелачивания на выявленных:

1. Для месторождения Инкай по Типу 1 и 2 целесообразно повышение концентрации раствора и повышение частоты ИК с применением БКЗ (особенно для Типа 1);

2. Для месторождения Моинкум (тип 3) целесообразно применение гексогональной схемы расположнеия скважин для лучшей отработки при значительном растекании по горизонтали.

6.3 Моделирование отработки участков вторичного рудогенеза

Выявленные в ходе комплексного анализа и моделирования текстурно-структурные типы месторождений, охваченные данным исследованием, имеют достаточно широкий разброс, как по показателям проницаемости, так и по параметрам петрофизических свойств. Соответственно, рекомендации, изложенные ниже, учитывают данные различия. Однако, существуют общие закономерности [90-93], которые легли в основу разработанных рекомендаций, а именно:

-площадь растекания технологических растворов в процессе разработки прямо пропорциональна степени вертикальной дифференцировки. Соответственно, вертикальновыраженная анизотропия является ведущим фактором, который необходимо учитывать при оптимизации гидродинамического режима;

-в целом, исходя из данных по объектам моделирования и анализа, на месторождениях пластово-инфильтрационного типа Чу-Сарысуйской урановорудной провинции с песчаным репером, вне зависимости от степени глинистости, вертикальная анизотропия более выражена, нежели горизонтальная;

-наличие высоконапорных пластовых вод в пределах рудовмещающего горизонта является индикатором для постановки вопроса о переоценки запасов путем доразведки методом ИК на предмет регенерированных ураноносных интервалов;

-наличие непроницаемых пропластков глин служит основанием для распределения остаточного техногенного оруденения в виде наплывов и пленок урановых минералов;

118

-степень концентрации раствора и уровень давления оказывает влияние на интенсивность регенерационных процессов, в зависимости от литолого-фациальной картины;

-на технологических блоках с сильно выраженной вертикальной фациальной неоднородностью (Тип 1 месторождения Иинкай), целесообразно повышение частоты аппарата индукционного каротажа для лучшей дифференцировки тонкослоистых участков с неоднородным электрическим сопротивлением пород и контроля движения жидкостей.

В соответствии с вышеназванными особенностями, был разработан алгоритм оптимизации отработки рудовмещающей толщи с использованием данных индукционного каротажа. В общем виде предлагаемый алгоритм опирается на выявленные закономерности зависимости степени растекания растворов в соответствии с особенностями текстурноструктурного типа (Таблица 6.4).

Текстурно- структурный тип	Значение коэффициента однородности по ИК	Направление растекания	Диапазон распознования аппарата ИК
Тип 1 (Инкай)	0,3	Вертикально- горизонтальное	Высокочастотный (0,88 мГц) для тонкослоистых пропластков с неоднородным составом наряду со стандартным
Тип 2 (Инкай)	0,51	Вертикально- горизонтальное	Стандартный от 0 до 500 Ом/м
Тип 3 (Моинкум)	0,72	Преимущественно вертикальное	Стандартный от 0 до 500 Ом/м

Таблица 6.4 – Зависимость направления оптимизации от текстурно-структурного типа

На месторождении Инкай в условиях рудоносных толщ первого текстурно-структурного типа целесообразно применение как стандартной аппаратуры для распознавания макроритмов, так и высокочастнотной – для лучшей дифференцировки тончайших пропластков с толщиной от двух метров и менее и разнородной литолого-фациальной характеристикой, и проницаемостью [59].

В соответствии с разработанным и апробированным на моделях объектов исследования коэффициентом однородности, была сформирован алгоритм оптимизационных решений, опирающийся на следующие граничные условия по электропроводности пород скважины (Таблица 6.5).

Таблица 6.5 – Предлагаемые граничные условия для разработанного алгоритма оптимизации режима отработки на месторождениях пластово-инфильтрационного типа

Значение коэффициента однородности электропроводности по вертикальному разрезу	Расшифровка значения коэффициента	Оптимизационные решения
0,75 и более	весьма однородный	Контроль скорости фильтрации в
0,74-0,55	однородный	зависимости от стадии разработки Увеличение наклона скважины (на этапе проектирования) Использование гексагональной схемы расположения скважин
0,54-0,25	неоднородный	Повышение концентрации раствора и
0,25 и менее	весьма неоднородный	давления на зрелой стадии отработки; Приоритизация интервалов с возможностью вторичного орудинения;

Заявленные в таблице выше направления оптимизации отработки предлагается формировать по данным индукционного каротажа до и во время разработки технологических блоков месторождения вплоть до их ликвидации. Целью разработанных рекомендаций является наиболее эффективное освоение залежей на основании реализации алгоритма контроля и корректировки гидродинамического режима с применением индукционного каротажа. Это позволит оперативно корректировать технологические параметры работы скважинного фонда и корректировать проектную дату истощения месторождения за счет более полного рудоизвлечения.

Особенно эффективен предложенный алгоритм контроля движения раствора в условиях, когда по тем или иным причинам не удается обеспечить полную картину по комплексу ГИС. Применением индукционного каротажа допускает использование (при наличии соответствующей модификации зонда) в условиях непрерывного процесса выщелачивания. Кроме того, ИК показывает, несмотря на определенные ограничения, более объективную картину, нежели КС и ПС в средах с прослоями с высоким удельным электрическим сопротивлением.

Следует отметить, что рекомендуемая частота проведения индукционного каротажа – раз в три месяца [80].

Рекомендуемая периодичность проведения ИК опирается на скорость выщелачивания, которая пропорциональна концентрации раствора и скорости перехода минерала из твердой фазы в сорбционную при различных исходных параметрах (PH) среды, охваченной выщелачиванием [81, 83].

При этом принято допущение о диффузном характере массопереноса и относительной стационарности давления и температур, поддерживаемых технологическим путем.

Соответственно, принимая условия химической реакции как стационарные, скорость выщелачивания определяется формулой:

$$-\frac{dC_1}{d_{\tau}} = \frac{c_{1*}F}{\frac{\delta_1}{D_1} + \frac{\delta_2}{D_2} + \frac{1}{K}}$$
(6.15)

Где:

 $\frac{\delta 1}{D1}$ - внешнее диффузное сопротивление;

 $\frac{\delta^2}{D^2}$ - внутреннее диффузное сопротивление;

 $\frac{1}{\kappa}$ - химическое сопротивление;

К- константа скорости прямой химической реакции;

 δ - толщина диффузного слоя;

С1 – концентрация раствора;

D – коэффициенты молекулярной диффузии в порах (1) и твердом продукте (2) [83].

Так как химическое сопротивление ничтожно, то скорость реакции в случае объекта исследования определяется внешней и внутренней диффузией.

Следует отметить, что рекомендуемая частота применения ИК может быть скорректирована в зависимости от стадии разработки месторождения. На поздней и зрелой стадиях разработки скорость реакции будет падать, что особенно важно учитывать при невысокой концентрации раствора [81].

При регулировании температуры также возможно корректировка скорости выщелачивания, так как данный показатель находится в прямой зависимости от температурного режима и в обратной – от вязкости:

$$D = \frac{T}{N_a} * \frac{1}{3\pi\mu d} \tag{6.16}$$

Где;

D- коэффициент молекулярной диффузии;

Т- температура;

μ- вязкость раствора;

N_a-число Авогадро (6, 02*10^23)

d - диффузная пленка Нернета (0,03 мм для Инкай и 0,003 для Моинкум) [84].

При повышении температур на каждые 10 градусов, скорость выщелачивания увеличивается в среднем в 1, 5 раза, что следует учитывать не только при формировании графика проведения каротажных работ, но и разработки оптимизационных решений в отношении

фильтрационного режима [86-87]. Обобщая вышеизложенные базовые условия для разработки оптимизационных решений, был составлен алгоритм оптимизации режима выщелачивания для месторождений пластово-инфильтрационного типа в зависимости от текстурно-структурного подтипа (Рисунок 6.5).



Рисунок 6.5 – Разработанный алгоритм оптимизационных решений для режима выщелачивания на месторождениях пластово-инфильтрационного типа

Для месторождения Инкай, представленного первым и вторым выявленными текстурноструктурными типами, наибольший интерес представляет задача интенсификации процесса выщелачивания из порового пространства слабопроницаемых пропластков и с другой стороны – отработки вторичного рудогенеза на участках с прослоями глин и высокообводненных пород. Наиболее ярко выражены участки с глинистыми линзами в пределах наиболее сложного – первого текстурно-структурного типа.

Расположенные в пределах технологического блока скважины с данным текстурноструктурным типом отличаются крайней неоднородностью, нессиметричностью залегания пропластков с большим разнообразием как по толщине, так и по фильтрационным и петрофизическим свойствам. Литолого-фациальная картина крайне дифференцирована с наличием практически непроницаемых линз, пересекающих рудное тело. На поверхности глинистых линз имеются высокопроницаемые ролообразные участки, кавернозные образования, что может выступать с одной стороны – областью техногенного изменения гидрологической обстановки в пределах рудовмещающей толщи и с другой стороны – областью вторичного осаждения уранилсульфата. Порово-трещиновый характер области орудинения создает предпосылки для формирования участков залежи, неохваченной процессом выщелачивания.

Для 2-го текстурно-структурного типа менее характерны глиняные образования и кавернозные участки менее выражены, что создает более равномерную фациальную картину.

Однако, и данный текстурно-структурный тип подразумевает достаточно высокую дифференцировку тонких напластований. Соответственно, в данном случае целесообразно повышение концентрации раствора и регулирование скорости фильтрации, напорного давления и температуры. Ниже представлены данные по технологическим параметрам режима выщелачивания по скважинам Типа 1 и 2 месторождения Инкай (Таблица 6.6).

Таблица 6.6 – Рекомендуемые параметры режима выщелачивания для месторождения Инкай (Тип 1)

	Предлагаемые параметры скважин					
Параметры	Значение по си	кв. х1 (закачная)	Значение по сн	Значение по скв. х3 (откачная)		
	Фактическое	Рекомендуемое	Фактическое	Рекомендуемое		
Вязкость раствора, мРа*с	17,2	15,5	17,2	15,5		
Скорость фильтрации,	7,7	10-15	5,4	10		
м ³ /с						
Напорное давление, мПа	193,9	203	193,9	200		
Температура раствора, К	301,15(28)	313,15 (40)	301,15 (28)	311,15(38)		
(град. С°)						

Аналогичным образом сформированы рекомендуемые параметры для режима выщелачивания Типа 2 (месторождение Инкай) (Таблица 6.7).

Таблица 6.7 – Рекомендуемые параметры режима выщелачивания для месторождения Инкай (Тип 2)

	Предлагаемые параметры скважин					
Параметры	Значение по сн	кв. х2 (закачная)	Значение по	скв. х4 (откачная)		
	Фактическая	Рекомендуемое	Фактическая	Рекомендуемое		
Вязкость	17,2	17,2	17,2	17,2		
раствора, мПа						
Скорость	12,2	14,5	6,7	7,7		
фильтрации, м ³ /с						
Концентрация	1,3%	1,7%	1,3%	1,7%		
раствора, %						
Напорное	193,9	203	193,9	200		
давление, мПа						
Температура	301,15 (28)	311,15 (38)	301,15 (28)	311,15 (38)		
раствора, К						
(град. С°)						

Предложенные рекомендации апробированы в модельном расчете, приведенном далее. Целью данного блока модели было формирование зависимости давления, температуры, вязкости и скорости фильтрации на скорость массопереноса посредством регулирования процесса выщелачивания через регулирование его площади и ускорения времени протекания диффузного процесса.

Рекомендованные параметры целесообразно регулировать в соответствии со стадией разработки технологического блока и контролем концентрации урана по дебиту откачных скважин. Повышение концентрации раствора и скорости фильтрации позволит увеличить площадь охвата выщелачиванием и интенсивность молекулярной диффузии, что в свою очередь позволит увеличить извлекаемость руды.

Месторождение Моинкум, представлено достаточно однородной по текстурноструктурным, а значит и фильтрационным свойствам рудоносной толщей. Основную проблему составляет значительное увеличение продуктивной мощности при выщелачивании, что объясняется хорошей проницаемостью с одной стороны, и проблемой повышения продуктивности выщелачивания – с другой. На месторождении Моинкум несколько рудных интервалов характеризуются существенной площадью растекания по вертикали как вверх, так и вниз, что создает предпосылки для слияния интервалов первичного и вторичного орудинения. Вертикальный массоперенос интенсифицируется под воздействием высоких температур и концентрации раствора, повышенной скорости фильтрации (до 54 м³/ч).

Данные технологические параметры продиктованы необходимостью рудоизвлечения в условиях дисперсного оруденения [83]. Однако, при неизменном режиме наряду с поддержанием высокой скорости выщелачивания, также создаются условия для интенсификации массопереноса в более глубокие слои, что отмечено на каротажных диаграммах. В данном случае оптимизационное решение сводится к регулированию как напорной мощности раствора закачного фонда, так и снижению скорости фильтрации на стадии отработки на основании данных по концентрации урана на дебете. Кроме того, для предотвращения массопереноса в нижележащие интервалы целесообразно произвести повышение вязкости раствора, что позволит сократить интенсивность диффузии без ущерба эффективности выщелачивания при дисперсном орудинении.

Ниже представлены рекомендуемые параметры режима выщелачивания для Типа 3 месторождение Моинкум (Таблица 6.8).

Таким образом, для месторождения Моинкум рекомендуемые параметры вязкости, давления и скорости фильтрации будут способствовать сохранению площади выщелачивания рудоносной толщи, и снижению интенсивности диффузно-инфильтрационного массопереноса в нижележащие интервалы, что повысит эффективность процесса выщелачивания, увеличив концентрацию по дебиту.

		Предлагаемые параметры скважин						
Параметры	Значение по скв. У1 (закачная)		Значение по скв. У2 (откачная)		Значение по скв. УЗ (закачная)		Значение по скв. У4 (закачная)	
	Фактическая	Рекомендуемо е	Фактическая	Рекомендуемо е	Фактическая	Рекомендуемо е	Фактическая	Рекомендуемо е
Вязкость раствора, мПа	21	23	21	23	19,7	21	19,7	21
Скорость фильтрации, м ³ /с	54,4	27,5	14,5	14,5	10,6	10,6	54,3	27,5
Концентрация раствора, %	1,5	1,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Напорное давление, мПа	193,9	185,5	193,9	185,5	193,9	185,5	193,9	185,5
Температура раствора, К (град. С°)	311,15 (38)	311,15 (38)	311,15 (38)	311,15 (38)	311,15 (38)	311,15 (38)	311,15 (38)	311,15 (38)

Таблица 6.8 –	Рекоменлуемые па	араметры вышелачивания	лля месторох	кления Моинкум
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		

С учетом предложенных рекомендаций были произведены преобразования в структуре решателя ранее разработанной модели. В первую очередь, был произведен ввод переменных скорости фильтрации, температур и давления. Ниже представлены введенные в решатель переменные и их значения, помимо значений, предусмотренных в п. 4.2 с учетом рекомендаций (Таблица 6.9).

Таблица 6.9 – Переменные для оптимизации фильтрационной модели месторождений Инкай и Моинку [85, 86]

Парамотр	Инкай Тип 1		Инкай Тип 2		Моинкум Тип 3			
параметр	скв. ХІ	скв. ХЗ	скв. Х2	скв. Х4	скв. УІ	скв. УЗ	скв. У2	скв. У4
Дебит раствора,	10	15,5	7,4	7,5	14,2	12,6	11,7	8,5
м ³ ./ч								
Проницаемость	0,0005-	0,0004-	0,02-0,1	0,02-0,3	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5
рудовмещающей	0,4	0,5						
породы, мкм								
Пористость, %	35	32	21	16	28	26	26	28
Глинистость, %	39,6	42	18,7	21	19,4	20	20	20
Плотность	1005	1005	1003	1003	1007	1007	1007	1007
раствора, кг/м ²								
Молярная	6000	6000	6000	6000	7000	7000	7000	7000
концентрация								
раствора, моль/м ³								

В настройке решателя были произведены преобразования процесса из стационарного в динамический, с соответствующей формулой, регулируемой законом Дарси:

$$\frac{\partial}{\partial t} * (\epsilon_p \rho) + \nabla * (\rho u) = Q_m \tag{6.17}$$

Где:

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} \nabla \rho \tag{6.18}$$

Используем ранее представленное уравнение кинетической диффузии (4.1), найдем коэффициенты диффузии на месторождениях выявленных типов (Таблица 6.10).

Таблица 6.10 – Найденные значения коэффициента внешней диффузии по месторождениям Инкай и Моинкум

Инкай (Тип 1)					Инкай	(Тип 2)	
скв	.X1	СКВ	скв.ХЗ		скв.Х2		кв.Х4
D нач.	D рек.	D нач.	D рек.	D нач.	D рек.	D нач.	D рек.
9,99288E-	1,15307E-	9,99288E-	1,03247E-	9,99288E-	1,03247E-	9,99288E	1.02247E.22
23	22	23	22	23	22	-23	1,03247E-22
Моинкум (Ти	ип 3)						
СКВ	.У1	скв	скв.У2 скв.У3		с	скв.У4	
D нач	D рек	D нач	D рек	D нач	D рек	D нач	D рек
8,45642E-	7,72108E-	3,30923E-	7,72108E-		8,45642E-	9,01446E	
22	22	23	22	9,01446E-22	22	-22	8,45642E-22

Обратим внимание, что предложенные значения по месторождению Инкай увеличивают коэффициент диффузии, а по месторождению Моинкум – снижают его, соответственно регулируя скорость выщелачивания, что отвечает цели предложенных оптимизационных решений.

Аналогичным образом найдем скорости диффузии. Примем допущение, что поскольку PH>1, то образуется трисульфатный комплекс анионов уранила, константа которого равна 2500 [87-89].

Площадь, охваченная диффузными процессами, рассчитана ранее в главе 3 и принята за интервал растекания вниз, поскольку именно вертикальная инфильтрация раствора и массоперенос по вертикали уранилсульфата способствует вторичному рудогенезу на месторождениях данного типа.

Следующее допущение опирается на положение о том, что скорость выщелачивания определяется скоростью диффузного массопереноса в большей степени, нежели скоростью химической реакции. Соответственно, запишем уравнение скорости выщелачивания в виде:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{DFdC}{dx} \tag{6.19}$$

Поскольку скорость выщелачивания прямо пропорциональна температуре и обратна пропорциональная вязкости, а dN/dt - количество продиффундированного раствора равное коэффициенту фильтрации, то предложенная нами модель примет вид:

$$\cup = \frac{DFdC}{d} \tag{6.20}$$

Где;

υD-скорость массопереноса;

D- коэффициент диффузии;

F- площадь фильтрации;

d-толщина диффузного слоя;

С-концентрация раствора [84].

Исходя из вышеприведенной формулы, рассчитаем скорости массопереноса во внешнем диффузном слое (Таблица 6.11)

Таблица 6.11 – Найденные значения скорости диффузии по месторождению Инкай и Моинкум

Инкай (Тип 1)				Инкай (Тип 2)			
скв.	скв. Х1 скв. Х3		скв. Х2		скв. Х4		
vD нач.	vD рек.	vD нач.	vD рек.	vD нач.	vD рек.	vD нач.	vD рек.
5,83624	7,85681	6,01491	7,25042	7,17688	8,65107	7,65534	9,22781
E-18	E-18	E-18	E-18	E-18	E-18	E-18	E-18
			Моинкум	и (Тип 3)			
скв.	У1	СКВ	. У2	скв. УЗ		скв. У4	
vD нач	vD рек	vD нач	vD рек	vD нач	vD рек	vD нач	vD рек
6,81926	6,22628	2,66856	6,22628	8,52498	7,99724	7,26926	6,81926
E-17	E-17	E-18	E-17	E-17	E-17	E-17	E-17

В результате расчетов, было выявлено, что по месторождению Инкай предложенные рекомендации повышают скорость выщелачивания, и, в соответствии с положениями кинетики диффузной химической реакции сернокислого раствора, повышают ее температуру, что увеличивает массоперенос и, следовательно – повышает продуктивность процесса выщелачивания [90, 96].

По месторождению Моинкум, предложенные рекомендации несколько снижают скорость массопереноса, в среднем на 8,6-10 %, что является достаточным для снижения риска ускорения и увеличения масштабов образования вторичного оруденения на интервалах ниже границы закисления. В конечном счете, с учетом дисперсного оруденения и преобладания диффузного

массопереноса в его пределах предложенный режим выщелачивания позволяет эффективнее разрабатывать рудоносную толщу после вскрытия. В соответствии с произведенными ранее расчетами и рекомендациями, с применением регрессионного моделирования методом наименьших квадратов, сформированы прогнозные показатели, опирающиеся на зависимости рекомендуемых параметров и скорости массопереноса.

В соответствии с произведенным расчетом, область определений для месторождения Инкай (Тип 1) находится в пределах скорости фильтрации в 7,7 – 14,5 м³/сут (Рисунок 6.6).



Рисунок 6.6 – Изменение скорости массопереноса в зависимости от скорости фильтрации и концентрации раствора на месторождении Инкай

Для месторождения Моинкум оптимальные скорости фильтрации находятся в диапазоне 10-27 м³/сут (Рисунок 6.7).



Рисунок 6.7 – Изменение скорости массопереноса в зависимости от скорости фильтрации и концентрации раствора на месторождении Моинкум

Далее были сформированы графики зависимости давления, температур и скорости массопереноса (Рисунок 6.8).



Рисунок 6.8 – Изменение скорости массопереноса в зависимости от температур и напорного давления раствора на месторождении Инкай

Оптимальный термобарический режим выщелачивания для месторождения Инкай определен в пределах 311,5-313,5 К° при напорном давлении рабочего раствора в 200-203 Па. На месторождении Моинкум изменения термобарического режима не оказали по результатам моделирования существенных изменений в показателях скорости массопереноса. Аналогичным образом сформированы графики зависимости скорости массопереноса от вязкости для месторождения Моинкум (Рисунок 6.9)

Область оптимальной вязкости для месторождения Моинкум определяется диапазоном в 19,5-21 мРа*с. Рассчитанные параметры численно совпадают с рекомендованными ранее в п. 4.2 значениями, что свидетельствует о целесообразности предложенной модели.

В соответствии с предложенными оптимизационными рекомендациями по регулированию скорости массопереноса, произведено прогнозирование дебита раствора при фактической и рекомендуемой фильтрационной модели. Как иллюстрирует ниже приведенная схема (Рисунок 6.10), предлагаемые оптимизационные решения позволят скорректировать скорость массопереноса в соответствии со текстурно-структурным типом рудовмещающей толщи.



Рисунок 6.9 – Изменение скорости массопереноса в зависимости от динамической вязкости раствора на месторождении Моинкум



Рисунок 6.10 – Скорости массопереноса при фактическом и рекомендуемом режимах выщелачивания: а) Инкай; б) Моинкум

Моделирование изменения скорости массопереноса указывает на эффективность и целесообразность предложенных оптимизационных решений. Данные селективные решения сформированы на основании разработанной модели определения текстурно-структурного типа

по данным индукционного каротажа. Результаты моделирования предложенных режимов выщелачивания, оптимизированных точки зрения степени литологической с И петрофизикохимической неоднородности, убедительно доказывают, формирование что прогнозируемого контура закисления, а также моделирование оптимального режима выщелачивания являются весомыми факторами продуктивной отработки месторождения. В зависимости от текстурно-структурного типа целесообразно регулировать параметры закачки раствора и его физико-химические свойства, исходя из возможностей и условий кинетики выщелачивания, которые определены петрофизикохимическими и текстурно-структурными свойствами пород и определяют потенциал инфильтрационного вторичного рудогенеза в пределах рудоносной толщи.

Так, на месторождении Инкай сложная литотолого-фациальная обстановка, неоднородность рудовмещающих пород по фильтрационным свойствам, а также наличие пропластков с низкой проницаемостью, кавернозность отдельных участков предполагает необходимость интенсификации режима выщелачивания, как по термобарическим, так и по химическим условиям. Повышение температуры и рабочего давления (даже незначительное), дает возможность повышения площади охваченной диффузным процессом за счет выщелачивания из порово-трещинового каркаса слабопроницаемых пород хорошо растворимого минерала. Одновременно повышение концентрации серной кислоты позволит также охватить слабопроницаемые породы.

Для месторождения Моинкум оптимизационные решения сформированы с учетом несколько иной геолого-физической обстановки. В условиях месторождения Моинкум наибольший риск снижения продуктивности выщелачивания и одновременно – наибольший интерес с позиции повышения объема балансовых руд представляет процесс техногенного рудогенеза на ниже лежащих интервалах, который протекает достаточно интенсивно, в связи с высокими скоростями фильтрации, используемыми в условиях дисперсного и бедного оруденения.

Тем не менее, в сочетании с высокой в целом и однородной проницаемостью хорошо отсортированных песчаников, высокие скорости создают благоприятные условия для непродуктивного массопереноса в нижележащие слои. Существенное снижение скорости фильтрации может привести к снижению площади диффузии раствором и снизить концентрации урана на дебете, либо вовсе сформировать невыщелаченные участки. Поэтому, для месторождения Моинкум рекомендовано незначительное снижение скорости фильтрации в пределах оптимальных диапазонов в сочетании с увеличением вязкости раствора. Это позволит снизить скорости массопереноса в нижележащие слои и увеличить площадь охвата руды

диффузными процессами, тем самым увеличив концентрацию на дебете в силу снижения объемов массопереноса в нижележащие прослои.

Предложенные рекомендации находятся в пределах технических возможностей аппаратуры и производственных фондов на объектах исследования и не несут существенных технологических, экологических и финансовых рисков, что подробнее рассмотрено в главе 5 данного исследования. Ограничениями применения рекомендаций на скважинах, не охваченных исследованием, служит выявление особых условий:

-невозможность увеличения концентрации раствора;

-невозможность снижения напорного давления;

-высокая карбонатность;

-глинистость свыше 40 %.

С учетом необходимости калибровки оптимизационных решений в соответствии с площадью закисления, а также в соответствии с выявленной неоднородностью по проницаемости, целесообразно применение предложенного ранее в главе 3 алгоритма расчета интервала растекания раствора с использованием данных индукционного каротажа дополненных лабораторными данными по фильтрационном свойствам образцов керна, термометрии, кавернометрии.

Предложенные фильтрационные модели могут быть скорректированы как в зависимости от особенностей скважинного фонда, так и применены в неизменном виде в аналогичных модельных условиях, а также адаптированы В качестве алгоритма настройки автоматизированной системы расчетов режимных параметров выщелачивания (при устоявшемся гидродинамическом режиме). Алгоритмизация и оптимизация расчетных данных с учетом текстурно-структурного типа рудовмещающей толщи на основе разработанного коэффициента неоднородности проницаемости позволяет оптимизировать процесс выщелачивания, увеличив охват раствором рудовмещающей породы и повысив уровень извлекаемости урана, в зависимости от особенностей месторождения, что особенно актуально для пластовоинфильтрационных месторождений с существенной глубиной залегания рудоносной толщи.

6.4 Выводы

Разработанная численная модель движения технологического раствора в продуктивных пластах месторождений пластово-инфильтрационного типа учитывает ключевые параметры проницаемости, такие как пористость, трещиноватость и минерализация пород, модель позволяет

прогнозировать траектории и скорости движения растворов, оптимизировать объемы закачки и минимизировать потери рабочего раствора. Это особенно важно для зон с низкой проницаемостью, где наблюдается неравномерное распределение потоков.

Моделирование на месторождениях Инкай и Моинкум продемонстрировало, что распределение растворов в продуктивном пласте значительно зависит от текстурно-структурных характеристик пород. Обнаружено, что зоны с высокой трещиноватостью способствуют быстрому растеканию растворов, тогда как в зонах с поровой проницаемостью наблюдается более равномерное движение. Пространственные показатели растекания жидкости, полученные на основе данных индукционного каротажа, позволили выделить оптимальные участки для выщелачивания, что повысило эффективность добычи на 12–15 % в сравнении с традиционными подходами.

Модель успешно применена для отработки участков вторичного рудогенеза, где наблюдается значительная вариативность проницаемости, были выделены участки, где концентрируются зоны минерализации, что позволило оптимизировать схемы закачки растворов и улучшить контроль над процессом выщелачивания [96]. Селективный подход, основанный на текстурно-структурных данных, позволил сократить объемы рабочего раствора на 10–20%, что улучшило экономические показатели процесса.

Тем самым, разработанная модель движения жидкостей на основе данных индукционного каротажа доказала свою эффективность для мониторинга и оптимизации процессов ПСВ. Применение селективного подхода, учитывающего пространственное распределение проницаемости и текстурно-структурные особенности продуктивных пластов, позволяет повысить эффективность выщелачивания и снизить затраты на добычу. Модель подтверждает необходимость интеграции данных ИК в процессы планирования и управления разработкой урановых месторождений, что открывает новые перспективы для повышения эффективности добычи в сложных геологических условиях.

Содержание раздела и выводы обосновывают третье защищаемое положение:

«Разработанная модель и результаты моделирования движения растворов на месторождениях Инкай и Моинкум с использованием пространственного и количественного показателей растекания жидкости доказывают эффективность селективного моделирования и оптимизации режима выщелачивания с учетом текстурно-структурных типов на основании данных индукционного каротажа».

Материалы раздела опубликованы в [105, 106, 107].

133

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате реализации цели и задач исследования были изучены современные подходы к применению индукционного каротажа, интерпретации и анализу данных, а также его использовании как инструмента моделирования гидродинамических и гидромеханических процессов в продуктивном пласте. На основании произведенного комплекса геофизических исследований с применением индукционного каротажа на месторождениях урана пластовоинфильтрационного типа Чу-Сарысуйской урановорудной провинции были получены достоверные исходные данные, которые позволили выявить закономерности влияния факторов проницаемости на данные индукционного каротажа. В свою очередь, это позволило выявить типологию тестурно-структурных типов месторождений, разработать и адаптировать модель движения жидкостей в продуктивном пласте с учетом особенностей проницаемости.

В результате анализа данных по ИК, КС, ГМ, ПС, ТМ и ТК, было выявлено, что в условиях существенной литологической, морфологической и петрофизической осложненностью, наряду с влиянием гидродинамического режима как естественного, так и техногенного происхождения, по КС плохо дифференцируются зоны фактического растекания раствора в высоко водопроводных материалах, слагающих рудовмещающие толщи. В то же время, высокодифференцированные показатели проводности скважинного и околоскважинного пространства благодаря наличию тонких прослоев несколько ограничивают и применения ИК, что в прочем решается путем повышения частоты аппаратуры (использованием ВИКИЗ).

Большинство стандартных аппаратов индукционного каротажа на пластовоинфильтрационных месторождениях позволяют дифференцировать электрофациальную картину скважины при диапазоне удельного сопротивления пород от 0 до 500 Ом*м. В то же время, комбинация в высокочастотным индукционным каротажем позволяет дифференцировать высокоомные тонкослоистые среды, что повышает точность дифференцировки пород вплоть до долей метра. В то же время, при однородном текстурно-структурном типе ПС дает смазанную картину при мониторинге растекания растворов.

На месторождении Моинкум рудовмещающие толщи более однородны по фильтрационным свойствам, текстурно-структурным качествам, что объясняет невысокий по сравнению с месторождением Инкай разброс каротажных данных. Выдержанность рудоносной толщи месторождения Моинкум создает достаточно монотонную картину по каротажным данным, но в силу своей равномерности, любые изменения техногенного характера достаточно легко дифференцируются при последующих исследованиях скважин.

Кроме того, на месторождении Инкай отмечается наличие прослоев с запредельным значением электропроводности свыше 500 Ом*м для постановки индукционного каротажа с

рабочей частотой используемой аппаратуры (ПИК-50) в пределах 150 кГц. Это объясняется присутствием глинистых обводненных линз, практически непроницаемых сложенных монтмориллонитами и каолинитами, а также участков цементации с примесью кварцитов в пределах интервалов закисления.

На месторождении Моинкум рудовмещающие толщи более выдержаны по текстурноструктурным качествам, что обеспечивает хорошую дифференцировку по данным индукционного каротажа и дает возможность лучше отслеживать движение технологических растворов, область растекания которых отчетливо проявляется в динамике каротажных данных участками с повышением проницаемости. На месторождении Моинкум участки с резко отличными от репера петрофизическими свойствами практически не представлены. Изменение литологической и петрофизической картины прослеживается плавно, вертикально, по мере углубления наблюдаются чередование песков с разной зернистостью, однако, в целом определяемых диапазоном в 95-180 мСим/м и удельным сопротивлением до 360 Ом*м.

Кроме того, в виду различий в текстурно-структурных свойствах и литологостратиграфическом профиле, на месторождениях несколько отличается режим работ скважинного комплекса. Так, на месторождении Моинкум дисперсный характер оруденения определил использование сернокислого раствора с концентрацией 13-17 кг/т, в то время как на месторождении Инкай концентрация существенно ниже: 5-13 кг/т.

Скорость фильтрации на месторождении Моинкум составляет порядка 7-15 м³/ч. Достигая по отдельным скважинам 54 м³/ч. На месторождении Инкай средняя скорость фильтрации составляет 4-7 м³/ч. Различия в скоростях фильтрации не только определен рабочими режимами производственных фондов, адаптированных к уникальным условиям месторождений, но и предопределяют интенсивность растекания и массопереноса.

При этом, на месторождении Моинкум картина растекания растворов на каротажных диаграммах дифференцируется более четко и позволяет хорошо выделять интервалы растекания растворов и области вторичного (техногенного) рудогенеза. Очевидно, что на месторождении Моинкум характерна вертикальная анизотропия, а для месторождения Инкай – вертикально-горизонтальная.

Для определения возможности использования индукционного каротажа как средства мониторинга растекания технологических растворов также целесообразно определить степень анизотропии в каждом отдельном случае, в зависимости от текстурно-структурного типа. Ключевым критерием оценки в данном случае может служить выдержанность пород по показателям индукционного каротажа, или сплошность пород.

Так, для месторождения Моинкум анизотропию в виду выдержанности и сплошности можно охарактеризовать как слабо выраженную. Для месторождения Инкай очевидно наличие

135

ярко выраженной анизотропии по вертикали и возможно – менее выраженной, но существенной по горизонтали. Соответствующие исходные условия создают различные предпосылки для степени дифференцировки и ее точности при анализе растекания технологических растворов в каждом из рассматриваемых случаев. Причина данного явления кроется в различии в кажущихся удельных электропроводностях пород при их водонасыщении и изменении фильтрационных свойств. Данные селективные решения сформированы на основании разработанной модели определения текстурно-структурного типа по данным индукционного каротажа. Результаты моделирования предложенных режимов выщелачивания, оптимизированных с точки зрения степени литологической и петрофизикохимической неоднородности, убедительно доказывают, что формирование прогнозируемого контура закисления, а также моделирование оптимального отработки режима выщелачивания являются весомыми факторами продуктивной месторождения. В зависимости от текстурно-структурного типа целесообразно регулировать параметры закачки раствора и его физико-химические свойства, исходя из возможностей и условий кинетики выщелачивания, которые определены петрофизикохимическими и текстурноструктурными свойствами пород и определяют потенциал инфильтрационного вторичного рудогенеза в пределах рудоносной толщи.

Так, на месторождении Инкай сложная литолого-фациальная обстановка, неоднородность рудовмещающих пород по фильтрационным свойствам, а также наличие пропластков с низкой проницаемостью, кавернозность отдельных участков предполагает необходимость интенсификации режима выщелачивания, как по термобарическим, так и по химическим условиям. Повышение температуры и рабочего давления (даже незначительное), дает возможность повышения площади охваченной диффузным процессом за счет выщелачивания из порово-трещинового каркаса слабопроницаемых пород хорошо растворимого минерала. Одновременно повышение концентрации серной кислоты позволит также охватить слабопроницаемые породы.

Для месторождения Моинкум оптимизационные решения сформированы с учетом несколько иной геолого-физической обстановки. В условиях месторождения Моинкум наибольший риск снижения продуктивности выщелачивания и одновременно – наибольший интерес с позиции повышения объема балансовых руд представляет процесс техногенного рудогенеза на ниже лежащих интервалах, который протекает достаточно интенсивно, в связи с высокими скоростями фильтрации, используемыми в условиях дисперсного и бедного оруденения.

Тем не менее, в сочетании с высокой в целом и однородной проницаемостью хорошо отсортированных песчаников, высокие скорости создают благоприятные условия для непродуктивного массопереноса в нижележащие слои. Существенное снижение скорости

136

фильтрации может привести к снижению площади диффузии раствором и снизить концентрации урана на дебете, либо вовсе сформировать не выщелоченные участки. Поэтому, для месторождения Моинкум рекомендовано незначительное снижение скорости фильтрации в пределах оптимальных диапазонов в сочетании с увеличением вязкости раствора. Это позволит снизить скорости массопереноса в нижележащие слои и увеличить площадь охвата руды диффузными процессами, тем самым увеличив концентрацию на дебете в силу снижения объемов массопереноса в нижележащие прослои.

Типологизация и селективный учет параметров выщелачивания на основе предложенной модели может быть достаточно легко адаптированы и использованы для повышения эффективности процесса отработки руд на месторождениях с различной степенью осложненности за счет разработанного коэффициента однородности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие и инновационные решения актуальных проблем геологоразведки гидрогенных урановых месторождений / А.А. Мендыгалиев, В.Ю. Селезнева, Е.Г. Язиков, А.А. Бекботаева // Научно-технический и производственный Горный журнал Казахстана. – 2020. – №3 (179) – С. 6-13.

2. Швецов, М.С. Петрография осадочных пород / М.С. Швецов // Изд-е 3-е, перераб. изд. М.: Недра. – 1958. – 412 с.

3. Анализ параметра пористости с привлечением элементов региональной петрофизики (электрофаций) и типа глинистости / И.Б. Ратников, Р.С. Чульга, Е.А. Романов, С.Н. Бастриков // Горные науки и технологии. Геомеханика и геофизика. Свойства горных пород. – 2016. – №2 – С. 50-63.

4. Шаймарданова, Р.Р. Электрические методы исследования скважин / Р.Р. Шаймарданова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 12 – С. 59–60.

5. Оценка гидродинамических параметров технологии подземного выщелачивания руд / А. Л. Вильмис, С.В. Маркелов, О.А. Луконина, К.С. Некоз // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № (3-1). – 299–306 с.

6. Орехов, А. Н. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов / А.Н. Орехов, М.М. Амани Мангуа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – 198–209.

7. Теория методов ГИС. Геофизические Методы Исследования Скважин: Учебник / Под.Ред. доктора физ-мат. наук проф. Д.А. Кожевникова. М: Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. – 618 с.

8. Косков, В.Н. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС / В.Н. Косков, Б.В. Косков // Пермь: Издательство Пермский государственный технический университет. – 2007. – 317 с.

 9. Язиков, В.Г. Особенности проведения геофизических исследований в скважинах при изучении и освоении инфильтрационных (гидрогенных) месторождений урана: учебное пособие / В.Г. Язиков, А.В. Легавко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2012. – 95 с.

10. Ратушняк, А.Н. Теоретические и экспериментальные основы индукционных методов исследований скважин / А.Н. Ратушняк, В.К. Теплухин // Екатеринбург: Уро Ран. – 2017. – 127 с.

 Ягофаров, А.К. Современные геофизические и гидродинамические исследования нефтянных и газовых скважин: учебное пособие / А.К. Ягофаров, И.И. Клещенко, Д.В. Новоселов. — Тюмень: ТюмГНГУ. – 2013. – 140 с.

12. Стрельченко, В. В. Геофизические исследования скважин: учебник / В. В. Стрельченко. - М.: Недра, 2012. – 551 с.

13. Инженерная геология. Горные породы (термины и определения): учеб. пособие / А.П. Неволин, Е.Н. Сычкина. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. Ун-та. – 2019. – 510 с.

14. Удельное сопротивление грунта. Электронный ресурс URL в режиме доступа <u>https://zandz.com/ru/udelnoe_soprotivlenie_grunta</u>, дата обращения 29.09.2021.

15. Добыча урана методом подземного выщелачивания / Кол. авторов под общ.ред. В.А. Мамилова.М.: Атомиздат. – 1980. – 248 с.

16. Shlumberger Wireline Services Catalog. – 2015. – 243 c.

17. Doll, H.G. Introduction to Induction Logging and Application to Logging of Wells Drilled with Oil Base Mud / H.G. Doll // Journal of Petroleum Technology. – 1949. – № 1(06) – 148-162 p.

18. Долль, Г.Г. Теория индукционного метода исследования разрезов скважин и его применение в скважинах, пробуренных с глинистым раствором на нефти. / Г.Г. Долль // «Вопросы промысловой геофизики». — М.: Гостопиздат. – 1957. – С. 252-274.

19. Кудрявцев, Ю.И. Некоторые вопросы теории индукционного каротажа / Ю.И. Кудрявцев // Прикладная геофизика. – 1960. – № 28. – 101 с.

20. Аксельрод, С.М. Высокочастотные методы исследования скважин / С.М. Аксельрод // - М.: Госгеолтехиздат. – 1965. – 45 с.

21. Даев, Д.С. Способ диэлектрического индуктивного каротажа. А.С. № 206735. Изобретения, пром. образцы, товарные знаки. – 1969. – 167 с.

22. Duesterhoeft, W.C. Propogation Effects on radial Response in induction Logging / W.C. Duesterhoeft, H.W. Smith // Geophysics. – 1962. – V. 27 (4). – 463–469 p.

23. Longman I.M. A method for the numerical evaluation of finite integrals of oscillatory functions / I.M. Longman // Math. Comput. 1960. – 53–59 p.

24. Moran, I.H. Basic theory of induction logging fnd application to stady of two-coil sondes / I.H. Moran, K.S. Kunz // Geophysics. – 1962. – Vol. 27 (6). – 829–858 p.

25. Плюснин, М.И. Обоснование индукционного каротажа методом переходных процессов / М.И. Плюснин, Б.И. Вильге // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1969. № 5.– С. 158–165.

26. Кауфман, А.А. Теория индукционного каротажа методом переходных процессов / А.А. Кауфман, В.П. Соколов // Новосибирск: Наука. – 1972. – 108 с.

27. Антонов, Ю.Н. Высокочастное индукционное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ). Методические рекомендации / Ю.Н. Антонов, С.С. Жмаев // Изд. ИГиГ СО АН СССР, Новосибирск. – 1979. – 104 с.

28. Антонов, Ю.Н. Диэлектрический индуктивный каротаж / Ю.Н. Антонов, А.А. Кауфман // Изд. ИГиГ СО АН СССР, Новосибирск. – 1971. – 104 с.

29. Антонов, Ю.Н. Высокочастотный индукционный каротаж / Ю.Н. Антонов, И.Ф. Изюмов // Геология и геофизика. – 1970. – № 11. – 114–119 с.

30. Антонов, Ю.Н., Приворотский Б.И. Способ индукционного каротажа. А.С. 491908 Патент. 1975. – 4 с.

31. Антонов, Ю.Н. Высокочастотный индукционный каротаж / Ю.Н. Антонов, Б.И. Приворотский // Отв. ред. Л.А. Табаровский. – Новосибирск: Изд-во Наука. Сиб. Отд. – 1975. – 260 с.

32. Зверев, Г.Н., Методика моделирования аппаратуры и зондов индукционного каротажа на вычислительных машинах / Г.Н. Зверев, К.Л. Санто, Э.П. Зверева // - М.: ВИЭМС. – 1973. – 317 с.

33. Vail, III, William B. Methods and Apparatus for Induction Logging in Cased Boreholes. Patent U.S. № 4748415. May 31, 1988. – 105 p.

34. Захаров, Е.В. Математическое моделирование в электромагнитном каротаже / Е.В. Захаров // Л.: Недра. – 1979. – 96 с.

35. Никитина, В.Н. Общее решение осесимметричной задачи теории индукционного каротажа / В.Н. Никитина // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1960. – № 4. – 607–616 с.

36. Кормильцев, В.В. Моделирование геофизических полей при помощи объемных векторных интегральных уравнений / В.В. Кормильцев, А.Н. Ратушняк // Екатеринбург: УрО РАН. – 1999. – 88 с.

37. Могилатов, В.С. Вопросы математического моделирования и инверсии индукционного каротажа для радиально-неоднородных сред / В.С. Могилатов // НТВ Каротажник. – 2015. – № 8 (254). – С. 81–93.

38. К вопросу об электрическом каротаже скважин, обсаженных стальными колоннами, аппаратурой на кабеле / А.С. Кашик, Н.И. Рыхлинский, Л.А. Книжнерман, Р.И. Кривоносов, А.С. Степанов // НТВ Каротажник. – 2004. № 3-4. – 116–117 с.

39. Мосин, А.П. Некоторые вопросы обоснования электромагнитного каротажа методом переходных процессов / А.П. Мосин, В.С. Могилатов // НТВ Каротажник. – 2015. – № 12 (258). – С. 63-80.

40. Индукционный каротаж скважин с учетом влияния проводящей промывочной жидкости / А.Н. Ратушняк, С.В. Байдиков, В.К. Теплухин // Уральский геофизический вестник. – 2016. – № 1 (27). – С. 40-47.

41. Ратушняк, Индукционный каротаж в обсаженных скважинах / А.Н. Ратушняк, С.В. Байдиков, В.К. Теплухин // Уральский геофизический вестник. – 2016. – № 2 (28). – С. 98–107.

42. Индукционный каротаж с радиальным источником магнитного поля / А.Н. Ратушняк, С.В. Байдиков, В.К. Теплухин // Уральский геофизический вестник. 2016. – № 2 (28). – С. 61–70.

43. Удельная электропроводность водных растворов, содержащих серную кислоту и сульфат алюминия, меди и кадмия / Ю.П. Перелыгин, И.Г. Кольчугина, И.В. Рашевская, А.А. Флягин // Естественные Науки. Химия. – 2017. – № 2 (18). – С. 37–43.

44. Электромагнитное поле гармонического источника в анизотропной цилиндрически-слоистой среде / Л.А. Табаровский, А.М. Каганский, М.И. Эпов // Геология и геофизика. – 1976. № 3. – С. 94–99.

45. Табаровский, Л.А. Радиальные характеристики индукционных фокусирующих зондов с поперечными датчиками в анизотропной среде / Л.А. Табаровский, М.И. Эпов // Геология и геофизика. – 1979. – Т. 20. – № 7. – С. 96–110.

46. Трехмерный индукционный каротаж: старые измерения под новым углом / Андерсон Б., Барбер Т., Леверидж Р., Бастиа Р., Сахена К.Р., Тьяги А.К., Клаво Ж.-Б., Коффин Б., Дас

М., Хейден Р., Климентос Т., Мин Ч.К., Уильямс С. // Нефтегазовое обозрение. Schlumberger. – 2008. – Т. 19. № 2. – С. 74–97 с.

47. Легавко, Д. А. Совершенствование методических приемов регистрации и интерпретации данных каротажа скважин при отработке инфильтрационных месторождений урана: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 25.00.10 / Легавко Дмитрий Александрович. – М., 2020. – 28 с.

48. Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами / М.И. Эпов, М.Н. Никитенко, К.В. Сухорукова, В.Н. Глинских // НТВ Каротажник. – 2016. – № 2 (260). – С. 64–79.

49. Миронцов, Н.Л. Особенности применения четырехзондового индукционного каротажа в тонкослоистых разрезах Днепровско-Донецкой впадины / Н.Л. Миронцов // Геоинформатика. – 2017. – № 4. – 28– 33 с.

50. Девицын, В.А. Многозондовые аппаратурные комплексы индукционного каротажа: дисс. ...канд. тех. наук. 04.00.12 / Девицын Вадим Арнольдович. Тверь. – 2000. – 187 с.

51. Короновский, Н.В. Геология России и сопредельных территорий: учебник / Н.В. Короновский // 2-е изд., испр. – М.: 2018. – 230 с.

52. Байназаров, Б. Р. Вещественный состав руд и распределения урана и радия на месторождение урана Чу-Сарысуйской провинции (Республика Казахстан): магистерская диссертация / Б. Р. Байназаров; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт природных ресурсов (ИПР), Кафедра геоэкологии и геохимии (ГЭГХ); науч. рук. В. А. Домаренко. – Томск, 2016. Эл. ресурс, URL в точке доступа http://earchive.tpu.ru/handle/11683/30403 дата обращения 29.09.2021).

53. Azhgaliev, D.K. New opportunities for processing and interpreting seismic data in estimating the viability of local objects / D.K. Azhgaliev, S.M. Isenov, S.G. Karimov // News of the Ural State Mining University. – 2019. – вып.1 (53). – С.48–59.

54. Бойцов, В.Е. Геология месторождений урана / В.Е. Бойцов // Издание: Недра, Москва. – 1989. – 302 с.

55. Дегтярев, К.Е. Каледониды Казахстана и Северного Тянь-Шаня: строение, тектоническая эволюция и процессы формирования континентальной коры: автореф. дис. ...д-ра г.-м.н. 25.00.01 / Дегтярев Кирилл Евгеньевич. – М., 2001., 49 с. эл. ресурс, URL в точке доступа https://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1183620&uri=part03, дата обращения 17.09.2021.

56. Грушевой, Г.В. Закономерности локализации уранового оруденения в чехле молодых платформ / Г.В. Грушевой // Основные проблемы уранового рудообразования. – М., – 1987. – 51 с.

57. Инструкция по применению Классификации запасов к гидрогенным месторождениям урана (Дополнение к Инструкции по применению классификации запасов к месторождениям радиоактивных руд), ГКЗ РК, Астана. – 2008. – 296 с.

58. Машковцев, Г.А. Геолого-промышленные типы урановых месторождений стран СНГ / Г. А. Машковцев // М.: Изд-во ВИМС, 2008. – 72 с.

59. Отчет о результатах детальной разведки участка 4 месторождения Инкай. - Алматы, 2009. – 136 с.

60. Отчет по глубинному геологическому картированию мезозойско-кайнозойского чехла Чу-Сарысуйской депрессии. – Алматы, 2012. – 160 с.

61. Перельман, А.И. Геохимия эпигенетических процессов / А.И. Перельман // – М.: Недра, 1965. – 272 с.

62. Максимова, М.Ф. Пластово-инфильтрационные рудообразования / М.Ф. Максимова, Е.М. Шмариович // – М.: Недра, 1993. – 160 с.

63. Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования / под ред. А.И. Перельмана. - М.: Атомиздат, 1980. – 270 с.

64. Носков, М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания / М.Д. Носков // – Северск: Издательство СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – 83 с.

65. Физика пласта: Учебное пособие / Авт.-сост. Т.Б. Кочина, В.Н. Спиридонова, Н.Н. Родионцев, И.А. Круглов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2017. – 214 с.

66. Удельная электропроводность водных растворов, содержащих серную кислоту и сульфат алюминия, меди или кадмия / Ю.П. Перелыгин, И.Г. Кольчугина, И.В. Рашевская, А.А. Флягин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2017. – № 2 (18). – С. 37-43.

67. Паспорта скважинного фонда месторождений Инкай и Монкум // АО «НАК «Казатомпром» - 2018-2019 гг.

68. Муравина, О. М. Статистический анализ данных каротажа методом группового учета аргументов / О.М. Муравина, А.А. Аузин // Вестник Воронежского государственного университета, Серия: Геология. – 2010. – № 2. – С. 219–224.

69. Оракбаев, Е.Ж. Исследование и разработка эффективных систем управления процессом подземного выщелачивания / дис. на соиск. уч.ст. РНD / Оракбаев Ербол Жумагельдиевич // Алматы: КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, – 2019. – 113 с.

70. Schlumberger. Каталог интерпретационных решений. / М.: Schlumberger. – 2017. – 226 с.

71. Канцель, А.А. Математическое моделирование динамики процесса подземного выщелачивания в неоднородном рудоносном слое: автореф. дис. ... кан. физ-мат. наук: 05.13.18 / Канцель Антон Алексеевич. – М., 2010. – 27 с.

72. Кисин, Ю.К. О применении алгоритмов на основе метода наименьших квадратов и конечных формул в задачах обработки траекторных измерений / Ю.К. Кисин // Вестник концерна ВКО Алма-Алтей. –2016. – №3. – С. 74–80.

73. Никитенко, М. И. Оперативное моделирование и интерпретация в современных технологиях
электромагнитного каротажа: автореф. дис. д. тех. наук: 1.6.9 / Никитенко Марина Николаевна.
– Новосибирск, 2021. – 33 с.

74. Гладков, Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа: учебное пособие / Е.А. Гладков // Томский политехнический университет. – Томск, 2012. – 99 с.

75. Колбенков, А.В. Применение радиоволнового метода для контроля за разработкой урановых месторождений способом подземного выщелачивания: автореф. дис. ... кан. тех. наук: 25.00.10 / Колбенков Алексей Викторович. – М., 2010. – 30 с.

76. Шемелина, О.В. Закономерности миграции урана в низкорадиоактивных хранилищах отходов: дис. ...кан. геол.-мин. наук: 25.00.09 / Шемелина Ольга Владимировна. - Новосибирск, 2010. – 154 с.

77. Подземная гидромеханика: учебно-методическое пособие / сост. Борхович С.Ю., Пчельников И.В., Колесова С.Б. Ижевск: ИЦ «Удмуртский Университет». – 2017. – 176 с.

78. Алибаева, К. А. Численное исследование путей повышения выработки месторождения при добыче минералов методом подземного выщелачивания // дис. на соиск. уч.ст. PHD / Алибаева Карлыгаш Абылхаковна // Алматы: КазНУ им. аль-Фараби. – 2013. – 93 с.

79. Математическое моделирование пластовых систем / Методическое указание. - Тюмень: ОАО СургутНИПИнефть. - 2016. - 211 с.

80. Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 18 мая 2018 года № 342. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 5 июня 2018 года № 16996.
81. Каляцкая, Г.В. Химия и аналитическая химия урана и тория / Г.В. Каляцкая, А.Н. Страшко //

учебное пособие. – Томск: Томский политехнический университет 2011. – 80 с.

82. Тураев, Н.С. Химия и технология урана: Учебное пособие для вузов / Н.С. Тураев, И.И. Жерин // – М. ЦНИИАТОМИНФОРМ – 2005. – 407с.

83. Технология урана и плутония: учебное пособие /А. А. Маслов, Г.В. Каляцкая, Г.Н. Амелина,
 А.Ю. Водянкин, Н.Б. Егоров – Томск: Издательство Томского политехнического университета.
 2007. – 97 с.

84. Данные по эксплуатационным характеристикам фондов технологических блоков месторождений Инкай и Моинкум. – АО «НАК «Казатомпром», – 2021. – 118 с.

85. Сатыбалдиев, Б.С. Оценка эффективности использования фильтрационного выщелачивания для извлечения урана из урановой руды / Б.С. Сатыбалдиев, Б.М. Уралбеков, М.М. Буркитбаев // Chemical Bulletin of Kazakh National University. – 2015. – №3 (79). – С. 22–27.

86. О коэффициенте извлечения урана и удельном расходе реагента при подземном выщелачивании / Е.И. Рогов, В.Г. Язиков, А.Е. Рогов, А.С. Бектуреев // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. Электронный ресурс, доступ <u>https://cyberleninka.ru/article/n/o-koeffitsiente-izvlecheniya-urana-i-udelnom-rashode-reagenta-pri-</u> podzemnom-vyschelachivanii/viewer, дата обращения 27.01.2022.

87. Майников, Д.В. Повышение эффективности процесса классификации и отмывки продуктов выщелачивания руд на основе использования колонных аппаратов с пульсационным перемешиванием: дис. ...кан. тех. наук: 25.00.13 / Майников Дмитрий Вячеславович. М., 2017. – 133 с.

88. Сейдель, Д.К. Извлечение урана / Д.К. Сейдель // БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ. – 1997. – № 2 (23).
– С. 29–33.

89. Zhang Weixing. Exploration for in situ leach amenable sandstone uranium deposits and their impact on the environment in China / Zhang Weixing // The Uranium Production Cycle and the Environment. -2002. -294 p.

90. Mishra, B. K. Integrated Studies for Mapping of Uranium Mineralization in Northern Cape Province of South Africa / B.K. Mishra, N.S. Rao // Natural Science. – 2015. – № 8. – P. 400–415.
91. Multi-scale investigation of uranium attenuation by arsenic at an abandoned uranium mine, South Terras / C.L. Corkhill, D.E. Crean, D.J. Bailey, C. Makepeace, M.C. Stennett, R. Tappero, D. Grolimund, N.C. Hyatt // npj Materials Degradation. – 2017. – № 19. https://www.nature.com/articles/s41529-017-0019-9, дата обращения 12.04.2022.

92. Khawassek, Y.M. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert, Egypt / Y.M. Khawassek, M.H.Taha, A.A. Eliwa // International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering. – 2016. – 73 p.

93. Advances in geophysical methods used for uranium exploration and their applications in China / J. Deng, H. Chen, Y. Wang, H. Li, H. Yang, Z. Zhang // International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel. – 2018. – 126 p.

94. Agresty, A. An Introduction to Categorical Data Analysis / A. Agresty // 3rd Edition. – Wiley Publisher. – 2018. – 394 p.

95. Synthesize a Nuclear Waste Management Process Using Artificial Intelligence Techniques / S. Parthasarathyhandra, K. Maheswari, A. Masud, P. Anandan, M.S. Rohokale // Journal of Nuclear Energy Science and Power Generation Technology. – 2021. – № 12. available at: <u>https://www.scitechnol.com/abstract/synthesize-a-nuclear-waste-management-process-using-artificial-intelligence-techniques-18121.html</u>, обращение 13.04.2022.

96. Селезнева, В. Ю. Геоморфологические особенности руд и их влияние на процесс извлечения урана методом подземного выщелачивания / В.Ю. Селезнева, Г.А. Тимошенко // Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов. В 2 томах. Том 1. Уран. - М.: Издательство «Руда и металлы». – 2005. – 407 стр.

97. Ратников, И.Б. Анализ характера насыщенности пород в неоднородном коллекторе на примере пласта АС_{10 П}риобского месторождения / И.Б. Ратников, Н.С. Яркова, Е.А. Романов // Горные науки и технологии. – 2019. Т. 4. – № 1. – 41–56 с.

98. Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин / А.С. Повалихин, А.Г. Калинин, С.Н. Бастриков, К.М. Солодкий // – М.: Издательство ЦентрЛитНефтеГаз. – 2011. – 647 с.

Авторские публикации

99. Бейсекеев, Е.Ш. Факторы проницаемости горных пород и применение индукционного каротажа в условиях урановых месторождений зон пластового окисления для отработки руд (на примере Чу-Сарысуйской провинции) / Е.Ш. Бейсекеев, Е.Г. Язиков // Разведка и охрана недр. – 2023. – № 7. – С. 26–32.

100. Бейсекеев, Е.Ш. Геофизические и гидродинамические аспекты дооценки. продуктивности ураноносных блоков в условиях отработки методом ПСВ на объектах Чу-Сарысуйской

урановорудной провинции / Е.Ш. Бейсекеев, Е.Г. Язиков // Труды Пятого Международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство». М.: ФГБУ «ВИМС», – 2021. – С. 305–313. 101. Бейсекеев, Е.Ш. Алгоритм оптимизации применения индукционного каротажа на пластовоинфильтрационных месторождениях урана / Е.Ш. Бейсекеев, Е.Г. Язиков // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова. В 2 томах. Том 1. – 2022. – С.157–159.

102. Бейсекеев, Е. Ш. Моделирование движения жидкостей в процессе эксплуатации скважинного фонда на месторождениях урана, отрабатываемых методом ПСВ / Е.Ш. Бейсекеев, Е.Г. Язиков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – №8. – С. 73–84.

103. Индукционный каротаж как метод мониторинга технологических растворов в процессе отработки гидрогенных урановых месторождений / Е.Ш. Бейсекеев, Е.Г. Язиков, П.Ю. Воронцов, Т.С. Дуйсебаева // Разведка и охрана недр. – 2023. – № 4 – С. 28–36.

104. Бейсекеев, Е.Ш. Зависимость между электропроводностью и проницаемостью пород как фактор преимущества индукционного каротажа на гидрогенных месторождениях урана / Е.Ш. Бейсекеев, Е.Г. Язиков // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова. В 2 томах. Том 1. – 2022. – С.159–161. 105. Оптимизация режима выщелачивания на гидрогенных месторождениях урана с высокопроницаемым песчаным репером / Е.Ш. Бейсекеев, Е.Г. Язиков, П.Ю. Воронцов, Т.С. Дуйсебаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 334. – №4. – С 34–42.

106. Бейсекеев, Е.Ш., Авторское свидетельство N404436 Республика Казахстан. Модель на основе данных индукционного каротажа для оптимизации режима выщелачивания на гидрогенных месторождениях урана. Дата создания объекта: 04.11.2022.

107. Данилов, А.А. Лабораторные исследования кернового материала разных горизонтов месторождения Инкай с использованием пероксида водорода / А.А. Данилов, А.С. Грициенко, Е.Ш. Бейсекеев, А.В. Редько, С.Ю. Третьяков, Е.О. Маджара, К.А. Тлеулина // Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции «Развитие урановой и редкометалльной промышленности», посвященной 75-летию Ульбинского металлургического завода. В 2 томах. Том 1. – 2024. – С. 141-148.



ПРИЛОЖЕНИЕ А. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ Н БЛОКА А1 МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИНКАЙ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ БЛОКА ВІ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОИНКУМ





ПРИЛОЖЕНИЕ В. СХЕМА БЛОКА А1 МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИНКАЙ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. СХЕМА БЛОКА ВІ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОИНКУМ



ПРИЛОЖЕНИЕ Д. УКРУПНЕННЫЕ ПРОСЛОИ ТИПА 1 НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ИНКАЙ

Глубина, h, м.	σ,	Проницаемость,		
	Сим/м	Дарси		
281	9	0,00005		
283	20	0,00004		
285	30	0,0007		
287	40	0,0004		
289	35	0,0003		
291	60	0,005		
293	300	0,02		
295	350	34,5		
297	150	33		
299	70	8		
301	30	33		
303	70	32		
305	150	11		
307	70	0,005		
309	150	0,0006		
311	250	18		
313	150	9		
315	70	29		
317	150	31		
319	70	22		
321	39	5		
323	250	21		
325	70	4		
327	350	-0,00005		
329	70	24		
331	800	32		
333	250	8		
335	70	11		

Таблица Д.1 – Укрупненные прослои Типа 1 на месторождении Инкай

Глубина, h, м.	σ, Сим/м	Коэф.прон, Дарси
79	15	0,00005
84	9	8
89	60	9
94	250	26
99	350	33
104	450	31,4
109	350	34,7
114	300	31
119	350	34,5
124	450	33
129	250	26
134	300	32
139	350	34
144	500	35
149	70	11
154	250	26
159	300	30
164	70	11
169	150	17
174	70	11
179	150	18
184	70	12
189	150	17
194	70	11

Таблица Д.2 – Укрупненные прослои Типа 2 на месторождении Инкай

Глубина, h, м.	б,Сим /м	Коэф.прон., Дарси
137	40	20
142	450	36
147	150	28
152	500	38
157	250	32
162	70	21
167	150	28
172	70	21
177	100	26
182	150	28
187	150	28
192	250	33
197	250	32
202	70	31
207	140	27
212	90	25
217	250	32

Таблица Д.3 – Укрупненные прослои Типа 3 на месторождении Моинкум

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ОБЛАСТИ ПОВЫШЕННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ, СМОДЕЛИРОВАННЫЕ ПО ДАННЫМ ИК, В ЗОНЕ ОРУДЕНЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ИНКАЙ И МОИНКУМ



Рисунок Е.1 - Тип 1 (месторождение Инкай)

Рисунок Е.2 - Тип 2 (местородение Инкай)



Рисунок Е.3 – Тип 3 (месторождение Моинкум)

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ, СМОДЕЛИРОВАННЫЕ ПО ДАННЫМ ИК, В ЗОНЕ ОРУДЕНЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ИНКАЙ И МОИНКУМ



Рисунок Ж.1 - Тип 1 (месторождение Инкай)

Рисунок Ж.2 - Тип 2 (местородение Инкай)



Рисунок Ж.3 – Тип 3 (месторождение Моинкум)

ПРИЛОЖЕНИЕ И. КЕРНОВЫЕ ПРОБЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИНКАЙ

Отобранный керн
 Пески: 1)Песок разнозернистый серый/зеленоватый с гравием 2)Песок средний и мелкозернистый зеленовато-серый 3)Песок разнозернистый зеленоватый 4)Пески средне- и мелкозернистые не отсортированные 5)Пески среднезернистые серые с разнозернистым гравием, галечными примесями и алевролитами
 Глины: 1) Первично сероцветная, темносерая, плотная - перед фронтом закисления 2) Темносерая плотная, с включением сульфатов и пирита – в пределах залежи 3) Желтая песчанная окисленная – в пределах залежи

ПРИЛОЖЕНИЕ К. КЕРНОВЫЕ ПРОБЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОИНКУМ

	Отобранный керн
with the second s	Пески:
All the state of the second state of the secon	1)Пески среднезернистые зеленовато-серые
	отсортированные
	2)Пески мелкозернистые зеленовато-серые
	3)Пески среднезернистые зеленовато-серые с
All and all all all all all all all all all al	гравийной примесью менее 1 мм
Lange and the second seco	Глины:
and the state of the state	1) Первично сероцветная - перед фронтом закисления
A CONTRACT OF A	2) Желтая окисленная – в пределах залежи

ПРИЛОЖЕНИЕ Л. КОРРЕЛЯЦИИ КАРОТАЖНЫХ ДИАГРАММ, ПО ПРОВЕДЕННОМУ ГИС, НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ БЛОКЕ В1 (СКВАЖИНЫ У1, У2, У3, У4) МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОИНКУМ



Рисунок Л.1 – СКВАЖИНА У1



Рисунок Л.2 – СКВАЖИНА У2



Рисунок Л.3 – СКВАЖИНА УЗ

160



Рисунок Л.4 – СКВАЖИНА У4