ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт «Сибирская школа геонаук»

На правах рукописи

ПЫЖЬЯНОВ Даниил Игоревич

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ТЕХНО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОВЫКТИНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Специальность 2.8.3 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск 2026

Работа выполнена в департаменте геоэкологии Института «Сибирская школа геонаук» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: **Сарапулова Галина Ибрагимовна**,
доктор химических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С. Б. Леонова ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Официальные оппоненты: **Кулешова Любовь Сергеевна**,
доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (филиал в г. Октябрьском), профессор кафедры «Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений» Института нефти и газа (г. Октябрьский)

Примина Светлана Павловна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», заведующий кафедрой геологии нефти и газа геологического факультета (г. Иркутск)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (г. Тюмень)

Защита состоится «28» декабря 2026 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ИРНИТУ.05.06 при ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83) по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3, ауд. 8-202.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» и на официальном сайте университета (https://www.istu.edu).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», ученому секретарю диссертационного совета ИРНИТУ.05.06. Трусовой В.В. diss_2.8.3@geo.istu.edu.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ИРНИТУ.05.06,
кандидат технических наук В. В. Трусова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В глобальном масштабе проблема техногенного воздействия газодобывающих отраслей является одной из наиболее острых, поскольку ее последствия носят кумулятивный и долгосрочный характер, а пространственные масштабы выходят далеко за пределы районов освоения месторождений. Разработка методов и технологий исследования и мониторинга горно-геологических и горнотехнических условий освоения и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, хранилищ нефти и газа представляет собой важную государственную задачу в области *горнопромышленной и нефтегазопромысловой геологии, геофизики, маркшейдерского дела и геометрии недр и является актуальной проблемой газовой отрасли (пункт 17 паспорта специальности).* В современных условиях, когда выполнение принципов ESG производств, в том числе, при добыче газа, является не только вопросом их репутации, но и напрямую влияет на экономику, развитие научно обоснованных систем горнотехнического мониторинга, что может являться важным фактором эффективного управления предприятием. Обеспечение проектирования и планирования горных работ, управления запасами и контроль качества добываемых полезных ископаемых с учетом их комплексного использования, и охраны окружающей среды также является актуальной проблемой газовой отрасли *(пункт 10 паспорта специальности).*

К настоящему времени для газоконденсатных месторождений методически проработаны блоки геолого-промыслового и газогидродинамического контроля залежей, технологического контроля режима скважин средствами АСУ ТП (Ипатов А. И., Кременецкий М. И.), инженерно-геокриологического контроля оснований и фундаментов (Паздерин Д. С.), геодинамического контроля деформаций земной поверхности с выделением зон потенциальной аварийности (Кузьмин Д. К.), разработан комплекс методических и технических решений для мониторинга структурных и физических параметров при добыче газа (Никифоров В. В.), на основе геопространственных данных разработан геотехнический мониторинг техногенных объектов с использованием дистанционного зондирования Земли (Казанцева В. В., Ожигин Д. С., Косарев Н. С.); выполнен мониторинг деформационных процессов земной поверхности газоконденсатного месторождения с использованием данных С-диапазона КА ЕМУКАТ (Мусихин В. В.).

Однако для Ковыктинского газоконденсатного месторождения (КГКМ) в Иркутской области до расширения месторождения были выполнены только газогидродинамический контроль залежи по 50 скважинам (ООО «ВолгоУралНИПИгаз», 2013); поисковая газогеохимическая съемка приповерхностных отложений литосферы (ООО «Газпром геологоразведка», 2016); инженерно-геотехнический контроль оснований и фундаментов и комплексные инженерные изыскания с использованием данных ДЗЗ (ООО «Газпром проектирование», 2015–2020); производственный экологический мониторинг компонентов природной среды по почвам — только валовые содержания (ООО «Сибирский стандарт», 2019).

При вводе в эксплуатацию с 2022 года девяти новых кустов газовых скважин, и нового центра газодобычи и современной установки комплексной подготовки газа (УКПГ) значительно возросли мощности добычи и, соответственно, негативное воздействие на почвы расширенной территории освоения и промплощадки (площадь 80 га, локация 55,20–55,28° с. ш., 106,08–106,20° в. д.). Контролируемыми параметрами почв при этом служат валовые содержания элементов и их сопоставление с гигиеническим нормативом без учета их геохимической трансформации в токсичные подвижные формы, которые преимущественно и определяют геохимический статус территории и характеризуют состояние земной поверхности при добыче газа. Следствием такого ограниченного подхода являются, в частности, предъявляемые органами государственного экологического контроля иски по превышению валовых содержаний Mn, Ni и As в почвах КГКМ, относимые к воздействию всего производства без анализа геохимической составляющей и без привязки к технологическим узлам добычи.

Технологии строительства многозабойных скважин на газовых и газоконденсатных месторождениях в низкопроницаемых зонах смешанного насыщения на Ковыктинском газоконденсатном месторождении постоянно совершенствуется (Примина С. П. и др.).

Однако, при этом также выяснилось, что для новой территории эксплуатации КГКМ отсутствует комплексная оценка воздействия месторождения на основе геохимических параметров почвы как важного звена в едином блоке горнотехнического мониторинга, а исследования и геохимический контроль носят бессистемный и фрагментарный характер. Кроме того, исследования пространственно-временных характеристик геохимического состояния поверхности промплощадки не проводились. Однако в настоящее время комплексный геотехнический мониторинг, включая оценку состояния территории в зоне технологических узлов, является неотъемлемой частью менеджмента всех газодобывающих компаний в РФ.

Для решения проблемы мониторинга на КГКМ весьма перспективным является применение геохимических методов исследования почв и их параметров (pH, $C_{орг}$, $N_{общ}$, $Fe_{общ}$) с привлечением подвижных форм элементов (Mn, Ni, As, Cu, Zn, Pb, Cd, Co), а также приемов математического и трехмерного (3D) моделирования. Это позволяет выявлять механизм взаимообусловленной и статистически значимой трансформации элементов в условиях техногенно измененных мерзлотных почв. Кроме того, визуализация данных посредством пространственной ГИС как рабочего инструмента и средства мониторинговых наблюдений позволяет обнаруживать геохимические аномалии, ореолы аккумуляции элементов и их миграцию в почвенном слое на территории месторождения в привязке к конкретному промузлу, а также выявлять геопространственную неоднородность распределения элементов. Это и составляет основу техно-геохимического мониторинга на новых производственных участках газоконденсатного месторождения.

Важно также отметить, что нефтегазовые компании во всем мире, в том числе ПАО «Газпром», основывают стратегию своего развития на использовании *цифровой модификации производства*, что способствует повышению эффективности газодобычи и ее рентабельности. Поэтому создание цифровых двойников в настоящее время является мировым трендом в нефтегазовой отрасли. Последнее особенно важно для самого начального звена при добыче газа в газовой скважине, определяющей в дальнейшем эффективность всего производственного процесса. Поэтому разработка цифрового алгоритма оптимизации подачи термодинамического ингибитора газогидратообразования (метанола — одного из системных загрязнителей почв территории) является актуальной, экономически обоснованной и экологически оправданной - способствует снижению геоэкологических рисков (загрязнение почв) и затрат на экологические платежи.

Таким образом, **комплексирование** современных методов исследования позволяет разработать методику (конкретный пошаговый алгоритм) недостающего звена горнотехнического мониторинга при эксплуатации Ковыктинского газоконденсатного месторождения в условиях мерзлотных почв.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Область исследований соответствует пунктам паспорта научной специальности 2.8.3 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»: **пункт 10 – «Геологическое, маркшейдерское и геофизическое обеспечение проектирования и планирования горных работ, управления запасами и контроль качества добываемых полезных ископаемых с учетом их комплексного использования и охраны окружающей среды»; пункт 17 — «Разработка методов и технологий исследования и мониторинга горно-геологических и горнотехнических условий освоения и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и подземных хранилищ нефти и газа»**.

Степень разработанности проблемы. До освоения месторождения территория КГКМ изучалась в Институте географии СО РАН (г. Иркутск) (работы Белозерцевой И. А., Нечаевой Е. Г., Абалакова А. Д., Щетникова А. Г. и др.). Геологическое строение района, геохимические

исследования и технологии освоения КГКМ рассмотрены в работах Приминой С. П., Соковикова В. В., Кочнева Е. А. Принимались во внимание работы по факторам воздействия нефтегазодобычи на ландшафты Предуралья, Сибири и Крайнего Севера (Козин В. В., Булатов В. И., Семенов Ю. М., Соромотин А. В., Московченко Д. В., Юдахин Ф. Н., Васильев А. А., Иванов В. В., Лопатин К. И., Бузмаков С. А.).

Учитывались также результаты мониторинга природной и техногенной среды районов нефтегазодобычи коллективами ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Синицкий А. Е., Агбалян Е. В., Колесников Р. А., Шинкарук Е. В.), ИПОС СО РАН (Московченко Д. В.), СПбГУ (Опекунов А. Ю., Опекунова М. Г., Кукушкин С. Ю., Ганул А. Г. и др.). Принимались во внимание работы по техногенным почвам Качор О. Л., Путилина В. С., Галицкой И. В., Безугловой О. С., Коваля П. В., Гребенщиковой В. И., Белоголовой Г. А.

Мониторинг горнотехнических систем газодобычи представлен в работах Березнякова А. И., Попова А. П., Маслова В. Н., Березняковой Е. И., Гривы Г. И. Практика геотехнического мониторинга объектов добычи в криолитозоне обобщена коллективами ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть».

Научно-методические основы создания искусственного интеллекта в решении задач повышения эффективности управления разработкой месторождений крупных нефтегазоносных провинций в условиях неопределенности разработаны Кулешовой Л. С.

Однако, несмотря на значительное количество работ по различным аспектам мониторинга газовых месторождений, все еще остается неразработанным методический подход объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга.

Восполнением указанного пробела является создание научно-практических основ и разработка объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга при добыче газа на Ковыктинском ГКМ как недостающего и важного звена инженерных изысканий в едином блоке горнотехнического мониторинга, представленные в настоящем исследовании.

Объектом исследования являлись техногенно измененные почвы в привязке к технологическим узлам на промплощадке КГКМ как к источникам потенциального загрязнения территории при эксплуатации активно действующего месторождения. Изучено более 315 образцов почв с учетом данных производственного контроля.

Предмет исследования: геохимические параметры мерзлотных почв; механизм взаимообусловленного распределения валовых и подвижных форм элементов-загрязнителей; результаты 3D-моделирования геохимической трансформации элементов; геопространственное распределение тяжелых металлов и мышьяка на основе ГИС; результаты математического моделирования и прогнозирования горнопромышленных условий в зоне месторождения; алгоритм цифровизации по оптимизации расхода метанола (как системного загрязнителя) в газодобывающей скважине.

Идея работы. На основе **комплексирования** указанных методов и приемов разработать алгоритм (методику) объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга как недостающего звена в единой системе инженерных исследований горнотехнического мониторинга. Это также позволит скорректировать иски органов государственного экологического контроля почв в отношении превышений содержаний Mn, Ni, As в почвах действующего месторождения. Выявить геохимические особенности пространственного распределения тяжелых металлов и мышьяка.

Кроме того, на примере газовой скважины типового куста разработать цифровую модель по оптимизации расхода термодинамического ингибитора газогидратообразования (метанола) с возможным масштабированием подхода на объекты газодобывающих месторождений Сибири и северных территорий.

Цель исследования: разработка научно обоснованного комплекса методических и технических решений, направленных на создание алгоритма (методики) объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга при активной эксплуатации

газоконденсатного месторождения как важного и недостающего элемента комплексного инженерного мониторинга горнотехнической системы Ковыктинского ГКМ.

Основные задачи:

1. Провести детальный анализ технологических узлов добычи и подготовки газа с позиции поступления Mn, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, Co (ТМ), а также As в почвы в рамках объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга.

2. С использованием 3D-моделирования изучить механизм взаимообусловленной геохимической трансформации валовой и подвижной форм элементов в техногенных почвах в зависимости от $C_{орг}$, $N_{общ}$ и pH почвы в целях корректировки государственного и производственного экологического контроля территории.

3. На основе ГИС-технологий выявить геопространственную неоднородность распределения и геохимические аномалии контролируемых элементов, определить их ассоциации и направление миграции в мерзлотных почвах территории месторождения для включения в систему единого геотехнического мониторинга газодобывающих организаций.

4. Провести детальный суточный анализ технологических параметров режима газодобывающей скважины, оценить расход и потери ингибитора гидратообразования (метанола) как одного из системных загрязнителей территории добычи газа с целью разработки цифрового алгоритма по оптимизации его потребления и оценить экономическую эффективность предлагаемой модели.

Методология. Методология исследований базировалась на учениях о геохимии почв и ландшафтов Сочавы В. Б., Снытко В. Б., Касимова Н. С., Добровольского Г. В., Глазовской М. А., Виноградова А. П., Перельмана А. И., Пиковского Ю. И., Убугунова В. Л., Ильина В. Б., Ладонина Д. В., Керимова И. А., Кочурова Б. И. Научную методологическую основу составляли: системный эмпирический подход; теоретический анализ процесса ингибирования гидратообразования метанолом; статистические методы; приемы цифровизации.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе применялись геохимические методы анализа почв: потенциометрическое определение pH, фотометрическое определение органического углерода ($C_{орг}$) и общего азота ($N_{общ}$), определение валовых (кислоторастворимых) и подвижных (в ацетатно-аммонийной буферной вытяжке с pH 4,8) форм металлов и мышьяка методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП), рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) валового состава почв; математическое и 3D-моделирование (Statistica 10), распределение элементов на основе ГИС (Surfer 23.1.162), корреляционно-регрессионный анализ и цифровизация. Использовалось сертифицированное оборудование ИРНИТУ, в том числе Института «Сибирская школа геонаук».

Для повышения квалификации, необходимой при проведении исследований, пройдено обучение на геовебинаре «Цифровая инженерия» (Иркутск, СО РАН, 2024 г.).

Научная новизна:

1. **Разработан** алгоритм (методика) *объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга как важного звена в блоке единой системы горнотехнического мониторинга при эксплуатации газоконденсатного месторождения на* основе комплексирования методов и приемов: геохимических параметров почв, 3D-моделирования, ГИС-технологий, регрессионного анализа, который можно внедрять в систему менеджмента ПАО «Газпром».

2. **Получены новые** геохимические зависимости взаимообусловленного распределения содержаний валовых и подвижных форм элементов (ТМ и мышьяка) от буферных свойств почвы, что позволяет контролировать механизм трансформации их форм в условиях постоянной кислой почвенной среды месторождения, что может являться недостающей частью геотехнологического мониторинга в рамках современного менеджмента горнопромышленного производства.

3. Для КГКМ **впервые** с помощью ГИС-технологий выявлена геопространственная неоднородность и аномалии распределения ТМ и As в кислых

мерзлотных почвах, что позволяет прогнозировать развитие геохимической ситуации, направление миграции элементов и контролировать статус земной поверхности при активной газодобыче.

4. **Разработан цифровой алгоритм** оптимизированного расхода ингибитора гидратообразования (метанола) в добывающей скважине с целью снижения его потерь и уменьшения загрязнения почвы, приводящего к системному повышению кислотности почвы (pH = 4,5), что, в свою очередь, является причиной формирования подвижных (токсичных) форм элементов, которые не учитываются при оценке территории газодобычи. Цифровой алгоритм является необходимым звеном в системе объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая. Получены новые параметрические зависимости распределения элементов в техногенной почве, что позволяет выявлять механизм геохимической трансформации валовых и подвижных форм в мерзлотных почвах. Это развивает научные основы геохимии техногенеза и дополняет научно-методическую базу мониторинга горнотехнических систем. Научно обосновано создание объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга на территории КГКМ, применимого на газовых месторождениях Сибири и северных территорий.

Практическая. Разработаны практические рекомендации по мониторингу почв, которые будут внедрены в деятельность ООО «Газпром добыча Иркутск» и использованы при подготовке документов ОВОС и ПМООС. Выполнен отчёт по техническому заданию организации (приложение 2). Оценка размера вреда, причиняемого почвам загрязнением мышьяком, показала, что экономическая эффективность предложенных мероприятий по мониторингу и предотвращению загрязнения почв составляет около 300 млн руб. (рассчитана по методике Минприроды России от 08.07.2010 №238). Это экономия за счёт снижения возможных экологических платежей и затрат на возмещение вреда почвам. Практическая значимость исследований также связана с перспективой масштабирования цифровой модели по оптимизации расхода метанола на типовые газовые скважины Сибири и северных территорий. Это будет способствовать повышению энергоэффективности и рентабельности добычи газа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга на КГКМ, основанная на базовых геохимических параметрах техногенной почвы в привязке к производственным узлам промплощадки. 3D-моделирование выявило новые взаимообусловленные геохимические зависимости валовых и подвижных форм элементов Mn, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, Co и As в почвах от их буферных свойств (pH, $C_{орг}$, $N_{общ}$) в условиях постоянного закисления мерзлотных почв. Выявлено формирование геохимических кластеров As в кислой среде почв. Скорректированы иски органов государственного экологического контроля почв в отношении повышенных содержаний элементов в почвах: для Mn, Ni — это техногенное поступление, а содержание As в почвах наследуется геолого-геохимическими особенностями территории и связано также с привносом металлоида в составе привозного грунта для обустройства промплощадки (аргиллиты, сланцевые глины с Ярактинского месторождения).

2. **Впервые** для КГКМ в рамках мониторинга получены карты моноэлементных распределений элементов на основе ГИС в привязке к технологическим узлам, свидетельствующие о геопространственной неоднородности их распространения и наличии геохимических аномалий в условиях эксплуатации газоконденсатного месторождения.

3. **Разработан цифровой алгоритм** по оптимизации расхода термодинамического ингибитора метанола с целью снижения его потерь, что повысит экономическую эффективность и рентабельность производства при внедрении цифровой модели: 7 008 000 рублей, ROI = 588 % для куста из 10 газовых скважин. Кроме того, сокращение расхода метанола на 27,9 т/год на одну скважину (около 279 т/год на куст из 10 скважин) будет

способствовать уменьшению закисления мерзлотных почв и, соответственно, снижению содержания токсичных подвижных форм элементов.

Личный вклад автора заключался в проведении полевых и лабораторных работ, обработке результатов, построении ГИС- и 3D-моделей, получении цифровой модели, обсуждении результатов, подготовке материалов к публикациям.

Степень достоверности исследования. Диссертационная работа является результатом исследований, проведенных аспирантом в 2023–2025 годах, а также сравнительного анализа с экспериментальными данными по почвам предыдущих лет. Все математические расчеты, построение 3D-моделей и распределений элементов на основе ГИС на изученной территории выполнены исследователем самостоятельно и верифицированы в рамках стандартизованных и утвержденных методик. Достоверность подтверждена также использованием методов современной аналитической химии, проведением анализов в аттестованных лицензированных лабораториях ИРНИТУ на современном физико-химическом оборудовании, верификацией регрессионных уравнений и полученной цифровой модели.

Апробация. Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 10 конференциях: Всероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития горно-металлургической отрасли» (Иркутск, Игошинские чтения, 2023); IV Международной научно-практической конференции (Петрозаводск, 2023); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы эффективного использования полезных ископаемых и сохранения окружающей среды» (Иркутск, Леоновские чтения, 2024); Международной научно-практической конференции (Пенза, МЦНС «Наука и Просвещение», 2024); 40-й Международной конференции «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 2024); Международной научно-практической конференции «Эколого-экономическая безопасность регионов» (Екатеринбург, 2024); LXVIII Международной научно-практической конференции (Москва, НИЦ «Актуальность.РФ», 2025); Всероссийской научно-технической конференции «Геонауки» (Иркутск, 2025, 2026); XIV Молодежной международной научно-практической конференции имени Гриценко А. И. «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (Москва, 2026).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано **14 работ, из них 5** — в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации, в том числе из *Белого списка,* **9** — в других изданиях.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 179 источников, и пяти приложений. Диссертация изложена на 129 страницах, содержит 62 рисунка и 12 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю – доктору химических наук, профессору Сарапуловой Галине Ибрагимовне за всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах подготовки диссертационной работы. Автор благодарит Горячева И. Н., Ланько А. В. и Лукьянова Н. Д. за конструктивные консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 приведен обзор современных методов мониторинга горнотехнических систем и территорий в условиях горнопромышленного техногенеза и при эксплуатации газоконденсатных месторождений.

В главе 2 приведены методы и приемы исследования. Дано описание геолого-геоморфологических, литолого-геохимических и гидрогеологических характеристик района исследования. Проведен детальный анализ узлов технологического цикла как потенциальных источников загрязнения почвы территории промплощадки.

В главе 3 приведена геохимическая оценка почв промплощадки Ковыктинского ГКМ в зоне 8 узлов техно-геохимического мониторинга. Получены зависимости распределения валовых форм Mn, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, Co, As от pH и $C_{орг}$ почвы; для As обнаружено

формирование геохимических кластеров. Получены 3D-модели взаимообусловленной трансформации валовых и подвижных форм As, Ni в зависимости от pH и $C_{орг}$ в условиях кислой среды и насыщения почвы железом (до 45 000 мг/кг). Выявлены причины повышенных содержаний Mn, Ni и As. Показано влияние привозного грунта, использованного при строительстве промплощадки, на регистрируемое повышенное содержание мышьяка: поставляемые из карьеров Ярактинского месторождения аргиллиты, глины и глинистые сланцы содержат до 13 мг/кг мышьяка. Повышенные содержания As также наследуются геолого-геохимическими особенностями территории. Скорректированы претензии органов государственного экологического контроля почв. Оценка размера вреда почвам по мышьяку показала, что предотвращённый вред по мышьяку составляет 287 млн руб.

В главе 4 представлены картограммы распределения тяжелых металлов и As в почвах на основе ГИС, выявлена их геопространственная неоднородность. Рассчитаны коэффициенты накопления элементов $К_к$ относительно мировых кларков и суммарный показатель загрязнения Z_c для каждого промузла опробования от 3,8 до 9,1, что соответствует допустимой категории загрязнения. Определены геохимические барьеры по Перельману А. И.: окислительный — с иммобилизацией Mn и Ni; сорбционно-органогенный — с закреплением Cu на органическом углероде; кислотный — с понижением аккумуляции разных минеральных форм As.

В главе 5 кратко рассмотрена проблема закупорки системы добычи газовыми гидратами. Разработан цифровой алгоритм оптимизации расхода термодинамического ингибитора метанола в газовой скважине, который носит мультипликативный характер за счет учета попарных комбинаций технологических параметров. Получено регрессионное уравнение с высоким коэффициентом детерминации R^2 = 0,85, описывающее процесс распределения. Дано термодинамическое обоснование модели: устьевая зона скважины работает с переохлаждением на 2,2–3,2 °С относительно стандартной кривой гидратообразования, что и определяет вынужденно повышенный расход метанола. Цифровая модель выявила также, что требуемая концентрация ингибитора в водной фазе должна составлять не более 7,3 масс. % при фактическом его содержании 20–25 масс. %. Выполнена статистическая верификация многопараметрового уравнения цифровой модели.

В заключении приведены основные выводы.

Первое защищаемое положение.

Геохимическая составляющая мониторинга. **На территории эксплуатации месторождения получены новые взаимообусловленные геохимические зависимости валовых и подвижных форм элементов Mn, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, Co и As в техногенной почве в зависимости от буферных свойств — pH, Cорг, Nобщ. Результаты 3D-моделирования выявили механизм трансформации форм элементов в условиях постоянной закисленности почв. Причиной закисления почв до pH = 4,5 является образование, в частности, угольной кислоты, усиливающей десорбцию металлов с Fe-оксидов, что и определяет появление подвижных форм. Скорректированы иски органов государственного экологического контроля почв в отношении повышенных содержаний элементов в почвах: для Mn, Ni — это техногенное поступление, а содержание As в почвах наследуется геолого-геохимическими особенностями территории и связано с привносом металлоида в составе привозного грунта для обустройства промплощадки (аргиллиты, сланцевые глины с Ярактинского месторождения).**

На рис. 1 представлено расположение месторождения и промышленных узлов на территории промплощадки.

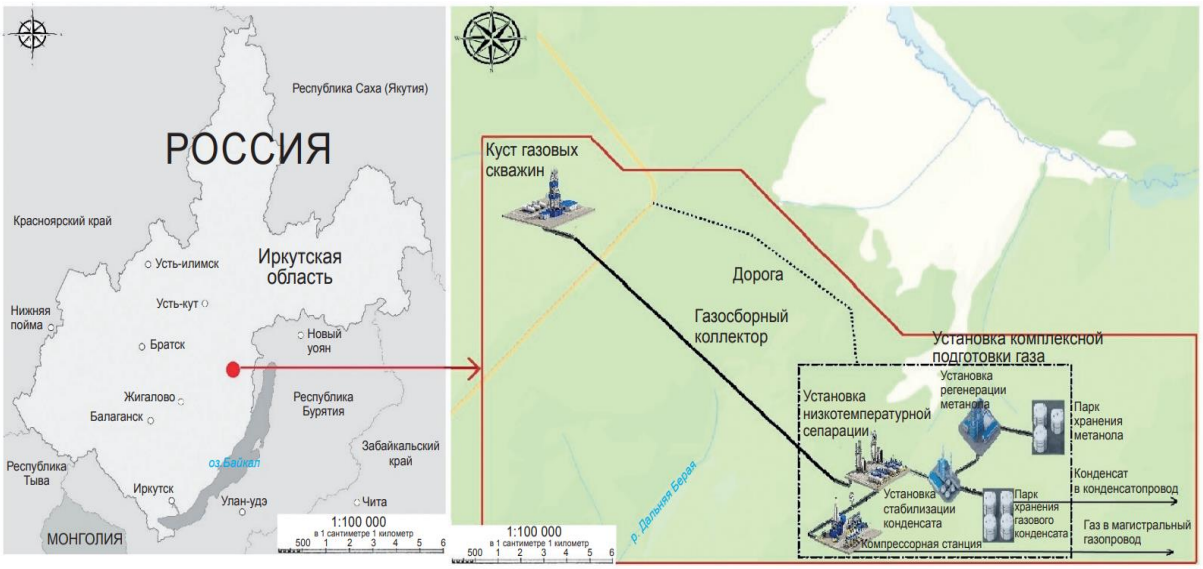

Рис. 1. Карта расположения Ковыктинского газоконденсатного месторождения и промышленных установок на промплощадке

Исследования почв проводились с определением валовых и подвижных форм металлов и мышьяка в соответствии с концепцией пространственно-временной динамики изменения геохимических параметров почв в привязке к узлам иерархической структуры объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга (рис. 2).

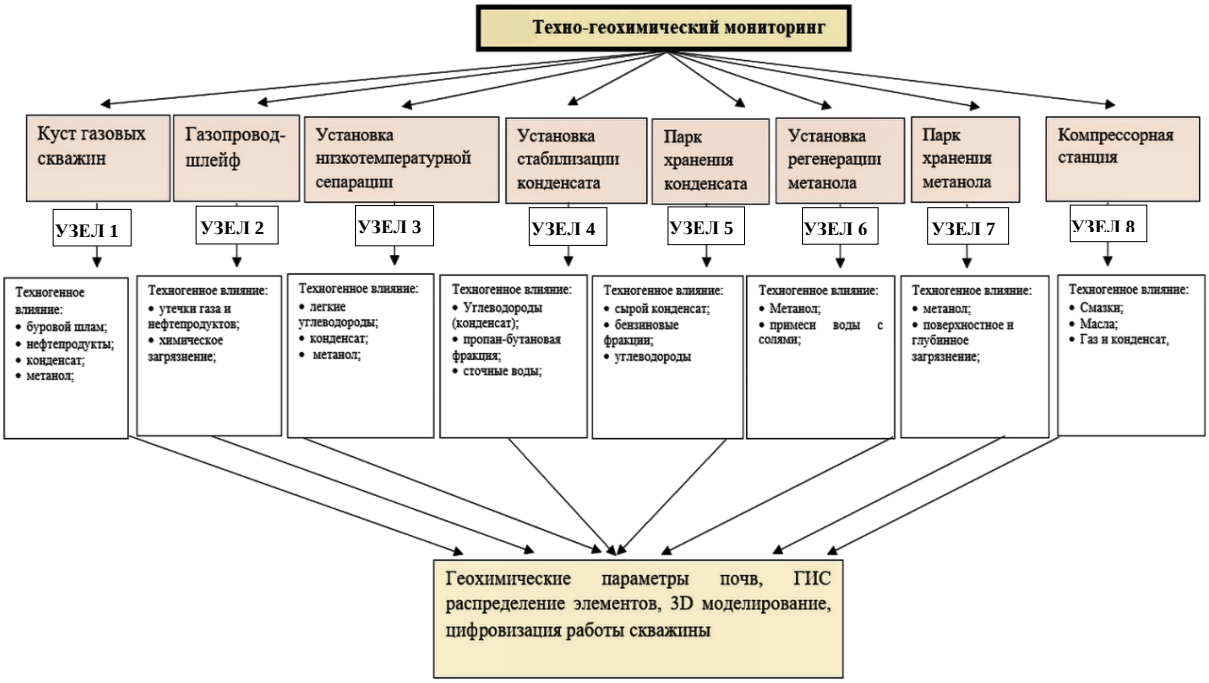

Рис. 2. Блок-схема объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга почв

Точки пробоотбора представлены на рис. 3 в соответствии с блок-схемой (рис. 2).

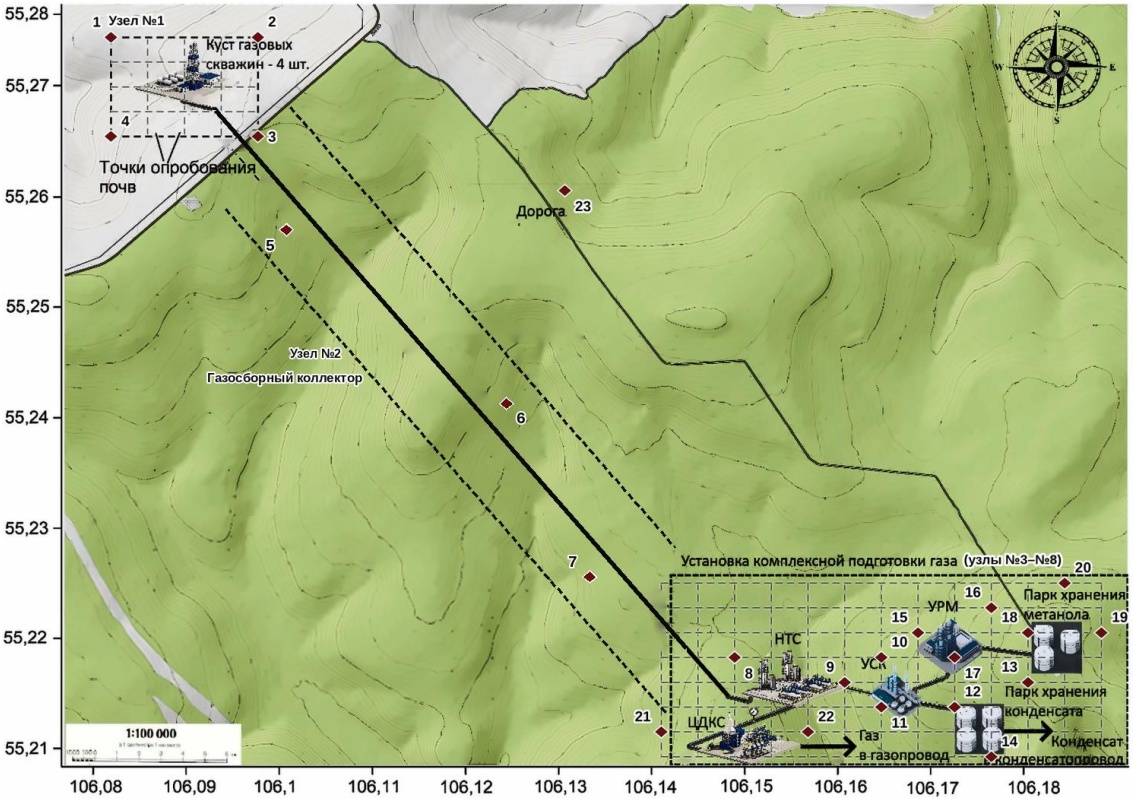

Рис. 3. Схема пробоотбора почв в зоне месторождения

Показано, что значения геохимических параметров почв за 2025 г. практически сохраняют свою динамику по сравнению с 2024 годом (и годами ранее), что свидетельствует о постоянстве техногенного поступления большинства элементов без превышения нормативов, однако для некоторых из них – содержания с превышением ОДК/ПДК. Так, для Ni, Mn регистрируются в некоторых точках на территории промплощадки величины Mn до 1700–3500 мг/кг (ОДК/ПДК 1500 мг/кг), для Ni до 65 мг/кг (ОДК/ПДК 40 мг/кг). Для As содержание валовых форм достигало 15 мг/кг (ОДК мышьяка зависит от кислотности почвы и её гранулометрического состава — песчаные, супесчаные, суглинистые или глинистые: ОДК валового мышьяка варьирует от 2 до 10 мг/кг). Рассчитан суммарный показатель загрязнения почв Zc для каждого пункта опробования; превышения ОДК/ПДК установлены по отдельным элементам — Mn, Ni и As.

Определены также фоновые валовые содержания элементов на расстоянии 10 и 40 км от месторождения. Они составили: для As — 1,2–1,5 мг/кг, Ni — 12–14 мг/кг, Mn — 300–310 мг/кг. Выявлено также, что на территории вахтового посёлка Нючакан (фоновый участок на расстоянии 40 км) почва имеет слабощелочной или щелочной характер, pH до 8 ед. На рис. 4 представлено сравнительное распределение параметра pH на основе ГИС с охватом территории месторождения и фона.

Кислые свойства почвенной среды (pH = 4,5–5,1) в зоне добычи и подготовки газа обусловлены техногенным влиянием производства в виде постоянного поступления в почвы метанола (потери, разливы). Фактором-причиной понижения pH является почвенное окисление метанола с образованием кислот, в том числе угольной кислоты с pH от 3,5 до 4,5: *CH_3OH (метанол) → HCHO (формальдегид) → HCOOH (формиат, метановая кислота) → CO_2 (углекислый газ) → H_2CO_3 (угольная кислота).* Формирование кислой среды, в свою очередь, является причиной усиливающейся десорбции металлов с Fe-оксидов, что как раз и определяет механизм трансформации геохимических форм большинства элементов в подвижные.

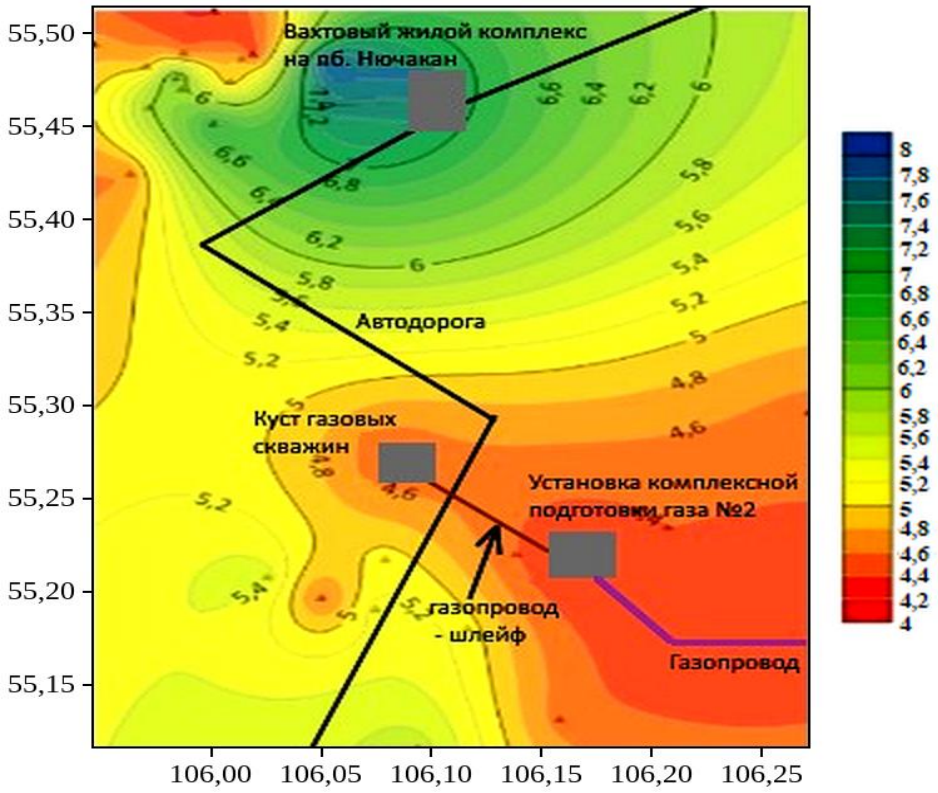

Рис. 4. Сравнительные распределения pH на основе ГИС на территории промплощадки месторождения и в вахтовом посёлке Нючакан (фон)

Построены корреляции распределения содержаний анализируемых элементов в координатах «элемент – pH» и «элемент – Сорг». Выявлено, что для Mn зависимости имеют хаотичный характер с низкими значениями коэффициентов детерминации (R^2 от 0,002 до 0,425), что указывает на преобладание техногенного источника поступления элементов (рис. 5, 6).

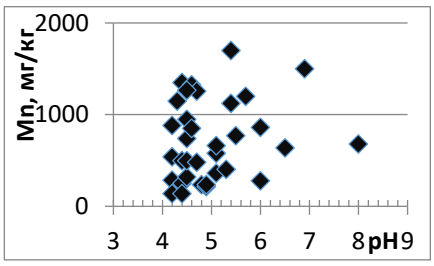

Рис. 5. Зависимость валового содержания Mn от pH

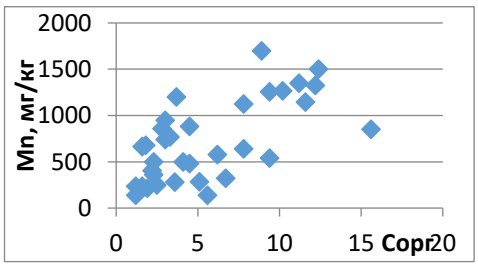

Рис. 6. Зависимость валового содержания Mn от Сорг

Мышьяк по степени экологической опасности относится к группе высокотоксичных, канцерогенных элементов 1 класса опасности. Поэтому в любых программах по мониторингу состояния окружающей среды контроль за содержанием мышьяка как одним из приоритетных загрязнителей считается обязательным. Для валовых содержаний As установлено аномальное распределение его содержания относительно буферных компонент почвы с формированием геохимических кластеров (рис. 7, 8).

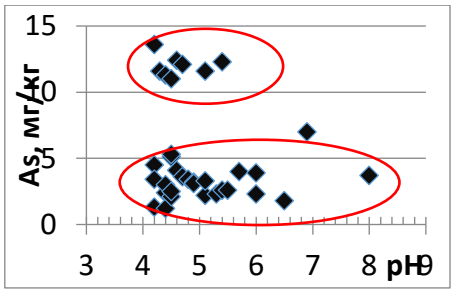

Рис. 7. Зависимость валового содержания As от pH

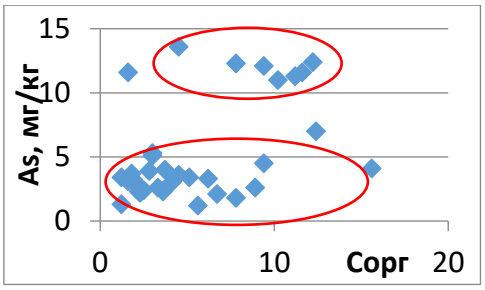

Рис. 8. Зависимость валового содержания As от Corг

Для объяснения механизма наблюдаемых эффектов построены 3D-модели, показывающие динамику и различную чувствительность валовых и подвижных форм As к содержанию органического углерода Corг, pH и Nобщ (рис. 9–11). Выявлен механизм трансформации двух форм элементов в зависимости от основных буферных параметров почвы.

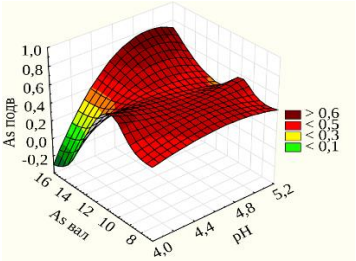

Рис. 9. 3D-модель распределения валовых и подвижных форм As от pH

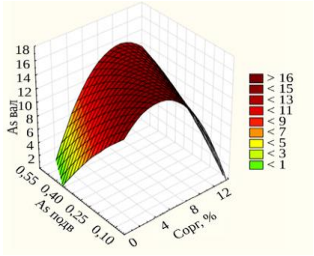

Рис. 10. 3D-модель распределения валовых и подвижных форм As от Corг

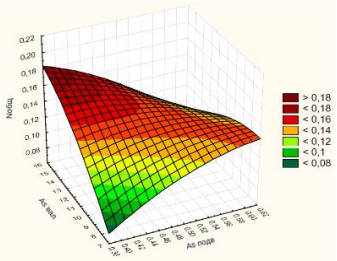

Рис. 11. 3D-модель распределения валовых и подвижных форм As от Nобщ

Кластеризация распределения мышьяка обусловлена высокой чувствительностью различных минеральных образований As с разной валентностью и трансформацией его валовых форм в подвижные при низком pH = 4,5. Так, известно, что As максимально закрепляется в форме As(V) в щелочной среде, тогда как в кислых техноземах равновесие смещается в область подвижных форм As(III). Так, например, механизм перехода валовых форм в подвижные в кислых техноземах инициирован десорбцией с поверхности оксидов Fe, в частности для оксоанионов (AsO_4^{3-}). Указанные эффекты не учитываются действующим экологическим контролем почв в зоне газодобычи.

В то же время 3D-зависимости содержаний As от Corг и Nобщ указывают на плавный характер трансформации.

Одновременно в техноземах месторождения фиксируется высокое содержание общего железа Fe (Fe общ. достигает 45 000 мг/кг). Это обусловливает аккумуляцию (сорбцию) Mn, Ni на окислительном железистом барьере (по Перельману А. И.). Корреляционный анализ показал, что независимо от концентрации Mn железистый барьер устойчиво выполняет аккумулятивную функцию (рис. 12). Аналогичный характер аккумуляции на Fe-барьере выявлен для Ni (рис. 13). Таким образом, основной геохимический контроль миграции для Mn, Ni в почвах промплощадки осуществляется окислительным железистым барьером.

Однако закрепление As на твёрдой железистой фазе принципиально отличается от поведения тяжёлых металлов (рис. 14).

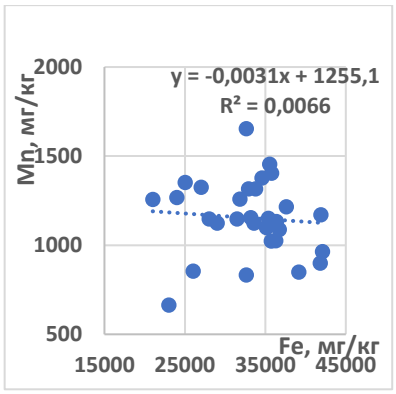

Рис. 12. Зависимость валовых содержаний Mn от Fe в почве

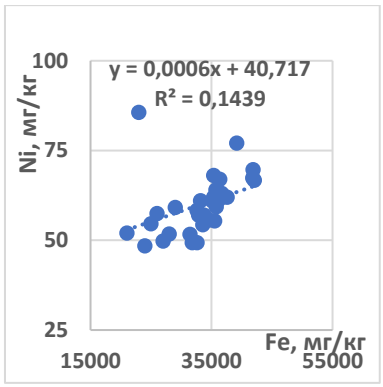

Рис. 13. Зависимость валовых содержаний Ni от Fe в почве

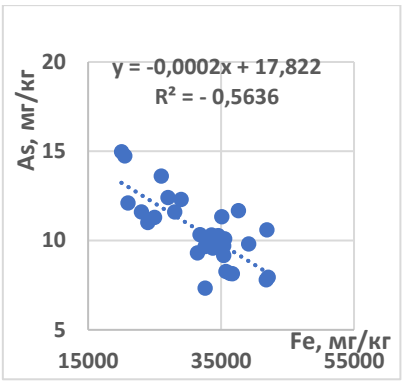

Рис. 14. Зависимость валовых содержаний As от Fe в почве

Установлена статистически значимая отрицательная корреляция между содержаниями в почве Fe и As с коэффициентом детерминации R^2 = -0,564 (заметная связь по шкале Чеддока). Это означает, что As, в отличие от Mn и Ni, слабо сорбируется на твёрдой железистой фазе при pH = 4,5 вследствие известного минералогического разнообразия его форм: в почве находится около 60 % арсенатов, 20 % сульфидов и сульфосолей, 20 % арсенидов, оксидов и силикатов с различной чувствительностью к pH почвы. Этот элемент способен изменять аллотропную форму даже при незначительных колебаниях окислительно-восстановительных условий в почве. *Таким образом, выявлена природная литохимическая аномалия по мышьяку в почвах газоконденсатного месторождения.*

Рассчитаны коэффициенты накопления элементов Кк относительно мировых кларков:
– активное накопление выше кларков — для As (Кк = 2,09) и для **Mn** (Кк = 1,55), для **Ni** (Кк = 1,50);
– околокларковое накопление — для **Cu** (Кк = 1,19), для **Cd** (Кк = 1,04), **Zn** (Кк = 0,80);
– дефицит накопления — для **Pb** (Кк ≤ 1,1), для **Co** (Кк = 0,60). Расчёт выполнен по медианным значениям наблюдений с учетом кларков почв мира по А. П. Виноградову: As — 5, Ni — 40, Mn — 850 мг/кг соответственно.

Таким образом, геохимическая компонента и выявленные зависимости составляют базовую основу для создания системы техно-геохимического мониторинга на газоконденсатном месторождении в привязке к его производственным узлам.

Второе защищаемое положение.

Технологическая и ГИС составляющие мониторинга. **В рамках горнопромышленного мониторинга выполнен анализ темпов технологического освоения промплощадки месторождения по годам ввода производственных узлов, выявлена динамика содержаний Mn, Ni и As в почвах за период 2019–2025 гг., отражающая связь между интенсивностью технологического освоения в зоне газодобычи и уровнем поступления этих элементов в почвы. Впервые для КГКМ в рамках геопространственной цифровизации получены карты распределений элементов на основе ГИС как контрольных составляющих мониторинга, выявившие пространственную неоднородность их содержаний и обнаружившие геохимические аномалии на территории промплощадки.**

В рамках объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга проведен анализ темпов технологического освоения промплощадки месторождения по годам ввода производственных узлов и установлена динамика содержаний Mn, Ni и As в почвах за период 2019–2025 гг. Получены диаграммы, компактно изображающие связь между интенсивностью

освоения территории в зоне газодобычи и уровнем поступления этих элементов от промышленных узлов (рис. 15).

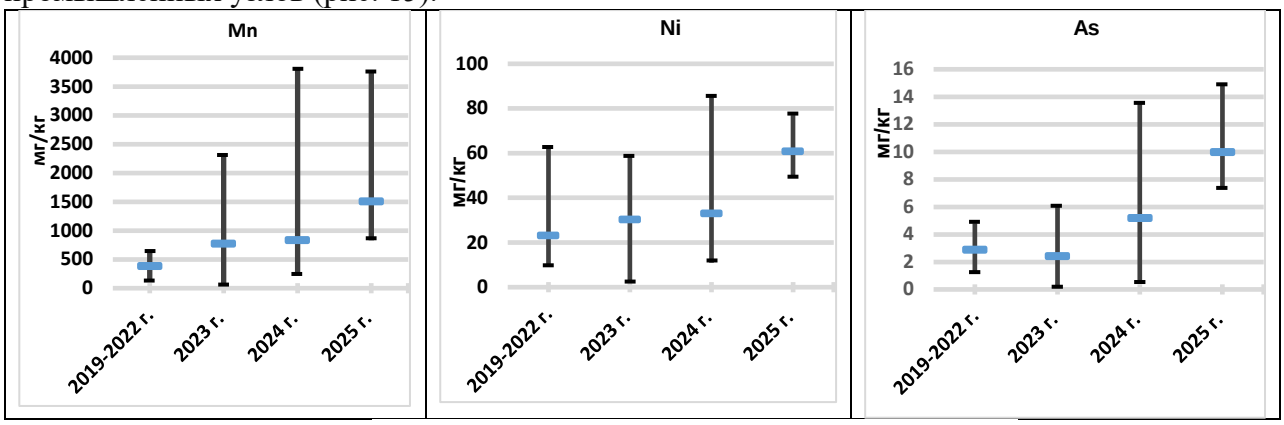

Рис. 15. Диаграммы интенсивности освоения месторождения и содержаний Mn, Ni, As (валовых форм) в почвах промплощадки относительно средних значений

– Так, период 2019–2022 гг. соответствует этапу опытно-промышленной эксплуатации: установка и пусконаладка основного оборудования; промышленная эксплуатация газовых скважин ещё не велась.
– 2023 г. — этап интенсивных сварочно-монтажных работ и компоновки оборудования.
– 2024 г. — период наращивания производственных мощностей и максимальной интенсивности добычи, интенсивность маршрутов автотранспорта, сварочные работы.
– 2025 г. — появление новых промузлов установки комплексной подготовки газа (УКПГ) и дополнительного количества автотранспорта, в том числе строительного, для оснащения и работы этих промузлов, сварочные работы.

Выявлено, что содержания Mn распределены по нарастающей: он аккумулируется в зоне газосборных коллекторов и трубопроводов, где ежесуточно ведутся сварочные работы (до 700 м труб в сутки и до 5000 м в неделю). В зоне дугового разряда формируется сварочный аэрозоль с оксидами Mn и Ni, фторидами Na из покрытий электродов, которые поступают в почвенный слой (известен химический состав покрытий электродов).

Поступление Ni в почвы обусловлено как сварочно-ремонтными работами, так и истиранием металлических деталей автотранспорта: ежесуточно по промплощадке проходит до 300 единиц транспорта, до 100 грузовых автомобилей и до 50 единиц спецтехники.

Анализ промузлов и выделяемых ими в окружающую среду веществ (включая рапу) не выявил загрязнения мышьяком, в то время как метанол в качестве потерь поступает от каждого из 8 узлов промплощадки. Мышьяк накапливается в почвах в результате постоянного поступления из привозного грунта (аргиллиты, глинистые сланцы – содержание As в которых кратно превышает ОДК/ПДК, – до 13 мг/кг) из Ярактинского месторождения и близлежащих карьеров для отсыпки промышленных площадок, тем самым формируя геохимическую мышьяковистую аномалию.

На основе пространственной привязки геохимических данных к узлам территории месторождения построены распределения доминирующих элементов-загрязнителей в почвенном слое на основе ГИС. Пространственный ГИС-анализ выполнен в Surfer 23.1.162 по точкам пробоотбора (8 объектов мониторинга) в системе координат WGS84/UTM Zone 49N с использованием цифровой модели рельефа SRTM (30 м/пиксель), что позволило выделить ореолы накопления и аномалий, направления миграции элементов и сопоставить их с геохимическими барьерами по Перельману А. И. На примере 2025 года представлены результаты картирования доминирующих элементов и направления их миграции (рис. 16-18).

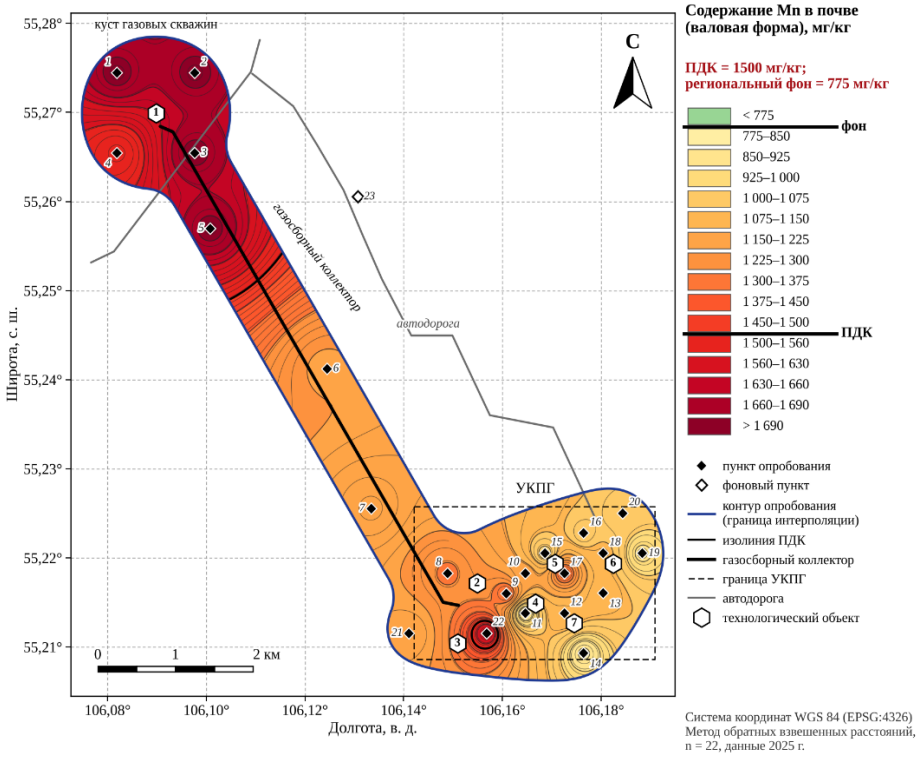

Рис. 16. Распределение валовых форм Mn (мг/кг) в почвах на территории КГКМ

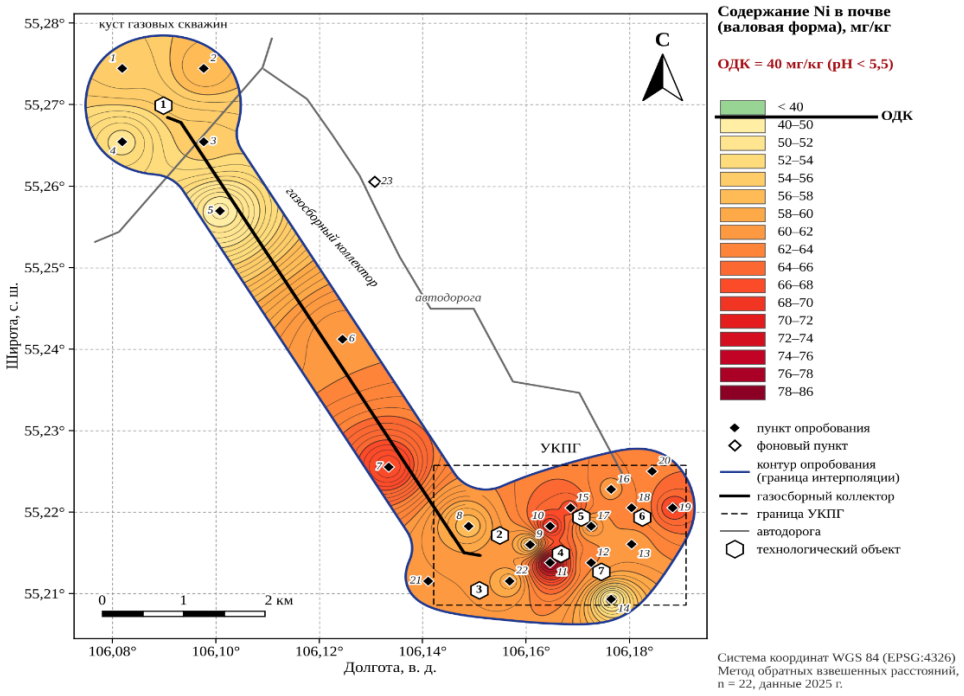

Рис. 17. Распределение валовых форм Ni (мг/кг) в почвах на территории КГКМ

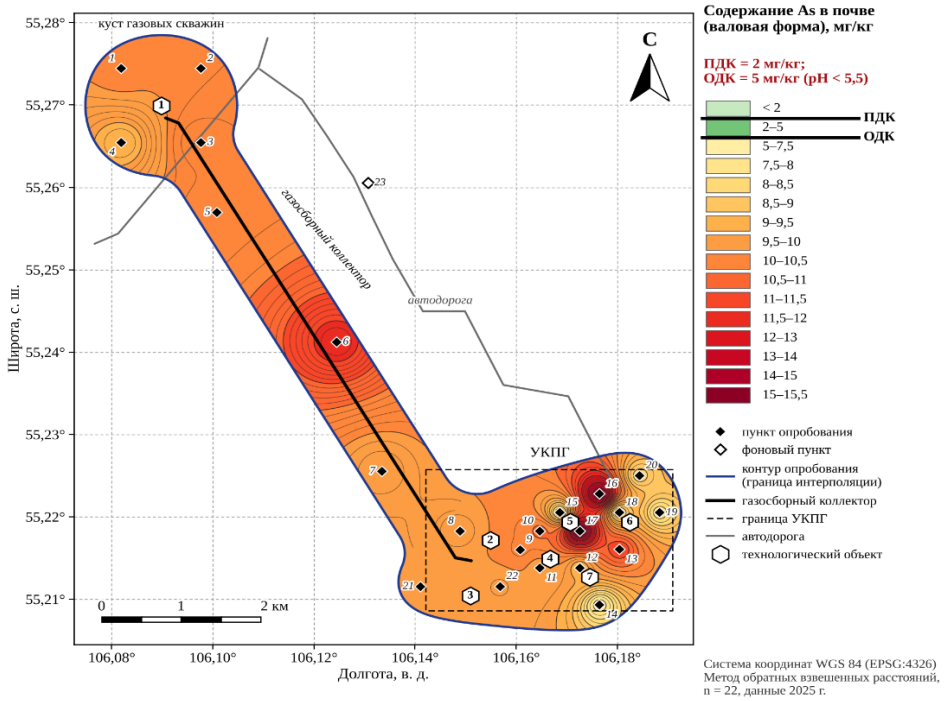

Рис. 18. – Распределение валовых форм As (мг/кг) в почвах на территории КГКМ

Пояснения к рисункам 16-18: ***1*** *– куст газовых скважин;* ***2*** *– установка низкотемпературной сепарации;* ***3*** *– центральная дожимная компрессорная станция;* ***4*** *– установка стабилизации конденсата;* ***5 –*** *установка регенерации метанола; 6 – парк хранения метанола; 7 – парк хранения стабильного конденсата.*

Таким образом, полученные геопространственные распределения элементов согласуются с результатами геохимического анализа почв и подтверждают концепцию мониторинга почв на основании геохимических параметров в привязке к технологическим узлам и позволяют дифференцировать техногенные источники поступления элементов. ГИС-технологии способствуют эффективному промышленному и безопасному освоению территории при газодобыче.

Третье защищаемое положение.

Цифровизация. **На примере газоконденсатной скважины разработан цифровой алгоритм по оптимизации расхода метанола (как системного загрязнителя) с целью снижения его потерь и уменьшения поступления в почвы. Экономическая эффективность при внедрении предлагаемой цифровой модели составляет 7 008 000 рублей для куста из 10 газовых скважин. Показан эколого-экономический эффект в виде сокращения расхода метанола на 27,9 т/год на одну скважину (около 279 т/год на куст из 10 скважин) и, следовательно, уменьшения закисления почв, которое является причиной нарушения геохимического статуса почв территории промплощадки в виде формирования подвижных токсичных форм элементов. Контроль расхода метанола в скважине, как ключевого звена добычи газа, необходимо включать в систему объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга.**

При добыче газа существует серьезная проблема закупорки трубопроводов газовыми гидратами. Борьба с их образованием на газоконденсатных месторождениях в настоящее время является одной из весьма актуальных, острых и нерешенных технологических задач. Поэтому активная разработка способов и методов снижения газогидратообразования при

добыче газа в суровых условиях Сибири и Севера при низких температурах — это актуальная задача в нефтегазовой отрасли.

По результатам детального суточного мониторинга (с шагом регистрации 1 ч) технологических параметров скважины установлено, что в отдельные часы суток фиксируется повышенное потребление ингибитора, что не согласуется с динамикой контролируемых параметров и свидетельствует о повышенном расходе ингибитора метанола: превышение достигает за сутки **до +96 кг**.

Построена 3D-модель взаимообусловленного распределения ключевых технологических параметров в работающем режиме скважины, которая выявила нелинейный и несогласованный режим параметров и расхода метанола (рис. 19).

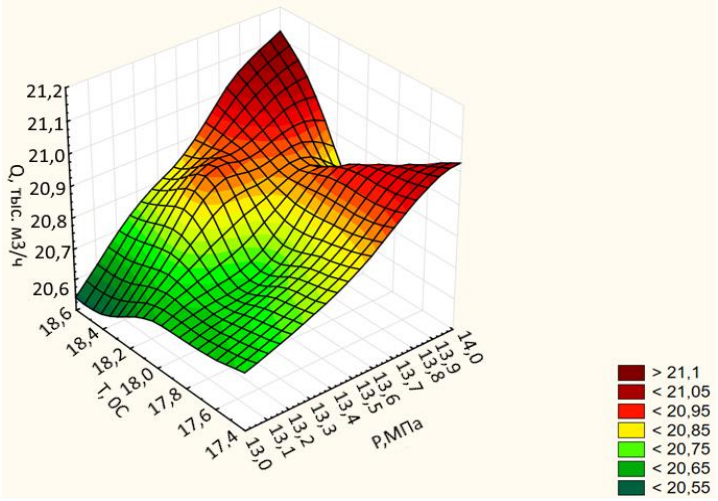

Рис. 19. 3D-модель взаимообусловленного распределения технологических параметров работы газодобывающей скважины

Для выявления причин несогласованности и для оптимизации расхода ингибитора гидратообразования разработан пошаговый алгоритм обработки данных (рис. 20) с последующим построением цифровой модели работы скважины в режиме реального времени.

Рис. 20. Пошаговый алгоритм для получения «цифровой модели» в условиях реального времени работы газодобывающей скважины

На рис. 21 представлена сравнительная диаграмма фактического и расчётного расхода метанола при суточной работе скважины.

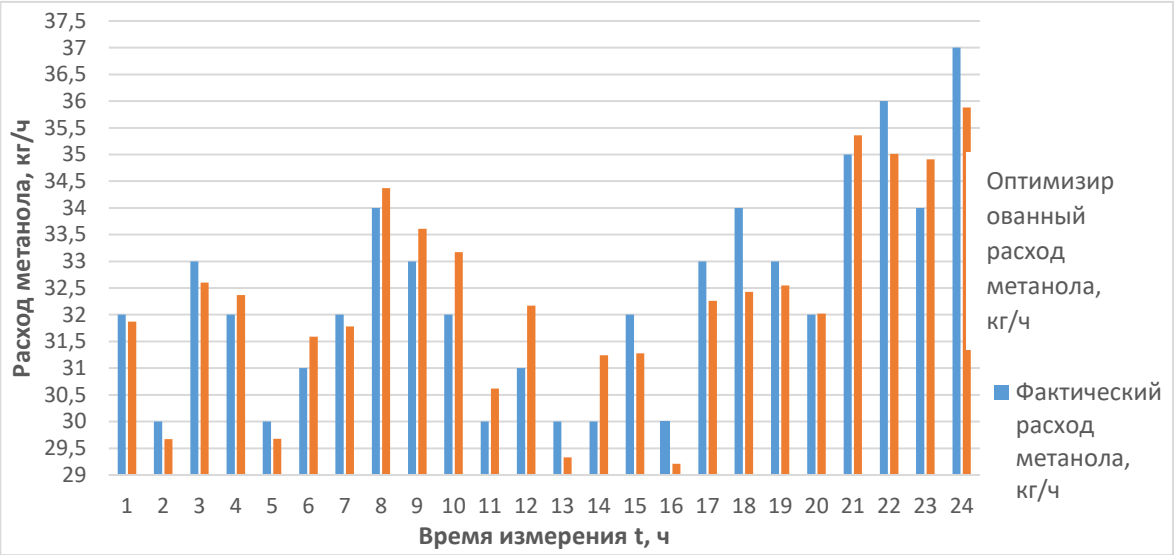

Рис. 21. Сравнительная гистограмма фактического и расчетного расхода метанола (Q, кг/ч) при работе скважины в течение суток

Получена математическая модель расхода метанола, описываемая следующим уравнением:

$$\mathbf{У = 178{,}967 – 1{,}923 \cdot X_1 – 3{,}375 \cdot X_2 + 3{,}337 \cdot X_3,\ R^2 = 0{,}63} \quad \mathbf{(1)}$$

где У — расход метанола, кг/ч;
X_1 – расход газа Q, тыс. м³/ч;
X_2 – давление на буфере скважины P, МПа;
X_3 – температура газа T, °C.

Анализ уравнения (1) показал, что раздельный учёт индивидуальных технологических параметров не обеспечивает корректного описания расхода ингибитора, о чём свидетельствует низкое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0{,}63$. Образование гидратов при расходе газа Q определяется не давлением и не температурой по отдельности: т. е. раздельный учёт расхода газа Q, давления P и температуры T неадекватно описывает процесс гидратообразования и, соответственно, повышенный расход метанола.

Поэтому был использован приём попарной комбинации параметров в расширенной регрессионной модели (Блок 6). В этом случае получено мультипликативное уравнение с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}85$, что характеризует высокое качество модели (2). Математическая модель для оценки расхода метанола выглядит следующим образом:

$$\mathbf{У = -13070{,}24 - 47{,}556 \cdot X_1 - 10{,}276 \cdot X_2 + 16{,}804 \cdot X_3 + 883{,}054 \cdot X_4 + 680{,}919 \cdot X_5 - 16{,}568 \cdot X_6,\ R^2 = 0{,}85} \quad \mathbf{(2)}$$

где

X_1 – произведение расхода газа Q, тыс. м³/ч и давления на буфере скважины P, МПа;
X_2 – произведение расхода газа Q, тыс. м³/ч и температуры газа T, °C;
X_3 – произведение давления на буфере скважины P, МПа и температуры газа T, °C;
X_4 – расход газа Q, тыс. м³/ч;
X_5 – давление на буфере скважины P, МПа;
X_6 – температура газа T, °C.

Следует подчеркнуть, что для реальных, технологически сложных и многофакторных процессов, каким является изучаемая технология, более высокий коэффициент детерминации, чем полученный в этой работе, практически недостижим.

Высокий дебит газа в попарном сочетании с высоким давлением ($X_1 = Q \times P$) повышает плотность потока газа и его концентрацию в водометанольном растворе для удержания режима и стабилизации раствора.

При высоком дебите газа в попарном сочетании с низкой температурой ($X_2 = Q \times T$) газ охлаждается за счёт эффекта Джоуля – Томсона, контролируя процесс равновесного гидратообразования.

При высоком давлении в попарном сочетании с низкой температурой ($X_3 = P \times T$) равновесные условия в системе «газ – вода – гидрат» смещаются в область снижения гидратной фазы согласно уравнению Клапейрона – Клаузиуса.

Иными словами, попарные комбинации параметров учитывают нелинейные перекрёстные эффекты, типичные для многофакторных процессов фазовых превращений.

Попарные комбинации контролируются с помощью автоматической системы управления технологическими процессами (АСУТП), установленной на автоматизированном рабочем месте пульта управления газодобычей.

Уравнение (2) прошло статистическую верификацию: тест Шапиро – Уилка — W = 0,958, p = 0,45 (нормальность остатков); Дарбина – Уотсона — DW = 2,12 (отсутствие автокорреляции); Бреуша – Пагана — p = 0,61 (гомоскедастичность). Модель статистически значима и обеспечивает высокое качество прогноза.

Разработанная оптимизированная цифровая модель работы газоконденсатной скважины служит эффективным алгоритмом для интеграции в действующую АСУ ТП газодобывающего предприятия. Предлагаемый цифровой подход применим на типовых скважинах газоконденсатных месторождений Восточной Сибири и северных территорий.

Цифровая модель режима скважины может быть включена в структуру комплексного горнотехнического объектно-ориентированного мониторинга на промысле в качестве одного из ключевых технологических блоков для сокращения расхода метанола. Это устранит основной фактор устойчивого закисления грунтов в зоне промузлов и снизит формирование подвижных (токсичных) форм элементов.

Экономические показатели эффективности предлагаемого решения для куста газовых скважин из 10 скважин составляют 7 008 000 руб. в год. Рентабельность реализации разработанного алгоритма мониторинга скважины составляет ROI = 588 %, окупаемость за 60 суток. Сокращение расхода метанола на 27,9 т/год на одну скважину (около 279 т/год на куст из 10 скважин) даёт также геоэкологический эффект, снижая нагрузку на почвенный покров. Масштабирование алгоритма расхода метанола стратегически оправдано для всех скважин Ковыктинского ГКМ и типовых газоконденсатных месторождений Восточной Сибири.

Таким образом, совокупность полученных результатов обосновывает предлагаемую концепцию эффективного *объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга* в зоне газоконденсатного месторождения.

Заключение

Диссертация представляет собой законченную квалификационную работу, в которой решена актуальная задача по разработке научно обоснованного алгоритма (методики) объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга почв при эксплуатации Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Основные результаты заключаются в следующем:

1. **Разработан алгоритм** (методика) объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга исследования территории в зоне газоконденсатного месторождения на основе комплексирования методов на базе ключевых геохимических параметров техногенных почв. Выявлены новые взаимообусловленные геохимические зависимости форм тяжелых металлов Mn, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, Co и As от буферных свойств почвы — pH, Cорг, Nобщ. Научно обосновано, что геохимические параметры составляют необходимую базовую часть для создания объектно-ориентированного техно-геохимического

мониторинга на газоконденсатном месторождении как недостающего звена единой инженерной системы горнотехнического обеспечения производства. Решение этой задачи имеет важное экономическое и хозяйственное значение для газопромысловой отрасли.

2. **Выявлен механизм** трансформации валовых и подвижных форм элементов в условиях постоянной закисленности почв с использованием 3D-моделирования в условиях постоянной кислой среды. Причиной закисления почв до pH = 4,5 является образование в почвенном слое территории месторождения, в частности, угольной кислоты, усиливающей десорбцию металлов с Fe-оксидов, что и определяет формирование подвижных форм элементов и формирует геохимический статус территории. Для валовых содержаний As установлено аномальное распределение его содержания относительно буферных компонентов почвы с формированием геохимических кластеров. Кластеризация распределения мышьяка обусловлена высокой чувствительностью различных минеральных образований As с разной валентностью и трансформацией его валовых форм в подвижные при низком pH = 4,5. Суммарный показатель загрязнения почв Zc, рассчитанный для каждого пункта опробования, в среднем за 2025 г. составляет по узлам мониторинга от 3,8 до 9,1, что соответствует допустимой категории загрязнения; превышения ОДК/ПДК установлены по отдельным элементам — Mn, Ni и As.

3. **Выявлено,** что значения геохимических параметров за 2025 г. практически сохраняют свою динамику по сравнению с 2024 годом и годами наблюдения ранее, что свидетельствует об устойчивом техногенном загрязнении почвы промплощадки. Скорректированы претензии органов государственного экологического контроля почв в отношении повышенных содержаний Mn, Ni, As в почвах промплощадки. Так, причины повышенных содержаний ТМ — техногенные, а регистрируемые превышения нормативов по As обусловлены влиянием грунта для обустройства промплощадки, привозимого из карьеров Ярактинского месторождения, содержащего до 13 мг/кг мышьяка в аргиллитах и глинистых сланцах. Оценка размера вреда почвам по мышьяку показала, что предотвращённый вред по мышьяку составляет до 300 млн руб.

4. **Выполнен** анализ темпов технологического освоения месторождения по годам ввода производственных узлов 2019–2025 гг., отражающий связь между динамикой поступления загрязнителей и интенсивностью эксплуатации месторождения. Приведена геохимическая оценка почв промплощадки Ковыктинского ГКМ в зоне 8 узлов техно-геохимического мониторинга. Анализ не выявил загрязнения почв мышьяком (включая рапу от скважины), в то время как метанол в качестве потерь поступает от каждого из узлов промплощадки.

5. **Установлена** различная чувствительность валовых и подвижных форм Mn, Ni, As к pH, Сорг и Nобщ почвы на основе 3D-моделирования, демонстрирующая механизм трансформации двух форм при варьировании параметров почвы. Показано, что высокое содержание общего железа Fe в техногенных почвах обусловило аккумуляцию ТМ на железистом геохимическом барьере. Причем для Mn, Ni — независимо от их концентрации — железистый барьер эффективно выполняет свою аккумулятивную роль, а As слабо сорбируется на твердой железистой фазе, что подтверждено регрессионным анализом.

6. **Впервые** для Ковыктинского ГКМ построены карты на основе ГИС, выявившие геопространственную неоднородность распределения содержаний элементов, геохимические аномалии в привязке к технологическим узлам промплощадки. Получено пространственное распределение pH посредством ГИС с охватом территории месторождения и вахтового посёлка Нючакан (фон — вне зоны техногенного влияния), которое подтвердило сильное систематическое закисление почв промплощадки до pH = 4,5.

7. **При использовании в качестве ингибитора гидратообразования в промузлах и скважине происходят неучтенные потери метанола. Разработан** цифровой алгоритм оптимизации расхода термодинамического ингибитора гидратообразования (метанола) в газодобывающей скважине. Полученная цифровая модель высокого качества (R^2 = 0,85), построенная на основе учёта попарных комбинаций технологических параметров, является

мультипликативной и может быть рекомендована к масштабированию на типовых скважинах газоконденсатных месторождений Восточной Сибири. Экономическая эффективность при внедрении разработанной модели составляет 7 008 000 рублей для 10 скважин. Рентабельность реализации разработанного алгоритма мониторинга скважины составляет ROI = 588 %.

8. **Получен** природоохранный *эффект, заключающийся в сокращении расхода метанола на 27,9 т/год на одну скважину (около 279 т/год на куст из 10 скважин) и, следовательно, в уменьшении закисления почв и, соответственно, высвобождения подвижных (токсичных) форм элементов.*

9. **Комплексирование методов:** 3D-моделирование, пространственные ГИС, корреляционно-регрессионный анализ, геохимические параметры и цифровизация начального звена добычи газа (газовой скважины) обусловливают получение логически связанных результатов при разработке объектно-ориентированного мониторинга горнотехнических систем в оценке состояния территорий в условиях техногенеза. Использование целенаправленного объединения нескольких методов весьма эффективно потому, что оно скомпенсировало ограничения отдельного метода, позволило получить общую достоверную картину о предмете исследования и снизить финансово-экологические затраты и риски.

10. **Таким образом**, решена важная задача по разработке методов и технологий исследования и мониторинга геологических и горнотехнических условий освоения и эксплуатации газоконденсатных месторождений, имеющая важное экономическое и хозяйственное значение для газопромысловой отрасли.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи опубликованные в журналах, индексируемых в международных и специализированных реферативных базах Chemical Abstracts и Georef

1. **Пыжьянов, Д. И.** Анализ геоэкологического состояния территории в зоне добычи газа / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Естественные и технические науки. – 2024. – № 2 (189). – С. 133–135. – DOI 10.25633/ETN.2024.02.10.

2. **Пыжьянов, Д. И.** Геоэкологическая оценка природно-техногенной почвенной системы в зоне куста газовых скважин / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова, К. В. Федотов // Естественные и технические науки. – 2024. – № 11 (198). – С. 156–161. – DOI 10.25633/ETN.2024.11.10.

3. **Пыжьянов, Д. И.** ГИС-технологии в оценке миграции элементов в техногенных почвах при газодобыче / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2026. – № 4 (166). – URL: https://research-journal.org/archive/4-166-2026-april/10.60797/IRJ.2026.166.23 (дата обращения: 10.05.2026). – DOI 10.60797/IRJ.2026.166.23.

4. **Пыжьянов, Д. И.** Пространственно-временное распределение элементов в техногенных почвах Ковыктинского газоконденсатного месторождения / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Науки о Земле и недропользование. – 2026. – Т. 49, № 1 (94). – С. 72–83. – DOI 10.21285/2686-9993-2026-49-1-6.

5. **Пыжьянов, Д. И.** Цифровой алгоритм для оптимизации ингибирования гидратообразования при добыче газа / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2026. – Т. 32, № 3. – С. 62–73. – DOI 10.21209/2227-9245-2026-32-3-62-73.

Другие публикации

6. **Пыжьянов, Д. И.** Проблема гидратообразования на газоконденсатных месторождениях и экологическая безопасность / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения) : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск : ИРНИТУ, 2022. – Т. 2. – С. 93–98.

7. **Пыжьянов, Д. И.** Альтернативный способ подавления газовых гидратов при добыче газа / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Развитие современной науки: опыт теоретического и эмпирического анализа : сборник статей IV Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2023. – С. 178–182.
8. **Пыжьянов, Д. И.** Геоэкологическая оценка территории в зоне добычи газа на основе геохимических параметров почв / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Эколого-экономическая безопасность регионов. Ресурсный потенциал и оценка ущербов : сборник научных статей. – Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2024. – С. 63–71.
9. **Пыжьянов, Д. И.** Использование ГИС-технологий для геоэкологической оценки территории в зоне добычи газа / Д. И. Пыжьянов ; научный руководитель Г. И. Сарапулова // Актуальные проблемы эффективного использования полезных ископаемых и сохранения окружающей среды (Леоновские чтения – 2024) : материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск : ИРНИТУ, 2024. – С. 72–74.
10. **Пыжьянов, Д. И.** Геоэкологическая оценка природно-техногенных систем в зоне куста газовых скважин / Д. И. Пыжьянов ; научный руководитель Г. И. Сарапулова // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей LXX Международной научно-практической конференции. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2024. – С. 66–69.
11. **Пыжьянов, Д. И.** Кластеризация геохимических параметров почв в зоне газоконденсатного месторождения / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Ляпуновские чтения – 2024 : материалы 40-й Международной конференции. – Иркутск : ИДСТУ СО РАН, 2024. – С. 184.
12. **Пыжьянов, Д. И.** Цифровой алгоритм для оптимизации ингибирования гидратообразования при добыче газа / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Advances in Science and Technology : сборник статей LXVIII Международной научно-практической конференции. – Москва : Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2025. – С. 59–61.
13. **Пыжьянов, Д. И.** Оптимизация ингибирования гидратообразования при добыче газа на основе цифрового алгоритма / Д. И. Пыжьянов, Г. И. Сарапулова // Геонауки – 2025. Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований : материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Иркутск : ИРНИТУ, 2025. – С. 220–222.
14. **Пыжьянов, Д. И.** Разработка алгоритма техно-геохимического мониторинга при эксплуатации газоконденсатного месторождения и оценка геоэкологического состояния почв / Д. И. Пыжьянов // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность : тезисы докладов XIV Молодежной международной научно-практической конференции имени А. И. Гриценко. – Москва : Газпром ВНИИГАЗ, 2026. – С. 126.

Подписано в печать ___.___.2026. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Зак. 22 к
Отпечатано в типографии Издательства ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83