

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор химических наук,
профессор Сарапулова Г.И.

Иркутск 2026 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Современное состояние мониторинговых исследований территорий и горнотехнических условий в зоне активного горнопромышленного техногенеза (обзор)	12
1.1 Научные основы геотехнического мониторинга в горнодобывающей отрасли	12
1.1.1 Методология геотехнического мониторинга	12
1.1.2 Современные методы геотехнического мониторинга.....	14
1.1.3 Геотехнический мониторинг в газодобывающей отрасли.....	16
1.1.4 Причины отставания геохимического мониторинга	19
1.1.5 Геохимические исследования почв при газодобыче	24
1.1.6 Геохимические проявления тяжелых металлов при техногенезе	27
1.2 Геопространственная цифровизация и моделирование при газодобыче	29
1.2.1 Математическое моделирование	29
1.2.2 Использование ГИС-технологий.....	30
1.2.3 Цифровизация	32
Выводы по первой главе.....	34
ГЛАВА 2. Объекты и методы исследований горнопромышленного производства.....	36
2.1 Характеристика района исследований	36
2.1.1 Геолого-физическая и литолого-стратиграфическая характеристики газоконденсатного месторождения.....	38
2.1.2 Климат в зоне месторождения.....	39
2.1.3 Гидрология в зоне месторождения	40
2.1.4 Растительность и животный мир в зоне месторождения.....	41
2.1.5 Почвы в зоне месторождения	41
2.2 Характеристика промузлов при добыче газа на КГКМ.....	42
2.3 Потенциальные источники загрязнения при добыче газа на КГКМ.....	47
2.3.1 Источники воздействия на атмосферный воздух	47
2.3.2 Источники воздействия на поверхностные воды и геологическую среду	52
2.3.3 Источники воздействия на земельные ресурсы, растительный и животный мир.....	53
2.4 Методы исследования, используемые в работе.....	53
Выводы по второй главе	55
ГЛАВА 3. Оценка почв промплощадки на основе объектно-ориентированного техно- геохимического мониторинга	56
3.1 Анализ загрязнений в соответствии с иерархической структурой мониторинга	56

3.2 Формирование геохимических барьеров и кластеров	62
3.3 3D-моделирование взаимообусловленного распределения параметров.....	70
3.4 Эколого-экономическая оценка превышения нормативов As, Mn и Ni.....	73
Выводы по третьей главе.....	75
ГЛАВА 4. Геопространственная неоднородность распределения и миграция элементов в почвах КГКМ.....	77
4.1 Необходимость прогнозирования миграции элементов в почвах горнопромышленной природно-техногенной системы при добыче газа.....	77
4.2 Динамика интенсивности освоения месторождения и пространственная ГИС-оценка территории	79
Выводы по четвертой главе.....	82
ГЛАВА 5. Цифровая оптимизация расхода метанола в газоконденсатной скважине	83
5.1 Проблема гидратообразования при добыче газа	83
5.2 Цифровая трансформация газодобывающей отрасли.....	87
5.3 Разработка алгоритма цифровой оптимизации расхода метанола в рамках объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга	88
5.4 Термодинамическое и статистическое обоснование модели и роли попарных комбинаций параметров.....	94
5.5 Экономический расчет и рентабельность оптимизации расхода метанола.....	98
Выводы по пятой главе.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	105
Приложение 1. Литолого-стратиграфический разрез.....	123
Приложение 2. Справка о выполнении технического задания.....	124
Приложение 3. Геологический разрез месторождения по линии разведочных скважин	125
Приложение 4. Результаты анализов почв за 2025 год.....	126
Приложение 5. Результаты анализов почв за 2019–2023 годы.....	128

ВВЕДЕНИЕ

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 ($C_{\text{орг}}$) и общего азота ($N_{\text{общ}}$), определение валовых (кислоторастворимых) и подвижных (в ацетатно-аммонийной буферной вытяжке с pH 4,8) форм металлов и мышьяка методом атомно-эмиссионной спектроскопии 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 ИРНТУ, 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 ИРННТУ 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.

ГЛАВА 1. Современное состояние мониторинговых исследований территорий и горнотехнических условий в зоне активного горнопромышленного техногенеза (обзор)

1.1 Научные основы геотехнического мониторинга в горнодобывающей отрасли

1.1.1 Методология геотехнического мониторинга

Техногенез — это совокупность геохимических, геофизических и геологических процессов, вызванных производственной, инженерной и хозяйственной деятельностью человека и приводящих к трансформации природных ландшафтов, биосферы и литосферы. Он проявляется в изменении рельефа, загрязнении почв и пород, нарушении гидрологического режима и создании техногенных отложений, часто превышающих по интенсивности естественные геологические процессы [1]. Понятие «техногенез» ввели в науку выдающиеся геохимики — академики Вернадский В. И. и Ферсман А. Е. Большой вклад в развитие теории геохимического техногенеза внесли также Полынов Б. Б., Перельман А. И., Глазовская М. А., Глазовский Н. Ф., Касимов Н. С., Алексеенко В. А.

Горнопромышленный техногенез — это процесс глубокого изменения природной среды, рельефа, горных пород и подземных вод под влиянием добычи и переработки полезных ископаемых. Техногенез в горной отрасли — это также процесс изменения геологической среды, масштабное искусственное преобразование которой происходит при вмешательстве человека в земные недра. Горнопромышленный техногенез формируется в две стадии — активную и пассивную. Стадия активного техногенеза охватывает период разработки и масштабного освоения месторождения действующим горнодобывающим предприятием [2–4].

Горное производство считается одним из самых мощных факторов техногенеза на планете. При этом необходимо оценивать риск, представляющий собой вероятность неблагоприятных событий, приводящих к нарушению устойчивости сложившейся природно-технической геосистемы. Методология мониторинговых исследований геотехнических систем (ГТС) в горной отрасли — это целостная система оценки рисков и подходов, которые позволяют не только фиксировать текущее состояние, но и прогнозировать риски, чтобы вовремя принимать меры. Методология включает постановку цели и задач исследования, планирование системы наблюдений, выбор методов измерений и критериев оценки качества наблюдений, валидацию данных, ведение базы данных, использование аналитических инструментов, анализ и интерпретацию результатов, прогнозирование и принятие решений, моделирование процессов, экспертные оценки, а также комплексность, интеграцию и нормативное сопровождение [5].

Эффективный мониторинг активных горнотехнических объектов является обязательным компонентом системы обеспечения качества производственных решений и безопасности. Современные системы, нормирующие мониторинг горнотехнических объектов,

характеризуются хорошей проработанностью: это совокупность взаимосвязанных оценок и показателей, включающих оперативность и доступность, достоверность, надежность и достаточность информации [6–11].

Современные системы мониторинга горнотехнических систем и их методология отвечают ГОСТ 22.1.01-97/ГОСТ 22.1.01-05 «Мониторинг и прогнозирование. Общие положения», ГОСТ 22.1.02-97/ГОСТ 22.1.02-05 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Термины и определения», ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 «Менеджмент риска. Методы оценки риска», ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» (статус 2019 г.), СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве». Эти нормативы предусматривают использование развитой сети контрольных пунктов, получение количественных оценок, автоматизацию измерений и дистанционную передачу информации, применение современных компьютерных технологий для хранения и анализа информации и принятия управленческих решений и пр. Так, например, разработку подобной комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных осуществили авторы работы [12].

На территории Российской Федерации обеспечение безопасности критически важных объектов инфраструктуры, в частности техногенных, осуществляется в рамках Федерального закона от 26.07.2017 № 187-ФЗ. Анализ научно-технических материалов позволяет говорить о том, что в настоящий момент отсутствуют консолидированные подходы к проведению комплексного анализа состояния устойчивости техногенных объектов, а также инструменты, позволяющие интегрировать традиционные и современные методы геодезического и геотехнического мониторинга в единую систему.

Мониторинг состояния устойчивости техногенных объектов представляет собой критически важный аспект обеспечения безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций, вызванных горными и геологическими процессами. Сочетание разных методов мониторинга обеспечивает всестороннюю информацию о ходе деформационных процессов. Так, создана комплексная система геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных, апробированная на разрезе «Эдельвейс +» (Республика Казахстан) [12]. В ее основу положена поэтапная интеграция методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), спутниковой радарной интерферометрии, а также инструментальных методов — электронной тахеометрии и ГНСС-измерений. Этапы работ включают анализ архивных снимков для выявления зон смещений поверхности, аэрофотосъемку с беспилотных воздушных судов (БВС) для построения 3D-моделей деформируемых участков и развертывание системы геомеханического мониторинга на основе инструментальных наблюдений на критических

участках. Завершающий этап такого мониторинга — формирование и обновление базы геопространственных данных, обеспечивающей непрерывный контроль состояния объекта.

Геотехнический мониторинг направлен на создание геопространственной базы данных, в которой аккумулируется вся собранная информация. База данных постоянно обновляется, что позволяет поддерживать актуальность информации и оперативно реагировать на текущие изменения на месторождениях и промплощадках. Основой такой системы может являться циклически обновляемая 3D-модель, которая используется для разработки рекомендаций по повышению безопасности при эксплуатации техногенных объектов. Интеграция геопространственных данных обеспечивает оперативное выявление деформаций, их анализ и прогноз, что позволяет повысить безопасность эксплуатации техногенных объектов при добыче.

1.1.2 Современные методы геотехнического мониторинга

Статическое зондирование — метод полевого исследования грунтов, при котором металлический зонд плавно вдавливают в грунт с постоянной скоростью, измеряя его сопротивление. Метод позволяет отслеживать поровое давление в грунте, его объемный вес, а также прочность пород на сдвиг; замер геотехнических показателей происходит в толще грунта [13].

Сейсмостатическое зондирование используется для замера скорости распространения продольных и поперечных сейсмических волн, что помогает определить, в частности, трещиноватость породы. Это геофизический метод исследования внутренних слоев Земли с помощью искусственных или естественных упругих колебаний [13].

Системы скважинных инклинометров — измерительные системы для определения зенитного угла, азимута и пространственного положения оси скважины или смещений грунта. Применяются для контроля вертикальных и горизонтальных смещений грунта в теле дамб.

Дистанционное зондирование Земли включает сбор и анализ спутниковых снимков, которые позволяют определить зоны последствий техногенной трансформации природной среды на месторождениях нефти и газа [14]. Основные аспекты применения — выявление пространственных характеристик месторождений, определение причин крупных утечек нефти и газа, оценка площади леса, сведенного в ходе обустройства месторождений. Для беспилотных летательных аппаратов наиболее перспективно применение мультиспектральных и тепловизионных камер, лидаров, газоанализаторов.

Аэрофотосъемка — метод исследования земной поверхности с помощью фотоаппаратов, установленных на самолетах, вертолетах или дронах, для составления карт и поиска полезных ископаемых. Проводится с использованием беспилотных воздушных судов (БВС) для получения детализированных данных о смещениях в границах исследуемой зоны.

Геодезический мониторинг — система регулярных высокоточных измерений и наблюдений за изменениями положения зданий, сооружений или участков земли в пространстве. Включает измерение просадок, сдвигов и уклонов объектов.

Геофизические измерения — метод изучения строения, свойств и процессов Земли через замеры ее естественных и искусственных физических полей. Включают измерения сейсмоактивности и интенсивности электромагнитных полей.

Тензометрический анализ — метод экспериментального определения деформаций и механических напряжений в конструкциях, деталях машин и материалах под воздействием нагрузок. Он позволяет получить данные об уровнях напряжения в основаниях и несущих конструкциях. Для контроля свайных оснований применяются неразрушающие методы: длину сборных составных свай оценивают низкодеформационным методом контроля сплошности с вейвлет-анализом сигнала [15].

Можно указать также на новые методы геотехнического мониторинга, которые появились в последние годы.

Интеграция георадаров с искусственным интеллектом. Интеграция георадаров (GPR) с искусственным интеллектом (ИИ) совершает революцию в подповерхностном зондировании. Использование нейросетей позволяет автоматизировать сложный процесс расшифровки радарограмм, исключая человеческий фактор и ускоряя обработку данных в десятки раз. Эта технология обещает значительное улучшение точности и надежности систем мониторинга.

Система автоматизированного дистанционного геотехнического мониторинга основана на комплексировании спутниковых и наземных технологий наблюдений. Она включает такие методики контроля, как спутниковая радиолокационная интерферометрия, наземное лазерное сканирование и параметрический контроль с применением датчиков непрерывного действия. Это комплекс технического оборудования и программ для непрерывного слежения за состоянием зданий, сооружений и окружающего их грунта в режиме реального времени.

Технология малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR — Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar) — передовой метод радарной спутниковой интерферометрии, предназначенный для высокоточного мониторинга деформаций и смещений земной поверхности и инженерных сооружений во времени. Технология основана на обработке плотных временных серий радиолокационных изображений и позволяет преодолеть ограничения классических дифференциальных методов, связанные с потерей когерентности сигнала в условиях сложного рельефа или растительного покрова.

Использование беспилотных летательных аппаратов. Дроны применяют для мониторинга состояния бортов карьера и создания цифровых моделей местности [16]. В последние годы БПЛА, в том числе квадрокоптеры, октокоптеры, вертолеты и другие типы

дронов, становятся важным технологическим инструментом цифровизации горнодобывающей промышленности и геолого-разведочных работ [17].

Геологическое и геотехническое моделирование — процесс создания трехмерной модели горного массива, которая позволяет предсказать поведение горных пород и определить оптимальные методы и технологии добычи полезных ископаемых, то есть создание цифровой карты недр на основе данных бурения скважин и измерений.

В качестве примера можно привести работу [18], где описаны современные методы геотехнического мониторинга устойчивости откосных сооружений, применяемые при отработке месторождений в компании «Полюс Красноярск», и показаны общие принципы гидрогеологического обеспечения горных работ на карьерах Олимпиадинского горно-обогатительного комбината.

1.1.3 Геотехнический мониторинг в газодобывающей отрасли

Горнопромышленный техногенез в газовой отрасли — это процесс глубокого и масштабного изменения геологической среды, ландшафтов и экосистем, вызванный технической деятельностью человека при разведке, добыче, транспортировке и хранении природного газа. Бурение глубоких скважин нарушает изоляцию водоносных и газоносных горизонтов. Происходят перемешивание пластовых вод и миграция остаточного газа в вышележащие слои, а химические реагенты, используемые при бурении и интенсификации добычи (например, при гидроразрыве пласта), меняют химический состав недр; прилегающие территории загрязняются буровыми шламами и химреагентами. Месторождение перестает быть чисто природным объектом: формируется сложная система, где природные процессы изменены искусственными инженерными сооружениями (скважинами, подземными хранилищами газа) и утечками реагентов.

Рациональная эксплуатация месторождений углеводородов на современном уровне научно-технического развития, как отмечено в трудах Гриценко А. И., Зотова Г. А., Ремизова В. В., возможна исключительно в условиях получения, анализа и обобщения информации о состоянии природно-технических комплексов на всех этапах их эксплуатации. Эффективный мониторинг параметров технологических процессов добычи газа и территории является основой получения информации о состоянии систем.

Геотехнический мониторинг в газодобывающей отрасли — это система непрерывного контроля состояния грунтов, оснований и фундаментов объектов (трубопроводов, компрессорных станций) для предотвращения аварий при добыче газа. Особенно он важен в криолитозоне и районах Сибири для отслеживания просадок и состояния многолетнемерзлых пород. Мониторинг включает автоматизированные измерения, геодезические методы и

теплотехнические исследования для обеспечения безопасности скважин. Объекты контроля — скважины, магистральные газопроводы, КС, здания, сооружения, опасные участки; контролируются деформации и крены, трещины, осадки фундаментов, влияние вибраций. Проводится мониторинг температуры грунтов, состояния многолетнемерзлых пород и линейной эрозии с применением автоматизированных измерительных систем, дистанционной передачи данных и геодезической съемки. Мониторинг позволяет своевременно принимать меры по укреплению конструкций, обеспечивая их надежную эксплуатацию.

Однако при этом на современном этапе не разработан подход, который позволяет на единой методической основе проводить мониторинг параметров природной, технологической и технической среды и использовать всю совокупность полученных при наблюдении данных для оценки состояния системы в целом.

Процессы горнопромышленного техногенеза в районах добычи и переработки нефти и газа и влияние нефтегазового комплекса на компоненты окружающей среды рассмотрены в работах [19, 20]. Анализируются изменения геологической среды, почвенного покрова, поверхностных и подземных вод под влиянием антропогенных факторов, связанных с добычей и переработкой углеводородов. Выделяются основные источники техногенного воздействия, включая аварийные разливы нефти, утечки из трубопроводов, шламовые амбары и выбросы при переработке. В работах затрагиваются вопросы трансформации ландшафтов, загрязнения почв нефтепродуктами и тяжелыми металлами, а также изменения качества водных ресурсов.

Методическая основа комплексного мониторинга горнотехнических систем газодобычи, состав и обоснование блоков локального мониторинга и вектора состояния газодобывающей системы представлены в работах [21–29].

Региональные особенности инженерно-геологической оптимизации размещения инфраструктуры нефтегазовой отрасли и наблюдений в Астраханском Прикаспии проанализированы в публикации [30]. Показано, что в течение последних 30 лет с резким возрастанием освоения углеводородных месторождений на территории Астраханского Прикаспия сильно нарушено равновесие, сложившееся между геологической средой и инженерными сооружениями. Инженерно-геологическое районирование Прикаспия доведено авторами до локальных участков в пределах инженерно-геологических районов на основе фациально-генетических признаков зоны аэрации, что послужило основой районирования по степени пригодности для размещения наземных объектов нефтегазовой отрасли.

Геотехнический мониторинг на месторождениях ПАО «Газпром» в зоне многолетнемерзлых пород ведется на всех стадиях жизненного цикла и для сооружений всех классов ответственности. Проектные геотехнические решения для строительства газовых скважин в особо сложных мерзлотных условиях полуострова Ямал обоснованы в работе [31].

Созданы системы автоматизированных измерений и дистанционной передачи данных для геотехнического мониторинга объектов добычи газа ПАО «Газпром» на месторождениях Крайнего Севера [28]. Из-за сложности инженерно-геокриологических условий, удаленности месторождений и большого объема ручных измерений нужны решения по созданию технологии геотехнического мониторинга (ГТМ) с автоматизацией измерений и дистанционной передачей данных. В числе значимых методов контроля внедряются технологии спутниковой радарной интерферометрии, наземного лазерного сканирования и датчики параметрического контроля.

Авторский коллектив в работе [29] представил подход ПАО «НК «Роснефть»» к выбору объектов обустройства месторождений нефти и газа, расположенных в Арктической зоне Российской Федерации, для внедрения геотехнического мониторинга. Подчеркнута важность внедрения и практической реализации геотехнического мониторинга как ключевого набора мероприятий, гарантирующих безопасность эксплуатации производственных активов. Предложены решения для доработки нормативов по организации геотехнического мониторинга на уже существующих сооружениях, поскольку ранее для многих из них такие требования отсутствовали, особенно на фоне глобального потепления, влияющего на устойчивость мерзлых пород.

Классификация дочерних обществ ПАО «НК «Роснефть»» по уровню внедрения мониторинга способствовала стандартизации методов, повышению технических навыков, совершенствованию организационных подходов и культуры проведения работ. На основе созданной методики утвержден план развития геотехнического мониторинга в ПАО «НК «Роснефть»», предусматривающий определение критериев оценки, приоритизацию объектов, обзор существующего состояния мониторинга, учет сетей наблюдений, разработку расписаний работ, запуск программ на приоритетных участках, а также укрепление профессиональных компетенций и совершенствование внутренних нормативов [32].

В ходе геотехнического мониторинга, как правило, ведется наблюдение за температурой грунтов в основании зданий и сооружений, температурой воздуха в проветриваемом подполье, температурой окружающего воздуха и скоростью ветра, гидрогеологическим состоянием оснований, планово-высотным положением фундаментов. Проверяется работоспособность сезонно действующих охлаждающих устройств. Геотехнический мониторинг путем организации контроля температурного режима грунтов оснований и получения данных сети нивелировочных марок дает возможность обеспечить безопасность зданий и сооружений и снизить риски, связанные с производственной и хозяйственной деятельностью ООО «Газпром нефть-Ямал» [21].

В работе [33] выполнен анализ системы технической терморегуляции грунтов фундаментов в криолитозоне, рассмотрены ключевые аспекты исследований, расчетов,

проектирования, изготовления и строительства; технология геотехнического мониторинга в криолитозоне изложена в работе [34]. Влияние глобального потепления на термостабилизацию грунтов основания заглубленного трубопровода в условиях многолетнемерзлых грунтов изучено в работе [35]. Система мониторинга температур протяженных объектов в многолетнемерзлых грунтах разработана исследователями в работе [36]. Корректность постановки и решения теплотехнических задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах показана в статье [37]. Воздействие мерзлых грунтов на опоры надземных магистральных трубопроводов рассмотрено в работе [38]. Примером организации геотехнического мониторинга может служить также работа [21], посвященная геотехническому мониторингу как основе безопасной эксплуатации объектов нефтегазодобычи в условиях криолитозоны.

Разработку комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных осуществили авторы работы [12]. Мониторинг состояния устойчивости техногенных объектов представляет собой критически важный аспект обеспечения безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций, вызванных горными и геологическими процессами.

1.1.4 Причины отставания геохимического мониторинга

В глобальном масштабе проблема техногенного воздействия добывающих отраслей является одной из наиболее острых, поскольку ее последствия носят кумулятивный и долгосрочный характер, а пространственные масштабы выходят далеко за пределы горнопромышленных районов [39, 40]. Нарушение равновесных состояний геосферы под влиянием техногенеза проявляется в перераспределении химических элементов по новым геохимическим ореолам и сопровождается изменением неучитываемых геохимических параметров. Эти процессы ставят перед наукой и практикой задачу поиска эффективных методов изучения и диагностики, приемов оценки, минимизации и прогнозирования негативных последствий эксплуатации месторождений полезных ископаемых с использованием фундаментальных характеристик геохимической природы [41].

Геохимический мониторинг — это система регулярных наблюдений, оценки и прогноза состояния геологической среды (литосферы) и сопутствующих природных компонентов, измененных под влиянием антропогенных и техногенных факторов. Он включает контроль химического состава, свойств и динамики почв, состава грунтовых вод и горных пород для выявления негативных изменений и причин формирования геоэкологических рисков.

В работе [42] приводятся формулы для расчета геоэкологического риска каждого технологического процесса в результате горнотехнической деятельности и предложена система

управления геоэкологическими рисками. Так, геоэкологический риск при ведении горных работ рассчитывается по формуле $R_{\text{geo}} = R_{\text{п}} + R_{\text{ат}} + R_{\text{вб}}$, где $R_{\text{п}}$ — риск отчуждения и деградации почвы; $R_{\text{ат}}$ — риск загрязнения атмосферного воздуха; $R_{\text{вб}}$ — риск загрязнения и истощения водного бассейна. При этом можно использовать также картирование для качественного анализа уровня риска с выделением зон максимального поражения объектов окружающей среды негативными процессами, спровоцированными горными работами, с привлечением параметров их состояния. Разработанная методика оценки рисков позволяет в дальнейшем прогнозировать развитие нештатных ситуаций, создавать систему мониторинга и формировать защитные меры. Риск-анализ тесно связан с информационными методами управления, такими как геоинформационное картографирование, что позволяет подобрать подходящие меры по стабилизации экологической ситуации в районе ведения горных работ [43, 44].

Стратегия пространственного развития страны с учетом добычи полезных ископаемых утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации [45]. Экологическим исследованиям и экодиагностике в природопользовании посвящено достаточное количество работ [46, 47]. Например, в работе [48] представлены результаты исследования геохимических процессов техногенеза в районах разработки месторождений полезных ископаемых, сопровождающихся формированием ореолов загрязнения в атмосфере, литосфере и гидросфере. Авторами проведены полевые и лабораторные исследования в промышленных районах России с интенсивным воздействием добывающих и перерабатывающих предприятий, включающие анализ атмосферных выбросов, почвенно-грунтовых комплексов, поверхностных и подземных вод, донных осадков и техногенных образований. При этом использовано также численное моделирование миграции тяжелых металлов и органических соединений в природных средах. Получены данные о значительном превышении предельно допустимых концентраций меди, цинка, свинца, кадмия и других элементов, а также об изменении кислотно-щелочного баланса и деградации почвенного покрова. Выявлены пространственно-временные закономерности техногенной миграции элементов и подтверждена сопоставимость полученных результатов с данными зарубежных исследований. Сделан вывод о необходимости комплексного геохимического подхода при оценке экологической безопасности горнодобывающей деятельности и разработке стратегий минимизации ее негативных последствий.

Геохимические методы исследований нацелены на выявление современной структуры загрязнения компонентов природных комплексов, оценку и контроль экологического состояния территорий, подвергающихся техногенному прессингу, и прогнозирование развития экологической ситуации. Методология и методика почвенных и ландшафтно-геохимических исследований описаны в работах Глазовской М. А. [49].

Литогеохимическое опробование заключается в отборе проб почв по регулярной сети пробоотбора. Лабораторные аналитические методы и приемы интерпретации включают:

- рентгенофлуоресцентный анализ (XRF);
- атомно-абсорбционную спектрометрию (AAS);
- оптическую эмиссионную спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES);
- спектральный анализ (приближенно-количественный);
- геохимическое картирование — построение карт распределения элементов для выделения аномалий;
- изучение геохимических барьеров;
- анализ зон концентрации элементов;
- биогеохимический метод — анализ зольного остатка растений, выросших на почве, для определения содержания элементов.

Основные этапы геохимического мониторинга:

- полевой этап — опробование почвенных горизонтов (обычно А или В);
- лабораторный этап — пробоподготовка (сушка, истирание) и анализы;
- камеральный этап — статистическая обработка, сравнение с фоном и ОДК/ПДК, картирование.

Общая структура эколого-геохимических работ включает следующие этапы:

- выявление зон загрязнения компонентов окружающей среды токсикантами с оценкой степени и состава загрязнения;
- определение источников загрязнения;
- поиск площадей потенциальных техногенных «месторождений»;
- оценку геохимической эндемичности;
- районирование территории по уровням загрязнения и экологической опасности;
- проведение геохимического мониторинга с прогнозом негативных процессов;
- разработку мер по восстановлению экологически неблагополучных территорий.

Комплекс аналитических методов обеспечивает точную оценку распределения химических элементов и соединений в компонентах среды, а также уровня техногенного воздействия. Для эколого-геохимической оценки загрязнения применяют коэффициент концентрации $K_c = C_i/C_{\phi}$, где C_i — содержание химического элемента; C_{ϕ} — фоновое содержание элемента.

Суммарный показатель загрязнения (СПЗ, Z_c) рассчитывается как сумма превышений коэффициентов концентрации над единичным (фоновым) уровнем: $Z_c = \sum K_{ci} - (n - 1)$, где n — число аномальных элементов; $K_{c1}, \dots, K_{ci}$ — коэффициенты концентрации элементов. Степень загрязнения почв оценивается по величине Z_c .

Однако геохимическая оценка добывающих регионов в настоящее время развита не так, как геотехнический мониторинг.

Геохимический мониторинг требует четкого комплексного учета расположения производственных объектов, анализа источников их воздействия на среду и масштабов распространения поступающих загрязнителей, проведения кропотливых аналитических работ и наличия необходимого современного оборудования. При этом необходимо учитывать также природно-климатические условия и естественные геохимические барьеры как ограничители миграции элементов на территории промплощадок и за их пределами.

Снижение эколого-геохимических угроз достигается путем выявления и установления причинно-следственных механизмов их появления. Это предполагает также изучение динамики пространственно-временных изменений на месторождениях, трансформации ландшафтов, этапов процессов и организацию самого геохимического мониторинга. Как правило, комплексные геохимические исследования предполагают объединение разнообразных методов и методик для анализа функционирования техногенно измененных ландшафтов в горной отрасли, поиска путей их улучшения, создания сценариев развития ситуации и разработки мер оптимизации (мультидисциплинарный подход). В этом смысле геохимический метод помогает раскрывать циклы и распределение элементов в нарушенной среде в зоне горного производства.

В настоящее время геохимические методы активно внедряются в мониторинговые исследования в газодобывающей отрасли, однако они применяются значительно медленнее, чем в нефтяной индустрии или в классической геофизике.

Существует несколько ключевых технологических, физических и экономических причин, по которым геохимический мониторинг в газовой сфере долгое время оставался на вторых ролях.

Физическая природа газа — высокая мобильность состояния и показателей. В отличие от нефти, природный газ (в основном метан) обладает колоссальной текучестью и летучестью.

Проблема интерпретации. Если в нефтяной геохимии маркеры (тяжелые углеводороды, биомаркеры) стабильно показывают «отпечатки пальцев» конкретного пласта, то легкий газ быстро мигрирует через микротрещины и породы [50]. На базе Санкт-Петербургского университета реализована ИТ-платформа «Геобазис», которая объединяет цифровые инструменты анализа химических и геохимических данных и позволяет контролировать выработку запасов при совместной разработке нескольких нефтегазоносных объектов, проводить биомаркерный анализ и многое другое [50].

Ложные аномалии. Газовые проявления на поверхности или в верхних горизонтах часто размыты во времени и пространстве. Сложно определить, является ли обнаруженный метан утечкой из целевого эксплуатируемого пласта, продуктом жизнедеятельности бактерий (биогазом) или газом из промежуточных горизонтов.

Доминирование геофизических методов. Газовая отрасль полагается на сейсморазведку (2D/3D/4D) и геотехнический мониторинг. Газовые залежи из-за низкой плотности газа по сравнению с водой обнаруживаются на сейсмических профилях («яркие пятна»). Газовой отрасли продолжительное время была необходима высокоточная геофизика, чтобы контролировать контуры месторождения и движение флюидов без проведения сложного химического анализа [51].

Экономический фактор. Подрядным организациям и крупным институтам выгоднее осваивать бюджет на сейсморазведку и бурение, чем продвигать методы геохимии. При этом геохимия продолжительное время оставалась слишком дорогой.

Сложность долгосрочного мониторинга. Под мониторингом подразумевается постоянное наблюдение параметров. Чтобы геохимический мониторинг работал высокоэффективно, требуются:

- сеть наблюдательных скважин;
- хроматографическое и масс-спектрометрическое оборудование.

Однако сейчас ситуация сдвинулась с мертвой точки. Геохимический мониторинг начинает активно внедряться преимущественно по двум причинам:

- *развитие ПХГ (подземных хранилищ газа):* при эксплуатации ПХГ критически важно знать, не нарушена ли герметичность покрышки и не уходит ли газ в верхние горизонты, поэтому методы «газовой томографии» и геохимии стали здесь обязательными;
- *цифровизация и трассерный мониторинг:* на многопластовых месторождениях начинают применять индикаторы-маркеры (трассеры), которые закачивают в пласт для отслеживания путей движения газа и зон обводнения, распространения химических реагентов и загрязнителей.

Так, наглядным примером геохимического мониторинга может служить обследование территории для оценки газогеохимического состояния и степени опасности почв и грунтов территорий проектируемого строительства на Сахалине [52]. Обследования проводили для выявления утечек углеводородов из хранилищ и трубопроводов, оценки способности массива генерировать биогаз на участках размещения бытовых отходов, поиска захороненных свалок. На Ковыктинском месторождении до расширения промысла выполнены газогидродинамический контроль залежи [53] и поисковая газогеохимическая съемка [54], а контроль почв ограничивался валовыми содержаниями элементов.

Виды газогеохимического обследования территории:

- газогеохимическая эмиссионная съемка (исследование качества приземного атмосферного воздуха);

- газогеохимическая шпуровая съемка (отбор воздуха непосредственно из верхнего слоя грунта);
- скважинные исследования (анализ проб воздуха из скважин на наличие газовых скоплений);
- лабораторный анализ воздуха (определение процентного содержания газовых компонентов);
- лабораторный геохимический анализ грунта.

АО «СахалинТИСИЗ» выполняет полный цикл инженерных изысканий, главная цель которых — изучение основных геологических характеристик территории, а именно особенностей грунта, подземных вод, рельефа. Полученные материалы позволяют специалистам прогнозировать вероятные изменения геологической среды, способные привести к повреждению или разрушению объекта. Организация проводит также геохимические исследования грунтов, почв и воды — комплекс работ, выполняемых с целью получения данных об их количественном химическом составе.

В настоящее время ведутся исследования в области экологически безопасной добычи газа, энергосбережения, снижения выбросов и внедрения наилучших доступных технологий. Например, теплоизолированные лифтовые трубы и современная трубопроводная арматура отечественного производства повышают надежность скважинного оборудования и снижают риск утечек газа [55]. Добыча газа может быть экологически управляемой, если соблюдаются три условия: грамотный выбор технологий, постоянный мониторинг систем и профилактика аварий, а также экологическая дисциплина компании, при которой природоохранные требования встроены в производственную модель [56].

Применение геохимических методов исследований при поисках, разведке и разработке месторождений углеводородов рассмотрено в работе [57]. Роль геохимических методов в прогнозе нефтеносности и оценке ресурсного потенциала черносланцевых толщ (на примере баженовской свиты) изучена авторами [58].

1.1.5 Геохимические исследования почв при газодобыче

Исследованию воздействия объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологической стабильности геотехнических комплексов в криолитозоне посвящена работа [59].

Геоэкологическим аспектам освоения нефтегазовых месторождений в горных и предгорных районах и техногенной трансформации природно-антропогенной среды горного региона при длительном воздействии нефтяного комплекса посвящена работа [60]. Автором разработаны методологические подходы геоэкологического анализа трансформации природно-антропогенной среды горного региона на примере Чеченской Республики. Проведены

комплексный экологический анализ территории и ландшафтов, ретроспективный анализ динамики природопользования, ландшафтное и ландшафтно-геохимическое картографирование, полевые геохимические исследования и химико-аналитическая обработка собранного материала, привлечены геоинформационные и аэрокосмические методы исследования. Установлена сопряженность динамики компонентов ландшафтов с развитием нефтяного комплекса на протяжении длительного времени, выраженная в глубокой трансформации ландшафтов и их компонентов при очаговом и линейно-очаговом размещении объектов нефтегазового комплекса.

Геохимическим аспектам промышленного освоения нефтегазовых месторождений арктических территорий Республики Коми посвящена работа [61]. В ней рассмотрены источники загрязнения и роль теплового, механического и химического факторов. Показано, что весьма существенными являются последствия разливов и утечек нефтепродуктов из местных трубопроводов и негерметичных буровых скважин, а также последствия техногенного воздействия на многолетнемерзлые породы.

Экологическим аспектам освоения месторождений нефти и газа посвящен ряд работ, где рассматривается широкий круг проблем, включающий мониторинг и оценку воздействия на различные составляющие окружающей среды, рациональное использование попутных компонентов, рекультивацию нарушенных земель и др. [62–64].

Негативное воздействие на окружающую среду проявляется на всех этапах и стадиях промышленного освоения территорий и месторождений: при бурении поисковых и разведочных скважин, строительстве эксплуатационных скважин, нефтепроводов и газопроводов. В частности, указывается, что давно назрела необходимость обновления трубопроводной инфраструктуры при добыче углеводородов с применением новейших достижений в сфере защиты поверхностей труб. Особое внимание следует уделять контролю за ликвидацией негерметичных буровых скважин, состоянием многолетнемерзлых пород, оборудованию специальных площадок наблюдения.

Научно-методические основы геоэкологических и геохимических исследований нефтегазоносных регионов, в том числе с применением дистанционных методов, развиваются в ряде диссертационных работ. Так, оценка геоэкологических условий нефтегазодобычи Надым-Пурской и Пур-Тазовской нефтегазоносных провинций выполнена в работе [65]. Геоэкологические и геохимические аспекты природно-технических систем на примере газоконденсатных месторождений Южного Приуралья представлены в исследовании [66]. Пути решения геоэкологических проблем при добыче газа в Западной Сибири предложены в работе [67]. В статье [68] описана методика проведения локального экологического мониторинга на территории нефтегазодобывающего региона, а также представлены итоги обследований ключевых природных компонентов — геохимии почвенного покрова, поверхностных водоемов,

атмосферного воздуха и геологической среды. По результатам анализа авторы подчеркивают важность систематических наблюдений на фиксированных мониторинговых участках для своевременного выявления возможных негативных техногенных эффектов.

Интегральной оценке экологического состояния почвенного покрова при добыче газа в Среднем Приангарье посвящены работы иркутских исследователей в соавторстве с учеными Бурятского государственного университета [69–72]. Исследования включают, в том числе, балльную оценку гидрогенной трансформации почв и матричные методы анализа, оценку почвенного покрова, разработку шкал для оценки степени деградации почв под влиянием промышленного освоения территории при добыче газа.

В ряде работ показано, что разведка и эксплуатация газовых месторождений сопровождаются спектром геоэкологических проблем: выбросами газов в атмосферу при сжигании попутного газа, водозабором, образованием и утилизацией отходов, сбросами загрязненной воды в поверхностные водоемы, разливами нефти, механическими нарушениями и химическим загрязнением почв и грунтов [73–75]. Несмотря на развитие экологического менеджмента в нефтегазовой отрасли, актуальной проблемой является необходимость создания методик оценки экологической составляющей мониторинга. Нефтегазовые компании занимают лидирующие позиции по объему вложений в охрану окружающей среды: в 2017 году они направили на эти цели свыше 54 млрд руб., что составило 35 % от общероссийских инвестиций в объекты экологической защиты. Анализ экологических проблем нефтегазовой отрасли и обоснование актуальности эколого-экономического моделирования процессов, возникающих при нефтегазодобыче (на примере объектов НГК Ямало-Ненецкого автономного округа), проведены в работах [76, 77]. Авторы оценили динамику экологического менеджмента на предприятиях отрасли, ключевые геоэкологические риски при добыче углеводородов в арктических условиях ЯНАО, а также возможности применения моделирования для повышения эффективности развития регионального нефтегазового сектора.

Вопросы гармонизации биологических и геохимических результатов исследований при мониторинге воздействия нефтегазодобычи на объекты окружающей среды обсуждены авторами [78]. Предлагаются варианты использования ГИС как универсального средства сбора, обработки и представления информации об экологической обстановке на месторождениях для экологического анализа, картографирования природных ресурсов и оценки состояния территорий [79]. Значительный вклад в совершенствование методик геоэкологической и геохимической оценки влияния нефтегазодобычи внес Соромотин А. В. [80]. Исследование описывает целостную пространственно-временную систему с иерархической организацией. Особое внимание уделено экологическим последствиям разных этапов разработки месторождений, которые относят к наиболее опасным для окружающей среды отраслям.

Московченко Д. В. (2009) разработал метод прогнозирования состояния геосистем в нефтегазодобывающих районах на основе анализа эколого-геохимических вызовов [81]. Предложен комплексный подход к решению региональных эколого-геохимических проблем с акцентом на картографо-информационное обеспечение и экодиагностику. Автор уделяет особое внимание оценке воздействия нефтегазового комплекса на природные среды, включая биогеохимические изменения. Исследование множественных форм техногенных геохимических изменений почв на разных этапах нефтегазодобычи привело к заключению о перестройке миграционных потоков. Эти потоки изменяют практически все элементы ландшафта, формируя особый тип пространственной системы в зоне промышленного влияния.

Геоэкологическое и геохимическое исследование влияния предприятий нефтегазового комплекса на природную среду Воронежской области проведено в работе [82]. Оценка воздействия на окружающую среду при разработке нефтяных и газовых месторождений ОАО «Оренбургнефть» выполнена в работе [83]. Следует отметить исследования геохимических процессов (перемещения и концентрации элементов), связанных с эксплуатацией месторождений полезных ископаемых, в которых показано формирование обширных атмо-, лито- и гидрохимических ореолов в зоне горнопромышленного техногенеза [84].

1.1.6 Геохимические проявления тяжелых металлов при техногенезе

Горнодобывающая промышленность оказывает на компоненты ландшафта разностороннее воздействие, одним из аспектов которого является привнесение в природные территориальные комплексы химических элементов. Большинство этих элементов относятся к группе тяжелых металлов, которые по ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 определяются как металлы с атомной массой свыше 50. Наличие твердых форм ТМ (кроме Hg) в зоне гипергенеза препятствует их испарению, что приводит к аккумуляции в почвах (их высокому содержанию) или повышенной мобильности, а также к сдвигу радиального и латерального распределения внутри фации или между соседними фациями при техногенном загрязнении [85]. В настоящее время эколого-геохимические исследования в условиях техногенеза базируются в основном на изучении распределения валовых содержаний элементов.

Проблема исследования форм нахождения токсичных элементов в почвах, затронутых техногенным загрязнением, остается недостаточно изученной. Выявление особенностей миграции и аккумуляции тяжелых металлов в природно-территориальных комплексах и техногенных геохимических аномалий, изучение радиальной и латеральной миграции ТМ, а также их трансформации в условиях техногенного стресса являются актуальной задачей эколого-геохимических исследований [86].

Отличительной особенностью формирования геохимического состава территорий вблизи промышленных предприятий является постоянный принос высоких концентраций металлов с техногенными потоками, поступающими за более короткие сроки по сравнению с участками естественно сформированного высокого геохимического фона [87]. Для валовых содержаний тяжелых металлов в верхнем слое почвы (0–15 см) выявлено, что формирование аномальных зон с высокими концентрациями тяжелых металлов в большей степени связано с действием различного рода экзогенных процессов наряду с обильно поступающими техногенными потоками комбината. Так, под действием миграции может происходить массоперенос соединений тяжелых металлов из верхних почвенных горизонтов в иллювиальные.

Особенности горнопромышленного техногенеза — это образование стойких геохимических аномалий и высокий коэффициент концентрации тяжелых металлов в почвах [88–90]. Эколого-геохимическая оценка загрязнения территорий тяжелыми металлами выполнена в ряде работ [91–93], а токсичность тяжелых металлов и биологические способы ремедиации загрязненных почв рассмотрены в работах [94–96].

Геохимические проявления тяжелых металлов (ТМ) в почвах в зоне влияния газоконденсатных месторождений (ГКМ) носят полиэлементный техногенный характер и напрямую связаны со спецификой добычи, подготовки и транспорта газа и конденсата. В отличие от классического горнорудного техногенеза, здесь металлы поступают в почву в составе сложных углеводородных смесей, пластовых вод и факельных выбросов.

Формы нахождения металлов в почве — подвижные (обменно-адсорбированные и водорастворимые соединения, которые легко переходят в растения и водные источники) и прочносвязанные (комплексы), входящие в состав минералов или зафиксированные органическим веществом (гумусом) либо оксидами железа и марганца. В работе [90] изучено влияние техногенеза на экологическое состояние мерзлотных почв на примере Нюрбинского ГОКа. Многие микроэлементы осаждаются в виде гидроксидов в пределах рН-преципитации, накапливаясь в почве и создавая потенциальные риски. Даже при незначительном сдвиге рН в кислую сторону значительная часть этих элементов переходит из инертных форм в мобильные, кислоторастворимые, что несет угрозу для смежных экосистем.

Загрязнение тяжелыми металлами создает серьезную опасность для биосферы в целом. Тяжелые металлы являются вторыми (после пестицидов) по степени опасности загрязнителями наземных экосистем, значительно опережая диоксиды углерода и серы. Масштаб загрязнения почв тяжелыми металлами рассмотрен в работе [97]. В ряде работ изучено распределение ТМ по разрезу в грунтах и построена феноменологическая математическая модель миграции ТМ в различных типах грунтов. В условиях техногенеза многие химические элементы качественно меняют естественные геохимические формы миграции на более подвижные, легко растворимые

и доступные для растений. В почвах нередко обнаруживаются тяжелые металлы с высокой биотоксичностью, включая ртуть (Hg), кадмий (Cd), свинец (Pb), хром (Cr), мышьяк (As) и другие элементы. Кроме того, загрязнителями выступают такие металлы, как цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), олово (Sn), ванадий (V). Загрязнение почв тяжелыми металлами в зонах техногенеза (промзоны, добыча полезных ископаемых, транспортные магистрали) является критической экологической проблемой, ведущей к деградации почв. Тяжелые металлы устойчивы, накапливаются, нарушают почвенную биоту и попадают в грунтовые воды. Это служит основой для практических рекомендаций по управлению природными ресурсами на территориях, где нагрузка на экосистемы в условиях техногенеза превышает допустимый предел. Однако следует учитывать, что горнопромышленный техногенез кардинально меняет физико-химическую среду почв, что определяет специфическую миграцию металлов [98].

1.2 Геопространственная цифровизация и моделирование при газодобыче

1.2.1 Математическое моделирование

Моделирование в газовой отрасли — это создание компьютерных, математических и 3D-моделей месторождений, трубопроводных сетей и производственных процессов для оптимизации добычи, транспортировки, переработки и хранения газа. Это позволяет прогнозировать поведение пластов и анализировать эффективность скважин, а также планировать работу инфраструктуры. Основные направления моделирования в газовой отрасли:

- геологическое и гидродинамическое моделирование;
- моделирование добычи и транспортировки;
- технологическое моделирование;
- управление цепочками поставок.

Использование моделей позволяет снизить риски, минимизировать простои оборудования и повысить экономическую эффективность производства [99]. Моделирование в газовой отрасли — это создание цифровых двойников месторождений, скважин и инфраструктуры для прогнозирования добычи, оптимизации работы компрессорных станций и управления разработкой на основе геофизических данных.

Существующие модели градиента опираются на термодинамику. Такие вычисления позволяют моделировать изменения давления, состава флюида и положение газонефтяного контакта по вертикали. Алгоритм демонстрирует влияние жидких углеводородов (ЖУВ) на градиент газоконденсатной смеси: их наличие повышает уровень контакта и может менять его тип.

Также активно развивающимся направлением стало создание моделей геохимических потоков и распространения загрязняющих веществ в зоне промплощадок. Так, в исследованиях

[100] были предложены численные модели миграции тяжелых металлов и органических соединений в почвенно-грунтовых массивах. Полученные результаты показали, что миграция загрязняющих веществ во многом определяется минералогическим составом вмещающих пород, кислотно-щелочным балансом и гидродинамическими условиями. Моделирование позволило прогнозировать зону вторичного загрязнения подземных вод и выделить наиболее уязвимые участки ландшафта. Однако слабым местом данного подхода являются необходимость точного знания исходных параметров среды, высокая чувствительность к неопределенности исходных данных и необходимость регулярной верификации моделей натурными измерениями.

Исследование [101] посвящено моделированию режимов работы тягового электрооборудования горнопромышленного транспорта; созданы математические модели, описывающие работу электропривода, тяговых двигателей и преобразователей в динамических режимах. Разработке методологии планирования эксперимента по изучению параметров мельниц на горно-обогатительном комбинате посвящена работа [102]. Эколого-математические исследования техногенно-природных геосистем проведены авторами [100]. Трехмерное моделирование солянокупольных структур по данным детального бурения в Прикаспии предприняли авторы [103]. Модельное представление антропогенно модифицированных недр как нового объекта в литосфере разработано в статье [104].

Методы прокси-моделирования технологических комплексов газовых месторождений и ПХГ основываются на рациональном сочетании упрощенных (приближенных по описанию процессов, низкомерных, укрупненных) гидродинамических моделей, в которых учитываются наиболее существенные свойства составных частей таких комплексов (водоносных пластов, естественных и искусственных газовых залежей, эксплуатационных скважин, объектов внутрипромыслового транспорта и компримирования газа), а также главные особенности происходящих в них процессов [105]. Показано, что детерминированные прокси-модели скважин, трубопроводов и компрессорной станции могут быть заменены эквивалентными адаптивными нейросетевыми моделями. Разработан адаптивный алгоритм интегрированного гидродинамического прокси-моделирования движения газа в системе «пласт — скважины — объекты внутрипромыслового транспорта и компримирования», в основе которого лежит использование искусственных нейронных сетей.

1.2.2 Использование ГИС-технологий

В конце XX века на рынке высоких технологий возник новый тип информационных систем — геоинформационные системы (ГИС). Для эффективного осуществления мониторинга весьма актуальна проблема сбора, обработки и анализа информации на основе геоинформационных технологий. В настоящее время ГИС являются наиболее развивающимися

и перспективными информационными системами для управления и ведения мониторинга. Удобные методы визуализации данных с пространственной привязкой все больше привлекают пользователей в горной отрасли [106].

Широкие возможности современных геоинформационных технологий в получении нового знания о пространственных и временных свойствах природных объектов предопределили их повсеместное применение для решения различных научно-исследовательских и прикладных задач в горной отрасли. Высокий спрос наблюдается на технологии геоинформационных систем при проведении эколого-геохимической оценки территорий. Так, в ходе эколого-геохимических исследований горных территорий ГИС позволяет объединить полученные данные на основе пространственной привязки к территории и представляет собой многофункциональный инструмент комплексной оценки природной среды, в том числе ее изменений, обусловленных техногенным воздействием горной промышленности. Прежде всего эти изменения связаны с концентрацией и рассеиванием химических элементов в атмосфере, гидросфере, литосфере, почвенном и растительном покровах [107]. Геоинформационные системы в газовой добыче используются для анализа пространственных данных, оптимизации инфраструктуры, разведки месторождений и мониторинга активов. Они объединяют данные геологии, карт и полевых измерений в единую цифровую среду, обеспечивая безопасность и эффективность на всех этапах жизненного цикла месторождений.

Большинство компаний газодобывающей отрасли являются пользователями ArcGIS. Геоинформационные системы ArcGIS доказали свою эффективность при проведении дорогостоящих исследовательских и буровых работ при поисках нефти и газа, для управления производственными активами, оптимизации размещения объектов инфраструктуры и обеспечения деятельности нефтяной компании, решения сложных вопросов ведения корпоративных баз данных о правах собственности, аренде и других имущественных отношениях [108, 109].

ГИС является мастер-системой, ядром для объединения всех геопропространственных данных о деятельности газодобывающего предприятия в рамках единой универсальной платформы. ГИС помогает нефтегазовым и трубопроводным компаниям обеспечить наглядную визуализацию необходимой информации на интеллектуальных электронных картах, решать сложные многофакторные проблемы разведки и освоения месторождений, строительства и содержания трубопроводов, компрессорных и газораспределительных станций на протяжении всего их жизненного цикла, повысить эффективность работы и конкурентоспособность, улучшить процесс принятия решений [110].

1.2.3 Цифровизация

В условиях стремительного развития цифровых технологий и усиления требований к энергоэффективности и конкурентоспособности промышленных предприятий топливно-энергетический (ТЭК) и минерально-сырьевой (МСК) комплексы переживают большие изменения. Цифровая трансформация выступает важным драйвером роста эффективности, надежности и устойчивости производственных операций, а также ключевым компонентом стратегий технологической независимости и обновления систем [111]. Цифровая трансформация является одним из мировых трендов, охвативших большинство отраслей экономики и промышленности. Для нефтегазовых компаний внедрение цифровых технологий стало не просто тенденцией, а одним из факторов обеспечения конкурентоспособности и удержания устойчивых позиций на рынке в стремительно меняющихся условиях макроокружения.

Современные методы управления техникой и производственными цепочками опираются на машинное обучение, анализ больших данных, цифровое моделирование и виртуальные двойники, что способствует оптимизации процессов и созданию инновационных структур управления — от локальных платформ до масштабных промышленных экосистем [112, 113]. Цифровизация горной отрасли — это внедрение сквозных цифровых технологий (IoT, ИИ, Big Data, робототехника) для оптимизации производства и повышения безопасности. Она снижает общие затраты на 10–15 % и увеличивает производительность на 5–15 % за счет внедрения систем удаленного управления и автоматизации процессов. Ключевые направления цифровизации:

- безопасность и мониторинг;
- автономная техника (роботизированные буровые установки, дистанционно управляемые погрузчики);
- оптимизация процессов (мониторинг технического состояния оборудования в реальном времени, автоматизированные системы управления горными работами);
- цифровое моделирование месторождений и горных работ, в том числе прогноз параметров развала взорванной горной массы [114], использование ИИ для повышения точности прогнозирования.

Так, работа авторов [115] посвящена концептуальной формализации целей, задач и критериев управления цифровой трансформацией горнодобывающих предприятий. Для определения способов построения и механизмов функционирования подобного рода систем установлена необходимость формирования модели архитектуры предприятия, как обеспечивающей полноту и непротиворечивость закладываемых в нее знаний, так и предоставляющей инструментальную вычислительную основу для самоорганизации и саморегуляции системы. По результатам работ сформирована базовая онтологическая модель

архитектуры горнодобывающего предприятия на базе языка дескрипционной логики OWL в среде Protégé, применимая для геопространственных природно-технических промышленных систем с открытым типом производственных сред. Полученная модель протестирована с использованием механизма логического вывода HermiT и подтвердила свою когерентность и консистентность, что говорит о потенциальной корректности исходных гипотез исследования и о возможности дальнейших исследований по формированию методологии цифровой трансформации горнодобывающих предприятий.

Однако горнодобывающая отрасль заметно отстает в процессах цифровизации по ряду объективных причин, о которых рассказали эксперты рынка в беседе с TAdviser летом 2025 года [116]. Согласно данным совместного исследования Минцифры и ВШЭ за 2023 год, добывающие предприятия получили всего 1,7 % всех инвестиций в цифровую экономику России, тогда как ИКТ-сектор — 36,7 %, а финансовый сектор — 18,9 %. Кроме того, цифровые платформы к тому времени внедрили лишь 11,6 % компаний этой отрасли в России — один из самых низких показателей среди всех секторов.

Ухудшение условий добычи, рост затрат на логистику и обслуживание, кадровый дефицит и ужесточение ESG-требований подталкивают компании к внедрению цифровых решений. Сегодня от того, насколько эффективно компания управляет своими активами, зависит не только ее прибыль, но и способность адаптироваться к требованиям времени.

«Живые» цифровые двойники, объединяющие ИИ, данные датчиков в режиме реального времени и другие технологии, предоставляют динамические обновления данных о поведении оборудования и участка. Эти системы автоматически подстраиваются под изменения в реальном времени и повышают точность прогноза добычи. ПАО «Газпром нефть» запустило цифровую систему инженерных изысканий, сокращающую время анализа в 200 раз и ускоряющую передачу данных в 10 раз. Система обеспечивает инженерам мгновенный доступ к данным и аналитическим инструментам, что повышает точность проектирования и ускоряет запуск добычных проектов.

ПАО «Газпром нефть» совместно с Университетом Иннополис и компанией Nedra Digital создает ИИ-платформу для геомеханического моделирования нефтегазовых месторождений. Новый цифровой инструмент будет строить точные 3D-модели недр на основе сейсмических и геофизических данных и ускорит оценку запасов и продуктивности залежей. Это повысит эффективность добычи и снизит технологические риски. ПАО «НК «Роснефть»» внедрило цифровую платформу «SmartГип» для проектирования и мониторинга разработки месторождений. Она объединяет 12 модулей, автоматизирует ключевые процессы, стандартизирует подходы, повышает прозрачность решений и помогает оптимально выбирать точки бурения. «SmartГип» обеспечивает долгосрочные прогнозы и контроль данных [117].

Таким образом, основными направлениями цифровизации в нефтегазовой отрасли являются следующие.

- *Инженерные симуляторы* позволяют оперативно корректировать планы и прогнозировать возможные сбои оборудования.
- *Искусственный интеллект и машинное обучение* используются для анализа данных с датчиков, что позволяет выявлять аномалии в работе оборудования и предотвращать возможные аварии.
- *Цифровые двойники* — виртуальные копии реальных объектов, которые позволяют моделировать различные сценарии работы оборудования и прогнозировать их последствия.
- *Большие данные (Big Data)*: их использование становится важной частью стратегического планирования в нефтегазовой отрасли; анализ информации о состоянии оборудования, логистике и рыночных трендах помогает точнее прогнозировать проблемы и оптимизировать производственные процессы.
- *Цифровая интеграция цепочек поставок* сокращает сроки доставки на 25–30 % и снижает логистические издержки на 15–20 %.
- *Предиктивное обслуживание* помогает компаниям заблаговременно обнаруживать потенциальные неисправности оборудования и предотвращать незапланированные простои.
- *Управление жизненным циклом активов*: цифровые решения позволяют лучше контролировать все этапы жизненного цикла, снижая затраты на обслуживание и увеличивая срок службы оборудования на 15–20 %.
- *Цифровой завод*: комплексные решения будущего включают использование передовых технологий, таких как машинное обучение и физико-химическое моделирование.

Выводы по первой главе

На основании критического анализа современной литературы выявлены проблемы, обобщены научно-методические основы мониторинга территории и геотехнологических узлов в газодобывающей промышленности. Рассмотрены приемы и методы исследований, приведены примеры геотехнического мониторинга в этой отрасли.

Выявлено, что современные методики геохимической оценки в газовой отрасли недостаточно разработаны, отдельные их аспекты существуют фрагментарно и по ним сложно осуществлять комплексную оценку состояния территории газового месторождения. Не разработан подход, который позволяет на единой методической основе проводить мониторинг параметров природной, технологической и технической среды и использовать всю совокупность полученных при наблюдении данных для оценки состояния системы в целом в рамках геотехнического мониторинга.

Эту задачу необходимо решать на основе комплексирования методов техно-геохимического мониторинга, математического и компьютерного моделирования.

Выявлено, что активно развивающимся направлением является создание математических, 3D-моделей и ГИС-картографирование геохимических потоков загрязняющих веществ в зоне горных предприятий. Современные исследования подчеркивают также высокий интерес к цифровой трансформации нефтегазовой отрасли, особенно к созданию «цифровых двойников» — виртуальных моделей реальных объектов для имитации сценариев эксплуатации оборудования и эффективного обеспечения производства. Так, в ходе эколого-геохимических исследований горных территорий использование ГИС позволяет объединить экспериментальные данные на основе пространственной привязки к территории, производственным узлам и процессам. ГИС, таким образом, представляет собой многофункциональный инструмент комплексной оценки природной среды, в том числе ее изменений, обусловленных техногенным воздействием горной, в том числе газовой, промышленности.

Рассмотрен также вопрос об изучении валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах (как приоритетных загрязнителей), что определяет их миграцию в условиях горнопромышленного техногенеза. Анализ современной литературы выявил большой научно-исследовательский резерв в этой области, проблематичность интерпретации результатов, отсутствие научно обоснованных работ по фундаментальным проблемам трансформации валовых и подвижных форм тяжелых металлов в зоне горнопромышленного техногенеза.

Анализ научно-технических материалов позволяет говорить о том, что в настоящий момент практически отсутствуют консолидированные подходы к проведению комплексного анализа состояния устойчивости природно-техногенных объектов, а также инструменты, позволяющие интегрировать традиционные и современные методы геотехнического и геохимического мониторинга в единую систему.

Таким образом, формирование методологических основ проведения техно-геохимического мониторинга в газодобывающей отрасли для целостного анализа внутрисистемных связей и взаимодействия с окружающей средой является актуальной научной проблемой при эксплуатации динамично изменяющихся природно-техногенных систем, прежде всего почв, на газоконденсатных месторождениях.

Поэтому разработка методов и технологий мониторинга горнотехнических систем и оценка геохимических условий освоения в активной фазе эксплуатации газоконденсатного месторождения являются предметом исследования настоящей работы. Указанные обстоятельства и выявленные проблемы обусловили цель и задачи проводимых в рамках диссертации исследований.

ГЛАВА 2. Объекты и методы исследований горнопромышленного производства

2.1 Характеристика района исследований

Ковыктинское газоконденсатное месторождение (ГКМ) расположено на юге Восточной Сибири. Ковыктинское газоконденсатное месторождение — крупнейшее по запасам газа на востоке России: извлекаемые запасы составляют 1,8 трлн м³ природного газа и 65,7 млн т газового конденсата [118]. Промышленная эксплуатация месторождения начата 21 декабря 2022 г., газ подается в магистральный газопровод «Сила Сибири» [119]; подготовку газа ведут УКПГ-2 (более 6 млрд м³/год), УКПГ-3 (13,9 млрд м³/год) и УКПГ-1 (6,9 млрд м³/год) [120]. Проектный уровень добычи составляет 27,2 млрд м³ газа в год (около 2,3 млрд м³ в месяц) [118, 120].

В административном отношении территория входит в состав Жигаловского района с административным центром в поселке Жигалово и частично затрагивает земли Казачинско-Ленского района Иркутской области. Месторождение находится в 450 км к северо-востоку от областного центра – г. Иркутска, в пределах малообжитой местности Лено-Ангарского плато, на землях Жигаловского лесничества. Географическое положение месторождения на карте региона представлено на рисунке 2.1.1.

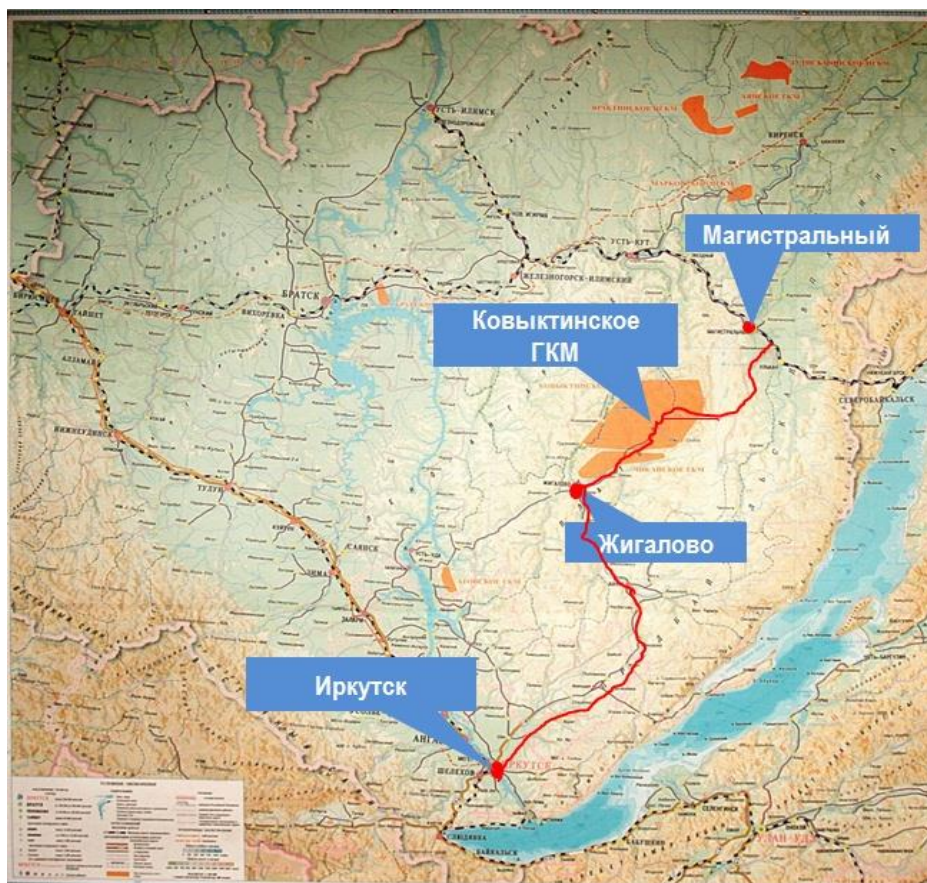


Рисунок 2.1.1 – Географическое положение Ковыктинского месторождения

Район характеризуется слабой социально-экономической освоенностью. Плотность населения крайне низка и составляет 1–2 человека на 1 км², при этом основная часть жителей

сосредоточена в районном центре и небольших населенных пунктах вдоль рек. Ближайшие населенные пункты – село Чикан, расположенное в 50 км, и пгт Жигалово, находящийся в 90 км к юго-западу. Транспортная сеть развита слабо, и район расположен вдали от крупных магистралей. Транссибирская магистраль проходит в 300 км, а БАМ – севернее. Основными артериями являются автодорога Иркутск – Жигалово – Магистральный и водный путь по реке Лена от порта Осетрово, используемый для завоза грузов. На рисунке 2.1.2 представлена схема расположения газопровода «Сила Сибири» от Ковыктинского газоконденсатного месторождения [121].

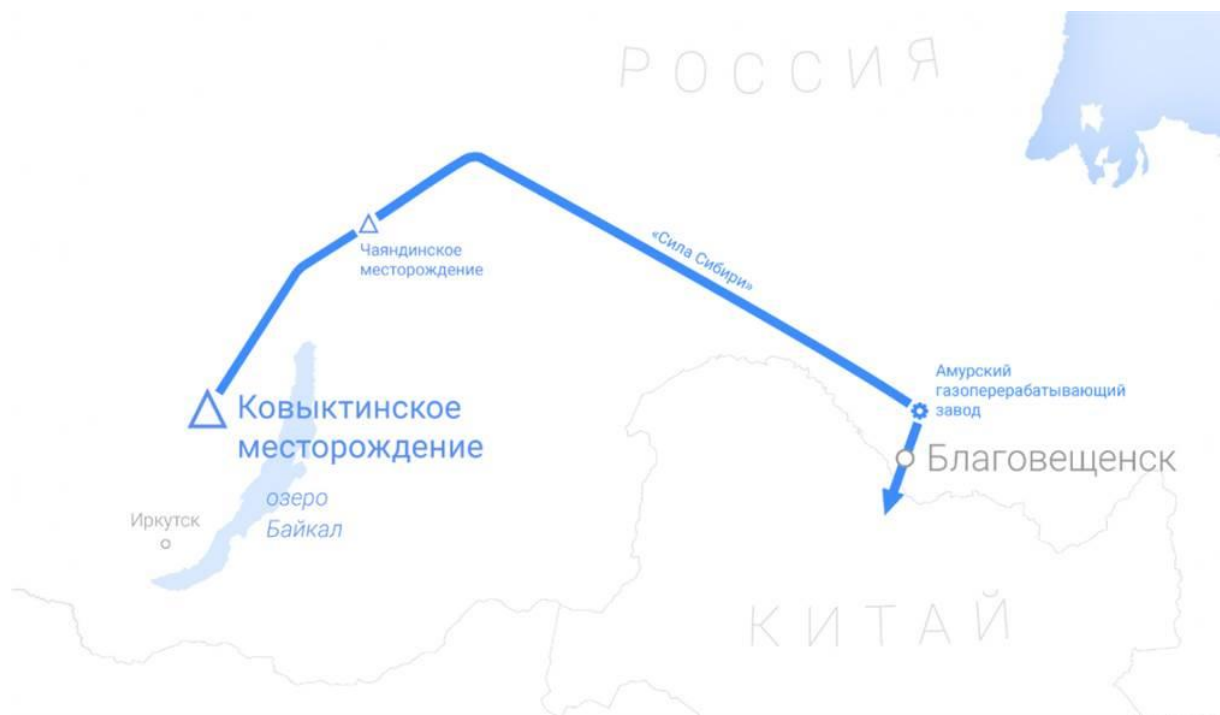


Рисунок 2.1.2 – Схема расположения газопровода «Сила Сибири»

На территории месторождения имеются вахтовый поселок и объекты промысла. Важно отметить, что на площадках и в районах прохождения трасс отсутствуют объекты археологического и культурного наследия, воинских захоронений и особо охраняемые природные территории.

В геоморфологическом отношении территория представляет собой всхолмленное плато с абсолютными высотами водоразделов до 1100–1500 м, глубоко расчлененное речными долинами, где минимальные отметки не превышают 650 м. Выделяются три основных типа рельефа: водоразделы, склоны и речные долины.

Месторождение находится в зоне многолетнемерзлых пород. Мощность мерзлоты составляет 30–40 м, температура — от минус 0,3 до минус 0,5 °С.

2.1.1 Геолого-физическая и литолого-стратиграфическая характеристики газоконденсатного месторождения

В структурном отношении Ковыктинское ГКМ приурочено к Ковыктинскому выступу Ангара-Ленской ступени Сибирской платформы, располагаясь в зоне перехода к Непско-Ботубинской антеклизе и Предпатомскому региональному прогибу. Осадочный чехол, мощность которого изменяется от 1,6 до 3 км, сложен породами позднего докембрия, палеозоя и кайнозоя. Геологическое строение иллюстрирует выкопировка из сводного разреза (приложение 1). Промышленные скопления газа в осадочной толще приурочены к подсолевому терригенному комплексу, содержащему продуктивный парфеновский горизонт, залегающий в верхней части нижнемотской подсвиты мотской свиты вендского возраста и подразделяемый на нижний (V парфеновский горизонт пл. П2) и верхний (V парфеновский горизонт пл. П1) интервалы. На рисунке 2.1.3 приведена схема залегания продуктивных пластов на газоконденсатном месторождении.

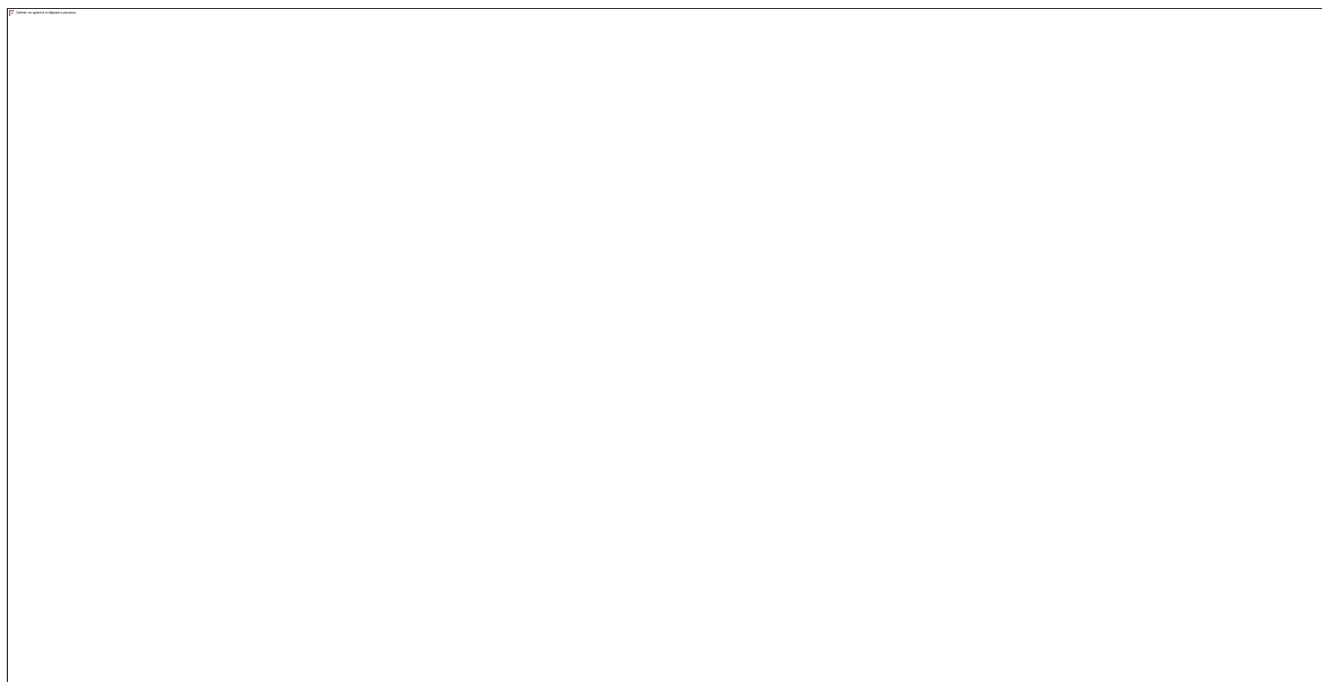


Рисунок 2.1.3 – Схема залегания продуктивных пластов Ковыктинского газоконденсатного месторождения

По данным бурения поисково-оценочных скважин в пределах Ковыктинской зоны газонакопления открыты газоконденсатные залежи, развитые на Ковыктинском и Чиканском месторождениях и Хандинском лицензионном участке [121].

В геолого-литологическом разрезе района на глубину рассматриваемого интервала участвуют нерасчленённые элювиально-делювиальные образования четвертичного возраста.

Мощность делювиальных отложений колеблется от 5 до 15 м. Отложения представлены щебнисто-глинистым материалом. Щебень состоит из обломков алевролитов и мелкозернистого

песчаника на известковистом цементе и известняка. Суглинистый заполнитель имеет, как правило, показатель текучести от полутвердого до твердого.

Элювиальные отложения представлены крупнообломочными глыбовыми грунтами. Глыбы сложены алевролитом низкой прочности на известковистом цементе, размягчаемым, и известняком средней прочности, неразмягчаемым, с прослойками до 5–10 см твердого суглинистого заполнителя.

Фундамент архей-протерозойского возраста представлен гранито-гнейсами и гранодиоритами, вскрытыми скважинами на глубине более 3396 м. Кора выветривания фундамента состоит из биотитово-кварцево-глинистых сланцев. Выше залегают отложения рифея, представленные ушаковской свитой. Это неравномерное переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов.

Аргиллиты — это породы по типу темно-серые, слюдистые, участками трещиноватые. В разрезе также выделяются гравийные песчаники.

Вендские отложения представлены мотской свитой, которая подразделяется на три подсвиты. Нижнемотская терригенная подсвита содержит основной продуктивный парфеновский горизонт (пласты П1 и П2), сложенный кварцевыми песчаниками с прослоями алевролитов. Это главный коллектор газа и конденсата, толщина которого варьируется. Среднемотская подсвита сложена переслаиванием доломитов и ангидритов, а верхнемотская представляет собой сульфатно-карбонатную толщу.

Палеозойские отложения нижнего отдела кембрия представлены мощной соленосно-карбонатной толщей, которая служит флюидоупором. Усольская свита содержит мощные пласты каменной соли толщиной до 80 м, которая чередуется с доломитами и известняками осинского горизонта. Бельская свита является карбонатно-соленосной и включает атовский и христофоровский горизонты. Разрез продолжают доломитовые и сульфатно-карбонатные породы булайской и ангарской свит, местами интенсивно дислоцированные и выщелоченные. Ордовикская система представлена терригенно-карбонатными породами. Четвертичные отложения перекрывают коренные породы плащом мощностью 5–15 м и состоят из элювиально-делювиальных суглинков, супесей и галечников. Важной особенностью геологического строения является наличие многолетнемерзлых пород мощностью 30–40 м с температурами от –0,3 до –0,5 °С, которые имеют островной и долинный характер распространения. Геологический разрез месторождения по линии разведочных скважин приведен в приложении 3.

2.1.2 Климат в зоне месторождения

Климат района резко континентальный, формирующийся под влиянием Сибирского антициклона, что обуславливает суровую, малоснежную и продолжительную зиму. Средняя

температура января составляет минус 26,2 °С, а абсолютный минимум достигает минус 55,4 °С. Лето короткое и жаркое, с абсолютным максимумом плюс 37,3 °С, однако возможны заморозки в течение всего летнего периода. Годовое количество осадков составляет около 437 мм, причем большая часть выпадает в теплый период, с максимумом в июле. Для района характерны температурные инверсии в долинах рек, способствующие застою воздуха и накоплению загрязнений, что в сочетании с низкой рассеивающей способностью атмосферы создает неблагоприятные условия. Почвы промерзают на значительную глубину из-за сочетания сильных морозов и маломощного снежного покрова, а безморозный период длится в среднем всего 83 дня [121].

Основными факторами, формирующими климатический режим района, выступают характер циркуляции воздушных масс, существенная абсолютная высота местности, расчленённость рельефа, удалённость и отгороженность от Атлантики и Тихого океана, открытость со стороны Северного Ледовитого океана.

Внутриматериковое положение Иркутской области и существенная удалённость от морей придают климату региона резко континентальный характер, который проявляется в низких зимних и высоких летних температурах воздуха. Зимой территория попадает под влияние Сибирского антициклона, при котором устанавливается ясная морозная сухая погода со слабым ветром, высоким атмосферным давлением и резкими температурными перепадами. Наибольшее выхолаживание отмечается в речных долинах, куда стекает холодный воздух, и зимние температуры опускаются до экстремально низких значений.

Среднегодовое значение скорости ветра равно 1,62 м/с. Среднемесячные показатели изменяются в диапазоне 1,1–2,3 м/с. Минимум скорости ветра приходится на декабрь, максимум — на апрель–май (межсезонные периоды). Максимальный порыв ветра за год составляет 26 м/с.

Относительная влажность воздуха варьирует в пределах 60–80 %. Наибольшее ее значение наблюдается в декабре – 81 %. Минимум относительной влажности фиксируется в мае — 60 %. Среднегодовое значение относительной влажности воздуха равно 74 %.

Среднегодовое значение годовая сумма осадков — 437 мм. Максимум месячной суммы — в июле (87 мм), минимум — в марте (10 мм). На тёплый период (апрель–октябрь) приходится 82 % годовой нормы.

2.1.3 Гидрология в зоне месторождения

Район характеризуется довольно мощным водоносным горизонтом (400–500 м), разгрузка которого осуществляется в речные русла.

Гидрологическая сеть территории принадлежит бассейну реки Лены и включает реки Орлинга, Ханда, Чикан, Нючакан и их притоки. Реки имеют смешанное питание, не

зарегулированы и в хозяйственном отношении используются слабо. Грунтовые воды типа верховодки встречаются спорадически, и их режим может нарушаться при строительстве.

Заболоченность водосборов незначительна и составляет менее 1 % площади. Небольшие заболоченные участки встречаются в днищах долин рек и пониженных участках. Болота моховые, со смешанным питанием, олиготрофные и мезотрофные. Влияние их на режим стока поверхностных вод невелико [121].

Грунтовые воды на исследуемой территории встречаются в единичных случаях. Образование грунтовых вод связано с нарушением рельефа (расчисткой склонов, строительством сооружений) в сочетании с недостаточной системой дренирования, что приводит к затруднению стока поверхностных вод, их просачиванию.

Образование грунтовых вод типа верховодки возможно в весенне-осенний период на глубинах 1–2 м в условиях нарушения стока поверхностных вод (выемки, планировка площадок).

2.1.4 Растительность и животный мир в зоне месторождения

Растительность района представлена темнохвойной тайгой с преобладанием кедра, ели и пихты, а также примесью лиственницы, сосны, березы и осины. Леса имеют важное значение для промысла пушнины и кедрового ореха. Животный мир типичен для тайги и включает таких представителей, как соболь, белка, медведь, лось, волк и рысь. Антропогенное воздействие, выражающееся в вырубках и шуме, создает фактор беспокойства для фауны.

2.1.5 Почвы в зоне месторождения

Почвенный покров относится к Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной области и формируется в условиях расчлененного рельефа и наличия мерзлоты. На водоразделах преобладают дерново-подзолистые почвы с профилем до 60 см и кислой реакцией. На склонах развиты дерново-карбонатные щебнистые и мерзлотно-таежные почвы. Последние отличаются высоким содержанием гумуса, достигающим 12 %, но являются крайне уязвимыми, так как нарушение моховой подстилки ведет к термокарсту и эрозии. В речных долинах распространены аллювиальные луговые и дерновые почвы, богатые органическим веществом [121].

Дифференцирующее влияние мезорельефа выражается в закономерной смене групп типов почв от вершин увалов к понижениям речных долин. При этом фиксируется неоднородность почвенного покрова, связанная с микрорельефом. Так, водораздельные поверхности заняты дерново-подзолистыми, дерново-таежными и мерзлотно-таежными в сочетании с дерново-карбонатными выщелоченными и дерновыми лесными почвами. Для крутых склонов характерны комплексы дерново-карбонатных маломощных каменистых, дерновых лесных маломощных каменистых и дерново-карбонатных выщелоченных маломощных почв. На покатых склонах

доминируют сочетания дерново-карбонатных выщелоченных среднесиловых и дерновых лесных среднесиловых почв.

Подзолистые и дерново-подзолистые почвы водораздельных поверхностей и приводораздельных склонов имеют достаточно развитый почвенный профиль (до 60 см). В них выделяется элювиальный горизонт (Е) средней степени оподзоленности и небольшой мощности (3–15 см), супесчаный и глинистый по гранулометрическому составу. Иллювиальный горизонт (В) суглинисто-глинистого состава более уплотнен.

Дерново-подзолистые почвы, в отличие от собственно подзолистых, характеризуются наличием гумусово-аккумулятивного горизонта мощностью 3–10 см. Содержание в нем органического углерода дифференцировано по глубине. В нижней, более минерализованной части его содержится от 6 до 10 %, а верхней задернованной – до 50 % вследствие неполного разложения органических остатков в условиях холодного климата. В элювиальном слое (Е) подзолистых почв содержится 1–2 % гумуса. На выровненных участках гумусовый горизонт достигает 20 см, по мере увеличения крутизны склона мощность профиля в целом уменьшается. Дерновый гумусовый горизонт постепенно переходит в почвообразующую породу непосредственно или через горизонт В. Горные дерново-таежные почвы формируются на северных склонах в условиях хорошего дренажа и при позднем оттаивании сезонной мерзлоты. Большой частью почвы маломощные и сильнощебнистые, нередко наблюдаются выходы горных пород на поверхность. Морфологический облик этих почв довольно однообразен. На поверхности залегает сравнительно маломощная подстилка (2–5 см), за которой следует дерновый горизонт буровато-серого, темно-бурого цвета, мощностью 5–10 см.

Мерзлотно-таежные (торфянисто-перегнойные) почвы расположены в основном по холодным (тяготеющим к северным экспозициям) склонам с темнохвойными и светлохвойными лесами. Для данных территорий свойственен бугристо-западинный рельеф вследствие увеличения объема грунтов при их промерзании. Для почв, развитых на буграх, характерна мощность органогенных горизонтов до 10 см. В их профиле достаточно длительное время присутствует льдистая мерзлота. На поверхности почвы накапливается мохово-торфянистая подстилка. Почвы, развитые в понижениях, характеризуются большей мощностью органогенных горизонтов (до 30 см). Устойчивость к антропогенному вмешательству низкая. При их нарушении активизируются эрозионные процессы, проявляется термокаст и солифлюкция.

2.2 Характеристика промузлов при добыче газа на КГКМ

На рисунке 2.2.1 представлена карта расположения Ковыктинского газоконденсатного месторождения и промышленных установок на промплощадке. В рамках данной работы объектами детального техно-геохимического мониторинга и геоэкологического исследования

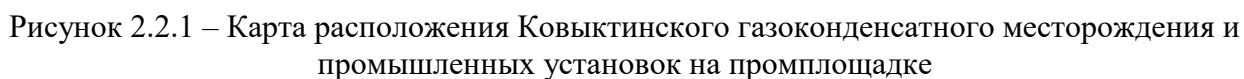


Схема обвязки двух скважин при помощи модуля “МОС-2”

Запорно-регулирующий клапан
Клапан обратный
Клапан запорный
Задвижка с ручным приводом
Фланцевая задвижка с гидроприводом
Шлейфовая задвижка с гидроприводом
Метанол из установки комплексной подготовки газа (УМГ)
Расходомер газа
Датчик давления в теплоизоляционном корпусе
Клапан контроля давления в теплоизоляционном корпусе
Арматурный блок
Станция управления
Система подачи ингибитора
Рама
Кислородосепаратор
От кислородосепаратора
Устройство горизонтального горелочное
Скважина 2
Задвижки с ручным приводом
Амратура фонтанная
Клапан угловой дроссельный УДК 100х21
Скважина 1

МОДУЛЬ МОС-2

Модуль МОС-2 состоит из станции управления и арматурного блока, гидравлически и электрически связанных между собой и устанавливаемых на одной общей раме.

Станция управления предназначена для дистанционного управления запорно-регулирующими арматурами двух скважин. В станции установлена удаленная система ввода-вывода параметров модуля, которая обеспечивает: управление насосно-аккумуляторной установкой; выдачу управляющих сигналов для управления СЗ, БЗ, ПКО, УДК 100х21, ШЗ и ФЗ; сбор и обработку сигналов от датчиков, установленных на скважине и струне с последующей передачей данных в систему автоматического управления куста плавких скважин.

В состав арматурного блока входят фланцевый и шлейфовый задвижки с гидроприводом, расходомер газа, датчики давления, системы подачи ингибитора, импульсные трубки для подачи рабочего агента на исполнительные механизмы СЗ, БЗ, ПКО и УДК, установленные на фонтанной арматуре.

Расходомер предназначен для постоянного замера дебита скважины.

Система подачи ингибитора - устройство, предназначенное для обеспечения подачи заданного расхода ингибитора при эксплуатации скважины.

От (и) цементировочного (му) агрегата (у) или от (и) передизольную емкость (и)

Технологический процесс начинается с добычи газа кустами скважин. На рисунке 2.2.3 представлены газовые скважины на Ковыктинском газоконденсатном месторождении – объект мониторинга № 1.



Рисунок 2.2.3 – Объект мониторинга № 1 – газовые скважины

На рисунке 2.2.4 представлен газосборный коллектор — объект мониторинга № 2.



Рисунок 2.2.4 – Объект мониторинга № 2 – газосборный коллектор

На рисунке 2.2.5 представлена установка низкотемпературной сепарации газа – объект мониторинга № 3.

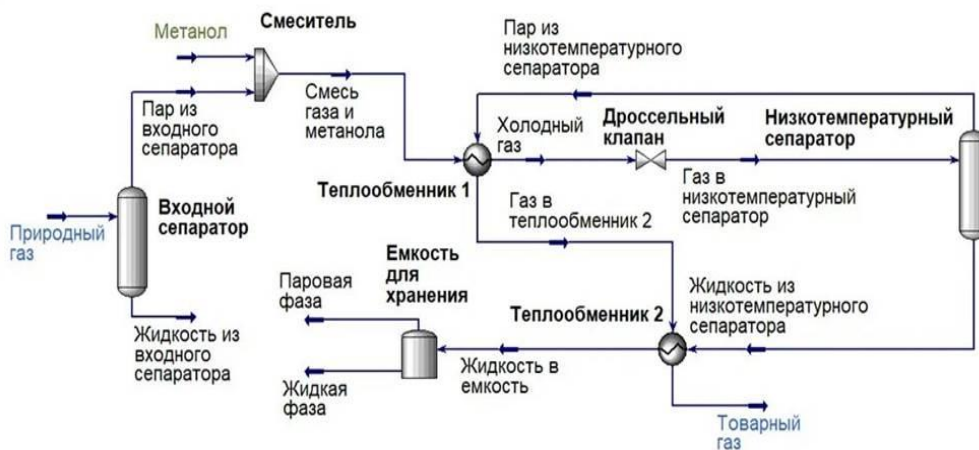


Рисунок 2.2.5 – Объект мониторинга № 3 – принципиальная схема установки низкотемпературной сепарации газа

На рисунке 2.2.6 представлена компрессорная станция – объект мониторинга № 4.



Рисунок 2.2.6 – Объект мониторинга № 4 – компрессорная станция

На рисунке 2.2.7 представлена установка стабилизации конденсата – объект мониторинга № 5.

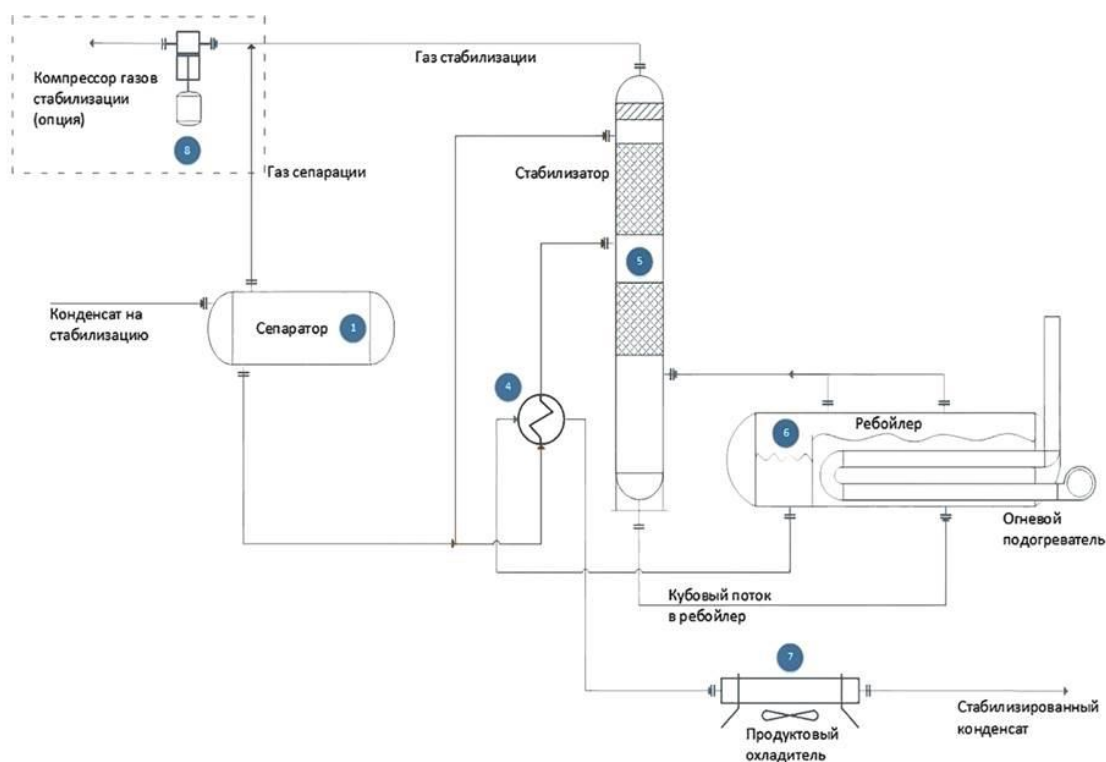


Рисунок 2.2.7 – Объект мониторинга № 5 – принципиальная схема установки стабилизации конденсата

На рисунке 2.2.8 представлена установка регенерации метанола – объект мониторинга № 6.

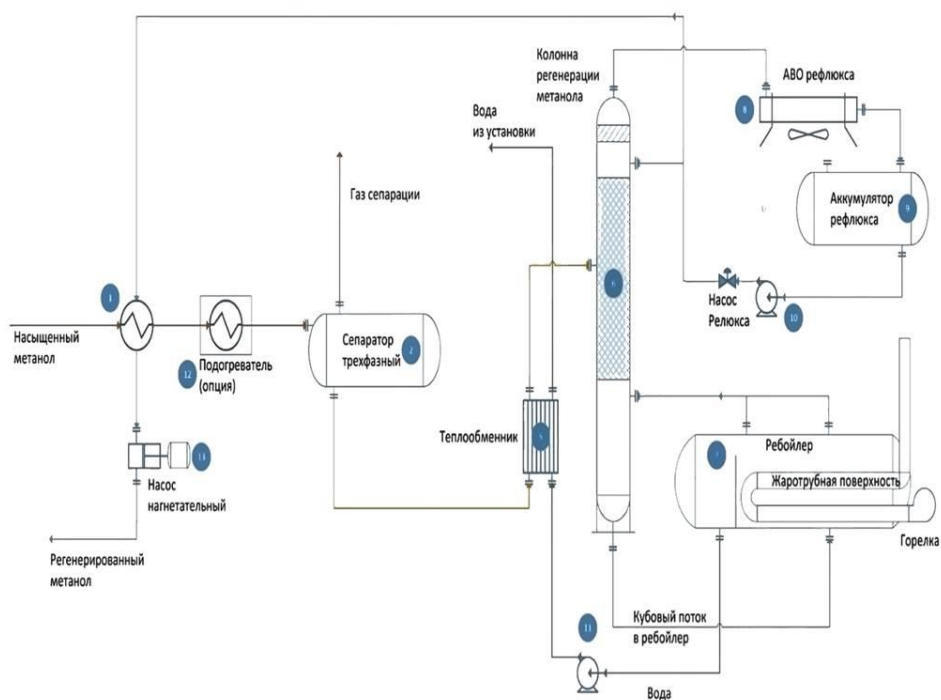


Рисунок 2.2.8 – Объект мониторинга № 6 – принципиальная схема установки регенерации метанола

На рисунке 2.2.9 представлены парки хранения метанола и стабильного газового конденсата – объекты мониторинга № 7 и № 8.



Рисунок 2.2.9 – Объекты мониторинга № 7 и № 8 – парки хранения метанола и конденсата

Пластовая смесь по шлейфам поступает на УКПГ, при этом для предотвращения образования гидратов подается метанол (рисунок 2.2.10).

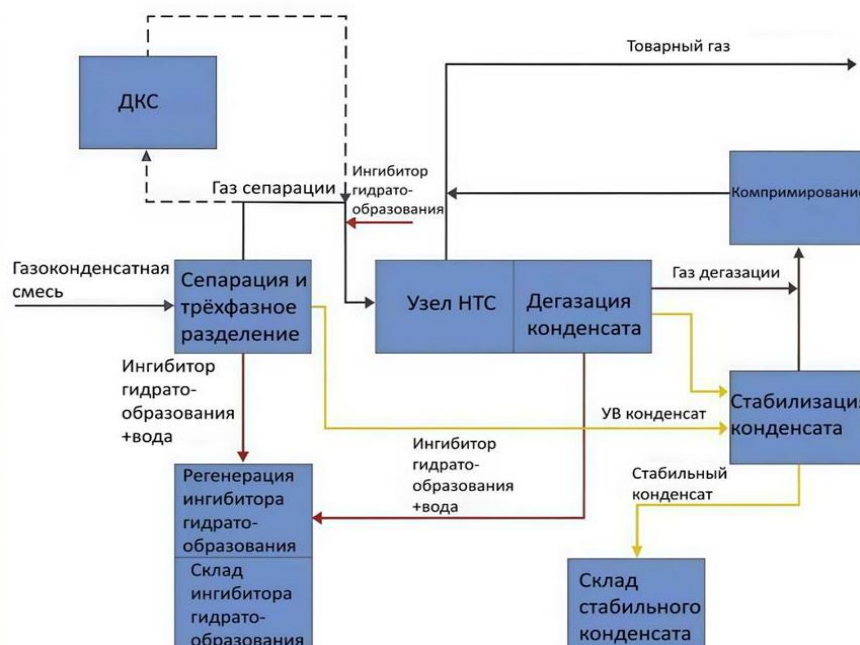


Рисунок 2.2.10 – Принципиальная схема установки подготовки газа (УКПГ)

Далее газ поступает на входные нитки и проходит первичную сепарацию в сепараторах типа 10С-1 и пробкоуловителях 10ПУ-1, где отделяется капельная жидкость и механические примеси. Основным процессом подготовки является низкотемпературная сепарация (НТС), где газ охлаждается в теплообменниках 20Т-1 и расширяется в турбодетандерах 20МТДА-1 для конденсации тяжелых углеводородов и воды. Выделенная жидкость направляется на установку стабилизации конденсата (УСК), где разделяется в трехфазных разделителях 30Р-1 и 30Р-2, а конденсат подвергается ректификации в колоннах 30К-1 при нагреве в печах 30П-1. Насыщенный водометанольный раствор поступает на установку регенерации метанола (УРМ), где метанол восстанавливается перегонкой в блоке 40БРМ-1. Завершается цикл хранением продуктов в резервуарных парках метанола 60Р-1 и стабильного конденсата 70Р-1, оснащенных системами защиты, однако сохраняется риск аварийной разгерметизации и переливов.

2.3 Потенциальные источники загрязнения при добыче газа на КГКМ

2.3.1 Источники воздействия на атмосферный воздух

Можно отметить следующие основные виды хозяйственной деятельности, в рамках которой будет иметь место загрязнение атмосферного воздуха:

- сооружение горизонтальных газовых скважин (537 единиц, объединённых в 121 куст) и поглощающих скважин (2 ед. в районе УКПГ-2);
- возведение объектов обустройства месторождения (УКПГ № 1–4 с ДКС; ГКС, КС газов стабилизации и ДНС, узлов стабилизации конденсата и регенерации метанола в районе УКПГ-2; межпромысловые газо-, конденсато- и метанолопроводы; промышленные автодороги);

- добыча углеводородного сырья (эксплуатация скважин);
- эксплуатация объектов обустройства месторождения.

С учётом того, что на стадии проектирования в проектной документации приведены только общие требования к выполнению работ, исходные данные для предварительной качественно-количественной оценки выбросов вредных веществ от всех видов планируемой хозяйственной деятельности на Ковыктинском месторождении приняты по объектам-аналогам.

Основными объектами, оказывающими негативное воздействие на атмосферный воздух в процессе строительства скважин, являются:

- выхлопные тракты ДВС строительной техники и автотранспорта, передвижные сварочные и окрасочные посты (на этапе строительно-монтажных операций и технической рекультивации земель по завершении строительства);

- выхлопные тракты дизельных двигателей привода буровой установки, установок испытания и электростанций, теплогенераторов;

- дыхательная арматура резервуаров хранения ГСМ и метанола;

- вентиляционный канал помещения буровой установки;

- разгрузочная площадка сыпучих материалов, применяемых при приготовлении бурового раствора и цементирования скважин;

- горизонтальная факельная установка для сжигания газа (в период освоения скважины).

- На этапе строительства объектов обустройства месторождения выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух поступают от:

- выхлопных трактов теплогенераторов;

- сварочных и окрасочных участков;

- площадок разгрузки сыпучих строительных материалов и др.

Источники выделения загрязнителей сосредоточены на площадках кустов газовых скважин, УКПГ № 1–4 с ДКС, ГКС, КС газов стабилизации, ДНС, а также на объектах вспомогательного назначения.

К ведущим источникам выбросов при эксплуатации объектов Ковыктинского ГКМ отнесены:

- а) в границах площадок кустов скважин:

- неплотности узлов запорно-регулирующей арматуры;

- горизонтальные факельные установки (ГФУ);

- б) на площадках УКПГ:

- вентиляционные трубы и дефлекторы помещений переключающей арматуры, насосной метанола, производственного корпуса с операторной, пожарного поста, склада масел;

- дымовые трубы котельных установок;

- дыхательная арматура расходных ёмкостей дизтоплива;
- выхлопные тракты аварийных дизель-ЭС (профилактические пуски);
- дыхательные клапаны дренажных и расходных ёмкостей дизтоплива;
- факел и ГФУ на площадке факелов при продувке шлейфов и опорожнении оборудования.

К неорганизованным выбросам относятся неплотности фланцевых соединений оборудования на открытых площадках:

- на площадках ДКС — выхлопные тракты ГПА;
- вентиляционные трубы и дефлекторы УПТИГ, цеха очистки газа, насосной масел;
- дыхательные клапаны расходных ёмкостей дизтоплива и масел;
- свечи останова ГПА;
- выхлопные тракты резервных ДЭС (профилактические пуски).

Источниками неорганизованных выбросов на ДКС выступают неплотности во фланцевых соединениях технологического оборудования компрессорного цеха, узла охлаждения газа, УПТИГ.

К источникам выбросов на площадке ЭСН (электростанция собственных нужд) отнесены:

- выхлопные тракты газотурбинных установок ГТЭС «Урал-2500» и «Урал-6000»;
- вентиляционные трубы насосных масел;
- дыхательные клапаны расходных ёмкостей масел и дизтоплива;
- выхлопная труба дизель-ЭС.

– Источниками неорганизованных выбросов являются неплотности во фланцевых соединениях технологического оборудования [122].

Перечень загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу при эксплуатации Ковыктинского месторождения, приведен в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Ориентировочный перечень загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу при эксплуатации Ковыктинского месторождения

Вещество	Использ. критерий	Значение критерия, мг/м ³	Класс опасности	Выбросы загрязняющих веществ (т/год)
1	2	3	4	5
Алюминийтриоксид (в пересчёте на алюминий)	ПДК с/с	0,01	2	0,0025
Железотриоксид (Железа оксид)	ПДК с/с	0,04	3	3,5863
Марганец и его соединения	ПДК м/р	0,01	2	0,0587

Продолжение таблицы 2.3.1

Вещество	Использ. критерий	Значение критерия, мг/м³	Класс опасности	Выбросы загрязняющих веществ (т/год)
Олово оксид (в пересчете на олово)	ПДК с/с	0,02	3	1,50E-05
Свинец и его неорганические соединения	ПДК м/р	0,001	1	4,20E-05
Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	ПДК м/р	0,20	3	2411,9637
Азотная кислота (по молекуле HNO_3)	ПДК м/р	0,40	2	0,0023
Аммиак	ПДК м/р	0,20	4	0,6328
Азот (II) оксид (Азота оксид)	ПДК м/р	0,40	3	1369,1223
Гидрохлорид (Соляная кислота)	ПДК м/р	0,20	2	23,6053
Серная кислота (по молекуле H_2SO_4)	ПДК м/р	0,30	2	0,0055
Углерод (Сажа)	ПДК м/р	0,15	3	61,3649
Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	ПДК м/р	0,50	3	5256,5771
Дигидросульфид (Сероводород)	ПДК м/р	0,008	2	0,3023
Углерод оксид	ПДК м/р	5,00	4	4660,5149
Фтористые газообразные соединения	ПДК м/р	0,02	2	24,8527
Фториды неорганические плохо растворимые	ПДК м/р	0,20	2	0,0161
Метан	ОБУВ	50,00	-	568,1038
Смесь углеводородов предельных $\text{C}_1\text{-C}_5$	ОБУВ	50,00	-	124,3098
Смесь углеводородов предельных $\text{C}_6\text{-C}_{10}$	ПДК м/р	60,00	4	43,1780
Бензол	ПДК м/р	0,30	2	0,0126
Диметилбензол (ксилол (смесь изомеров о-, м-, п-))	ПДК м/р	0,20	3	0,5296
Метилбензол (Толуол)	ПДК м/р	0,60	3	0,8661

Продолжение таблицы 2.3.1

Вещество	Использ. критерий	Значение критерия, мг/м³	Класс опасности	Выбросы загрязняющих веществ (т/год)
Этилбензол	ПДК м/р	0,02	3	0,1128
Бензапирен (3,4-Бензапирен)	ПДК с/с	0,000001	1	9,70E-05
Изопропиловый спирт	ПДК м/р	0,60	3	2,30E-05
Метанол (Метиловый спирт)	ПДК м/р	1,00	3	136,9642
Этан-1,2-диол (Этиленгликоль)	ОБУВ	1,00	-	3,4484
Формальдегид	ПДК м/р	0,035	2	0,9397
Пропан-2-он (Ацетон)	ПДК м/р	0,350	4	0,0005
Этановая кислота (Уксусная кислота)	ПДК м/р	0,200	3	5,60E-05
Бензин	ПДК м/р	5,00	4	0,0182
Керосин	ОБУВ	1,20	-	23,1818
Масло минеральное нефтяное	ОБУВ	0,05	-	1,1040
Алканы C ₁₂ -C ₁₉	ПДК м/р	1,00	4	0,7212
Взвешенные вещества	ПДК м/р	0,50	3	170,0663
Пыль неорганическая: 20–70 % двуокиси кремния	ПДК м/р	0,30	3	0,0068
Пыль абразивная (Корунд, Монокорунд)	ОБУВ	0,04	-	0,0419

Ниже представлено ранжирование загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу при эксплуатации Ковыктинского месторождения, по степени их опасности. Данные изображены на рисунке 2.3.1. Анализ показал, что в группу приоритетных загрязнителей входят соединения II и III классов опасности, на долю которых от общего перечня приходится 31,25 % и 43,75 % соответственно.

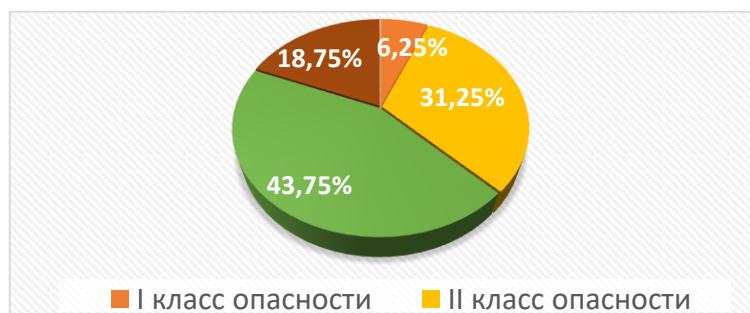


Рисунок 2.3.1 – Ранжирование загрязняющих веществ по классу опасности

Проведено ранжирование по массе загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах источников загрязнения атмосферы на территории Ковыктинского месторождения (рисунок 2.3.2).

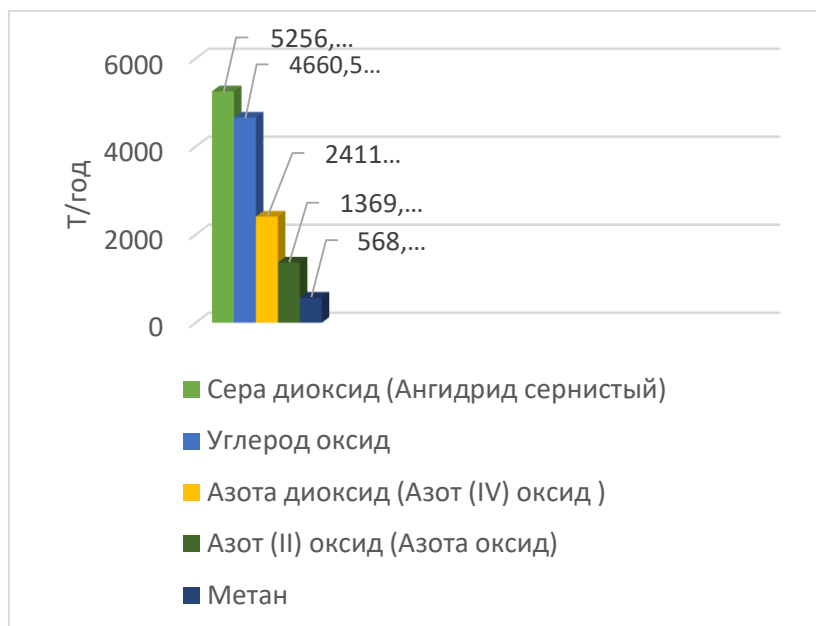


Рисунок 2.3.2 – Ранжирование загрязняющих веществ по массе выбросов

2.3.2 Источники воздействия на поверхностные воды и геологическую среду

Влияние газового производства на геологическую среду может реализовываться «снизу» — за счёт перетока минерализованных вод в подземные горизонты через порывы кондуктора и эксплуатационной колонны либо из-за некачественного цементирования затрубного пространства. При межпластовых перетоках в верхних водоносных горизонтах могут формироваться аномальные гидрохимические зоны, в которых наблюдается гидравлическое вытеснение вод данного горизонта загрязнителем (минерализованной водой), поступающим из иных водоносных горизонтов.

Изменение природного химического состава пресных подземных вод зоны активного водообмена определяется совокупностью факторов, основными из которых выступают физико-химические свойства и состав загрязнённых производственных стоков. Поступление загрязнителей в водоносные горизонты идёт также за счёт фильтрации технологических стоков через проницаемые слои и литологические окна. Их попадание в грунтовые воды ведёт к росту минерализации, общей жёсткости и проявляется в увеличении концентраций хлоридов, сульфатов и гидрокарбонатов кальция и магния.

2.3.3 Источники воздействия на земельные ресурсы, растительный и животный мир

Для реализации хозяйственной деятельности на период эксплуатации газоконденсатного месторождения задействовано 963,61 га земель. При выполнении подготовительных, строительного-монтажных работ и мероприятий по ликвидации (консервации) скважин на почвенно-растительный покров действуют механическое и химическое воздействия с деградацией почвенного покрова.

Механическое разрушение происходит в процессе земляных работ, а также при движении строительной техники и транспортных средств за пределами автопроездов и подъездных дорог. При механическом разрушении почвенного профиля происходит фрагментарное или полное уничтожение гумусированных горизонтов, частичное разрушение, уплотнение.

Химическое загрязнение почв возможно вследствие утечек, потерь технологических жидкостей и реагентов на стройплощадке, складирования и сброса в неустановленных местах производственных и твёрдых отходов.

Неблагоприятное воздействие на растительный мир возможно при отступлениях от технологического регламента эксплуатации оборудования и коммуникаций, при аварийных ситуациях, при несоблюдении правил и техники безопасности персоналом объектов.

Основная нагрузка на территорию локализована в пределах площадей отвода. Воздействие на растительность ограничено во времени и низкое по уровню. Уничтожение растительности происходит на участках земляных работ и при проходе техники вне дорог. Ожог листовых пластинок фиксируется при образовании аэрозолей кислот, например сернистого ангидрида в выбросах автотранспорта и техники.

При технологическом освоении участков происходит трансформация и нарушение мест обитания животных, что может привести к сокращению численности и видового состава фауны. Дополнительно интенсивные шумы выступают фактором беспокойства животных.

2.4 Методы исследования, используемые в работе

В работе при решении поставленных задач использовались: системный подход, сравнительный анализ, геохимическое опробование, математическое, 3D- и ГИС-моделирование, приёмы цифровизации. Геохимические исследования проводились также на фоновых территориях для установления природного уровня загрязнения почв на расстоянии от 10 до 40 км от промплощадки. Аналитический этап выполнялся в аккредитованной сертифицированной лаборатории ИРНТУ с использованием современных инструментальных методов физико-химического анализа.

Пробоподготовка проведена в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017. Полевой этап работ включал отбор проб в весенний и осенний периоды 2023–2025 гг. Всего было отобрано 70 почвенных проб. Кроме того, выполнен химический анализ проб рапы: макрокомпонентный состав определён в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», содержание марганца и мышьяка — в лаборатории ИРНИТУ методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ПНД Ф 14.1:2:4.135-98). Для сравнительного анализа были изучены данные производственного контроля почв за 2019–2022 гг. (приложение 5); таким образом, проанализировано 315 почвенных проб. Результаты производственного экологического мониторинга почв за 2023 и 2024 гг. и валовой состав почв по данным РФА 2025 г. приведены в приложении 4,5.

Элементный химический состав почв (валовые и подвижные формы химических элементов) определялся по общепринятым в геохимии методикам:

1. Подвижные формы металлов и мышьяка — методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) в вытяжке ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 (ПНД Ф 16.1:2.3:3.50-08) на спектрометре ICPE-9000 в лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред ИРНИТУ (РОСС RU.0001.518897).

2. Определение общего азота N фотометрическим методом (ГОСТ Р 58596-2019, п. 7.2).

3. Определение Сорг фотометрическим методом (ГОСТ 26213-2021, п. 6.1).

4. Значения pH почв получены потенциометрически по ГОСТ 26212-91.

5. Рентгенофлуоресцентный анализ почв (РФА) с использованием портативного прибора SciAps серии X200-30453 — валовые содержания элементов, в том числе Fe, в пробах 2025 г. (приложение 4).

6. Валовые (кислоторастворимые) формы металлов и мышьяка — методом АЭС-ИСП после кислотного разложения проб (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98).

7. Марганец и мышьяк в рапе — методом АЭС-ИСП (ПНД Ф 14.1:2:4.135-98).

А также использовались следующие приемы:

1. Статистическая обработка данных и анализ ошибок в STATISTICA 10.

2. Построение картосхем моноэлементных распределений в почвенном слое на основе ГИС (Surfer 23.1.162).

3. Корреляционно-регрессионный анализ и построение цифровой модели работы газовой скважины с целью оптимизации подачи метанола.

Выводы по второй главе

Анализ территории месторождения показал высокую уязвимость природных комплексов к техногенному воздействию. На основе изучения технологического цикла добычи и подготовки газа выделены ключевые объекты мониторинга — кусты газовых скважин, газосборные коллекторы, установки низкотемпературной сепарации, компрессорные и стабилизационные комплексы, а также парки хранения метанола и конденсата, представляющие потенциальные источники загрязнения почв. Применение системного, геохимического и статистического подходов в сочетании с современными инструментальными методами физико-химического анализа (АЭС-ИСП, РФА), ГИС-технологии и 3D-моделирование обеспечивают комплексную оценку территории и современного состояния почв в зоне газодобычи. Это способствует эффективному решению поставленных задач в диссертации и составляет основу для решения проблемы формирования объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга.

Объекты детального наблюдения выделены по иерархии горнотехнической системы промысла — от газовой скважины до установки низкотемпературной сепарации, компримирования, стабилизации конденсата, регенерации метанола до парков хранения и направления подготовленного газа в магистраль.

ГЛАВА 3. Оценка почв промплощадки на основе объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга

3.1 Анализ загрязнений в соответствии с иерархической структурой мониторинга

Объектно-ориентированный подход в настоящей работе реализуется путем оценки состояния почв в зоне 8 технологических узлов промплощадки. 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 (рисунок 3.1.1).

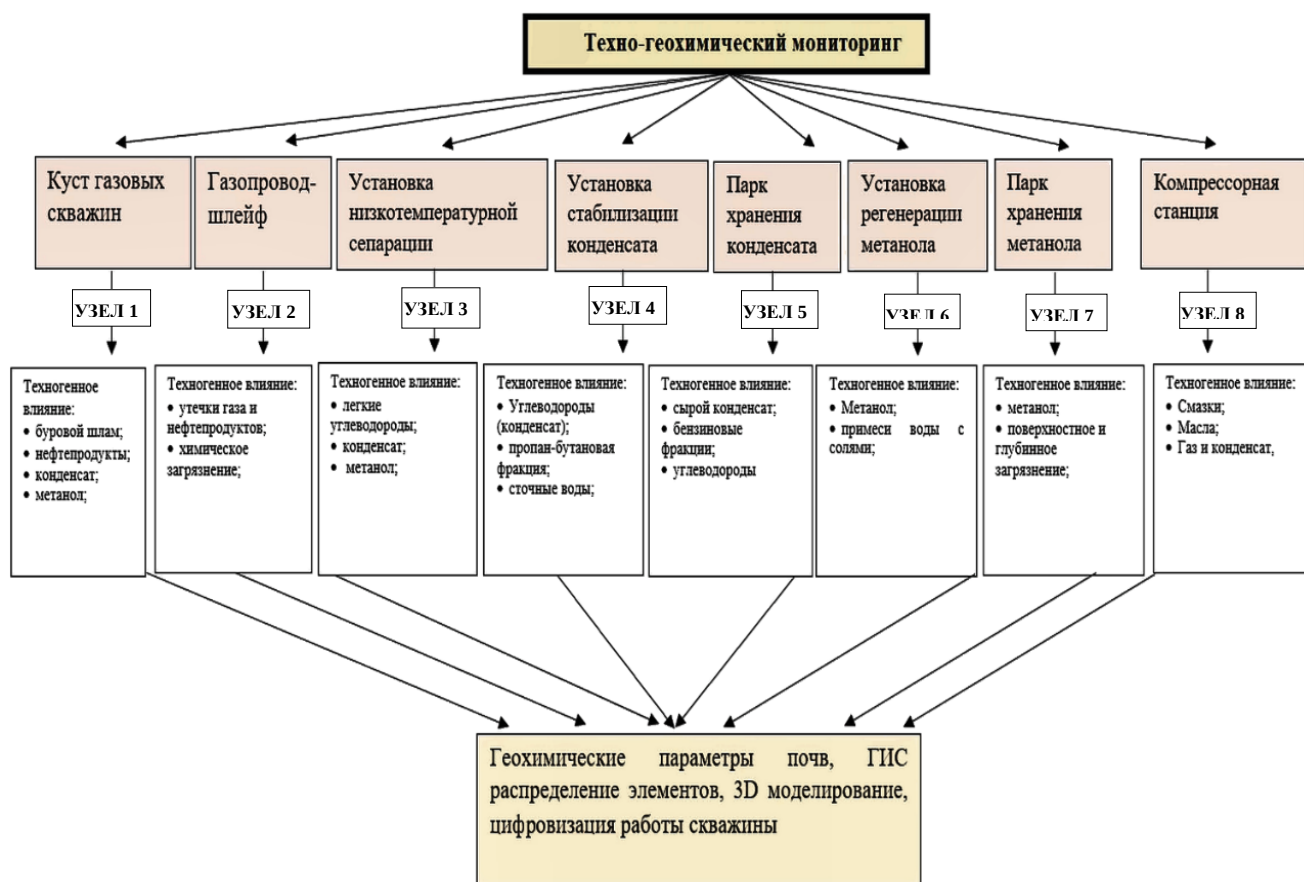


Рисунок 3.1.1 – Блок-схема иерархической структуры объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга почв

Точки пробоотбора представлены на рисунке 3.1.2 в соответствии с блок-схемой (рисунок 3.1.1).

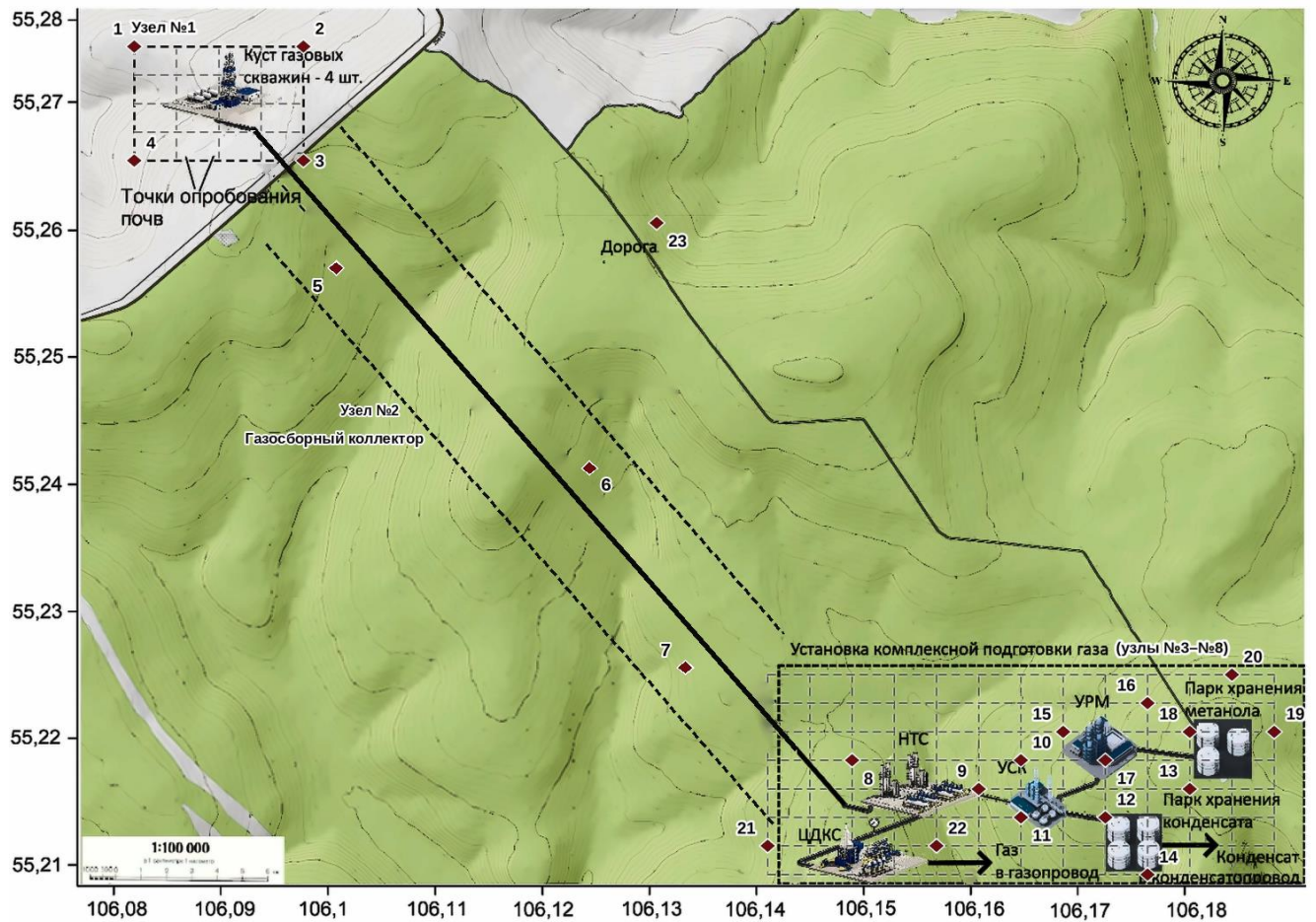


Рисунок 3.1.2 – Схема пробоотбора почв в зоне месторождения

Исследования проводились во временной динамике освоения новых участков месторождения (рисунок 3.1.3).

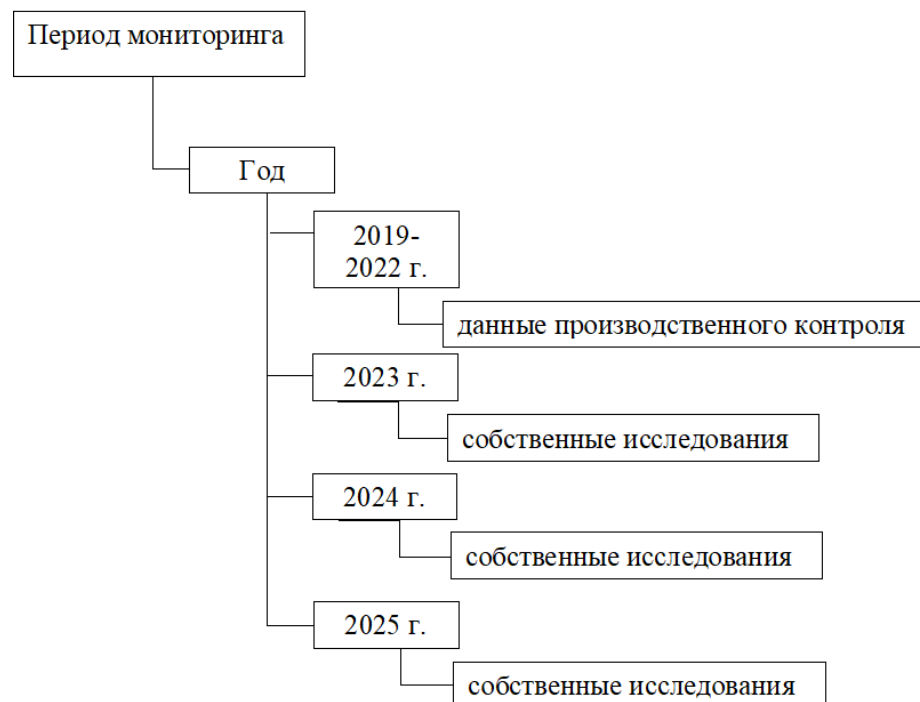


Рисунок 3.1.3 – Временная динамика мониторинга почв

Ранее И. А. Белозерцевой с соавторами [69, 123] была дана характеристика химического состава почв ранее освоенной части территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения за 2004–2012 годы — скважины 101, 102, 106, 107, ПАЭС и разведочных скважин № 70, 67. Часть из указанных скважин в настоящее время уже законсервирована или переоборудована в соответствии с новыми стандартами эксплуатации. Площадь обследования в том числе включала 94 % лесных земель Прибайкальской территории. Выявлено, что техноземы имеют локальное распространение на площадках буровых скважин. В период проводимых исследований было установлено, что содержание нефтепродуктов, свинца, цинка, никеля и хрома превышало фоновые значения и санитарно-гигиенические нормы. Основными источниками в период исследований при строительстве скважин являлись: буровые растворы, пластовые воды, продукты сгорания топлива, материалы бурения и крепления скважин, горюче-смазочные материалы. На основании полевых исследований авторов с использованием тематических карт, а также космо- и фотоснимков составлена почвенная карта Ковыктинского газоконденсатного месторождения и окружающей территории в зоне раннего периода освоения месторождения.

Однако в результате расширенной разработки месторождения и территории начиная с 2022 г. были введены в эксплуатацию еще 9 новых кустов газовых скважин (55 отдельных скважин), а также введена в эксплуатацию установка комплексной подготовки газа (УКПГ) на территории месторождения — *локация 55,20–55,28° с. ш., 106,08–106,20° в. д.* При этом производственные мощности добычи газа существенно возросли. В настоящее время площадь промплощадки составляет 80 га, что существенно увеличило площадь воздействия месторождения на территорию и почвы.

Это обусловило необходимость оценки геохимического состояния почв в новых условиях эксплуатации месторождения. Особое внимание было уделено выявлению причин превышения содержания As, Mn, Ni в почвах территории месторождения, поскольку со стороны государственных надзорных органов экологического контроля были нарекания по превышению нормативов ОДК/ПДК.

Действительно, в некоторых точках пробоотбора на территории промплощадки были зафиксированы (таблица 3.2.1, приложения 4, 5) содержания валовых форм: Mn до 1700 мг/кг (ОДК/ПДК = 1500 мг/кг), Ni до 85,6 мг/кг (ОДК/ПДК 40 мг/кг), As до 14 мг/кг (ОДК/ПДК = 5 мг/кг — для кислых суглинистых и глинистых почв при $pH < 5,5$ по СанПиН 1.2.3685-21 [124]).

Поэтому в настоящей работе в рамках объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга были проведены исследования по выявлению источников загрязнения почв **тяжелыми металлами и мышьяком** в привязке к 8 промузлам промплощадки.

Кроме того, необходимо было оценить оптимальный расход метанола в газодобывающей скважине как начального звена всей добычи и получить более экономичную цифровую модель работы скважины.

Так, газовые скважины (*пункт 1* объекта мониторинга) в процессе добычи являются критически важным начальным технологическим звеном и средством, определяющим работоспособность и эффективность всего месторождения. В почву при работе газовой скважины попадают буровой шлам, нефтепродукты и конденсат, метанол – как ингибитор гидратообразования, буровые жидкости, некоторые реагенты, такие как полимеры и реологические модификаторы [125, 126]. Были сделаны аналитические определения состава рапы для оценки возможного поступления тяжёлых металлов и мышьяка в почвы промплощадки. В таблице 3.1.1 приведены результаты испытаний № 102 от 03.04.2025, проведенных в Тюменском центре исследования пластовых систем ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (лаборатория химико-аналитических исследований пластовых вод; аттестат аккредитации РОСС RU.0001.518097) и протокола лабораторных испытаний № 2901-17/26-ВС от 03.02.2026 г. ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (лаборатория экологического мониторинга природных и техногенных сред, аттестат аккредитации РОСС RU.0001.518897).

Таблица 3.1.1 – Результаты лабораторных испытаний рапы (промстоков) газовой скважины 2091 Ковыктинского ГКМ

Показатель, единица измерения	Результат испытания	НД на методы исследования
Физико-химические показатели (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», протокол № 102 от 03.04.2025 г.)		
Плотность, г/см ³ при 20 °С	1,4161	Руководство по эксплуатации плотномера Anton Paar DMA 4100 M
Водородный показатель (рН), ед. рН	3,68	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 (изд. 2018)
Сухой остаток, мг/дм ³	685 500	ПНД Ф 14.1:2:4.261-2010 (изд. 2015)
Прокаленный остаток, мг/дм ³	529 000	ПНД Ф 14.1:2:4.261-2010 (изд. 2015)
Потери при прокаливании, мг/дм ³	156 500	расчётное значение
Общая минерализация, мг/дм ³	545 812	сумма анионов и катионов
Содержание неорганических компонентов (анионы), мг/дм³		
Cl ⁻	345 080	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18
SO ₄ ²⁻	< 0,5	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18
HCO ₃ ⁻	< 6,1	ГОСТ 31957-2012 (метод А.1)
CO ₃ ²⁻	< 6,0	ГОСТ 31957-2012 (метод А.1)

Продолжение таблицы 3.1.1

Показатель, единица измерения	Результат испытания	НД на методы исследования
I^-	< 0,4	М 01-45-2009 (изд. 2014)
Br^-	6 472	М 01-45-2009 (изд. 2014)
B	28,9	ПНД Ф 14.1:2:4.36-95 (изд. 2010)
NO_3^-	< 0,2	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18
NO_2^-	< 0,2	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18
PO_4^{3-}	< 0,25	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18
F^-	< 0,1	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18
Сумма анионов	351 580,9	—
Содержание неорганических компонентов (катионы), мг/дм³		
Na^+	3 063	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011)
K^+	10 404	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011)
Ca^{2+}	142 320	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011)
Mg^{2+}	28 832	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011)
Sr^{2+}	8 180	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011)
Li^+	510	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011)
Fe общ.	462	ГОСТ 23268.11-78
NH_4^+	208	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011)
Ba^{2+}	131	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011)
Сумма катионов	194 231,0	—
Содержание Mn и As (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», протокол № 2901-17/26-ВС от 03.02.2026 г.)		
Марганец (Mn), мг/дм ³	< 0,050	ПНД Ф 14.1:2:4.135-98
Мышьяк (As), мг/дм ³	< 0,050	ПНД Ф 14.1:2:4.135-98

Из данных таблицы 3.1.1 следует, что в составе сточных вод (рапы) газовой скважины фиксируются катионы и анионы при общей минерализации 545 812 мг/дм³ и кислой реакции среды pH = 3,68. Содержание марганца и мышьяка не превышает нормативов.

Содержание марганца и мышьяка, также определённое в лаборатории ИРНИТУ, ниже пределов обнаружения по применяемым методикам (< 0,050 мг/дм³). Это свидетельствует о том, что из ствола скважины с промстоками не поступают в почву промплощадки марганец и мышьяк в значимых количествах. Следовательно, рапа из скважины не может быть отнесена к значимым источникам загрязнения территории месторождения. Никель в рапе не определялся: при минерализации 545,8 г/дм³ определение его микроконцентраций методом АЭС-ИСП (ПНД Ф 14.1:2:4.135-98) возможно только после многократного разбавления пробы для снижения солевой

нагрузки на плазму, при котором нижняя граница определения никеля превышает его ожидаемое содержание в рассолах.

Газосборный коллектор (пункт 2 объекта мониторинга) – это трубопроводная система сбора газа и конденсата. Технология включает систему многосекционных коллекторов с запорной арматурой для распределения потока газожидкостной смеси. Загрязнителями от протечек могут быть газовый конденсат и углеводороды, метанол, тяжелые металлы, поступающие в почву при коррозии трубопроводов [127]. Результаты опробования почв в зоне узла приведены в разделе 3.2 (таблица 3.2.1, пункт 2).

Установка низкотемпературной сепарации (пункт 3 объекта мониторинга). Технология заключается в отделении жидкости от газа, отделении конденсата и водометанольного раствора путем его охлаждения до минус 40 °С с помощью турбодетандера, теплообменника, эжектора, дросселя. Утечки приводят к сбросу в почву легких углеводородов, метана и хладагентов, метанола. Результаты опробования почв в зоне узла приведены в разделе 3.2 (таблица 3.2.1, пункт 3).

Компрессорная станция (пункт 4 объекта мониторинга). На станции происходит сжатие газа винтовыми, поршневыми или центробежными компрессорами для поддержания давления в сети и транспортировки газа по магистральному газопроводу. Загрязняющие вещества в результате протечки: смазки, масла, газ и конденсат. Результаты опробования почв в зоне узла приведены в разделе 3.2 (таблица 3.2.1, пункт 4).

Установка стабилизации конденсата (пункт 5 объекта мониторинга). На установке происходит процесс нагрева и ректификации нестабильного конденсата для удаления из него легких фракций углеводородов. Утечки: сырой конденсат, пропан-бутановая фракция и сточные воды, проникающие в грунт. Результаты опробования почв в зоне узла приведены в разделе 3.2 (таблица 3.2.1, пункт 5).

Установка регенерации метанола (пункт 6 объекта мониторинга). На установке происходит восстановление метанола из насыщенной водометанольной смеси посредством нагрева и ректификации для повторного использования и предотвращения гидратообразования. Протечки содержат метанол и примеси воды с солями, которые поступают в почвы. Результаты опробования почв в зоне узла приведены в разделе 3.2 (таблица 3.2.1, пункт 6).

Парк хранения метанола (пункт 7 объекта мониторинга) представляет собой резервуарный парк с цилиндрическими емкостями на фундаментах. Утечки вызывают просачивание метанола в почву, также приводя к токсичному загрязнению территории. Результаты опробования почв в зоне узла приведены в разделе 3.2 (таблица 3.2.1, пункт 7).

Парк хранения газового конденсата (пункт 8 объекта мониторинга) представляет собой резервуарный комплекс для легких углеводородов. Основные потери, поступающие в почву при

коррозии или переливах: сырой конденсат, бензиновые фракции. Результаты опробования почв в зоне узла приведены в разделе 3.2 (таблица 3.2.1, пункт 8).

Технологические процессы узлов не связаны с использованием мышьяксодержащих веществ, в рапе мышьяк не обнаружен (таблица 3.1.1); фактические содержания As в почвах в зоне узлов рассмотрены в разделе 3.2 и приложениях 4, 5.

3.2 Формирование геохимических барьеров и кластеров

Распределение валовых и подвижных форм тяжёлых металлов по объектам мониторинга за 2024 и 2025 гг. во время выполнения диссертации приведено в таблице 3.2.1 и приложении 4. Исследования почв проводились в слое 20 см для валовых и подвижных форм элементов, так как подвижные формы тяжелых металлов – это наиболее опасная и токсичная субстанция. Их содержание зависит от pH среды, обогащения почвы органикой и от гранулометрического состава [128, 129].

В таблице 3.2.1 представлены усредненные результаты анализов проб почв, отобранных с территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения в 2024 году по 8 объектам техно-геохимического мониторинга.

Таблица 3.2.1 – Результаты анализов проб за 2024 год, валовые и подвижные формы (среднее содержание) по 8 узлам техно-геохимического мониторинга и суммарный показатель загрязнения Z_c

№ узла монито ринга	Форма нахож дения	pH	Cd, мг/кг	Co, мг/кг	Mn, мг/кг	Cu, мг/кг	As, мг/кг	Ni, мг/кг	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг	Сорг, %	Z_c
1	валов ые	4,8	0,43	14,3	1700	74,3	12,1	52	17	64,4	9,4	8,0
	подви жные		0,2	0,4	100	0,7	0,5	0,6	0,6	1		
2	валов ые	4,9	0,46	15,7	1700	75,1	11,6	51,7	17,2	60,2	11,6	7,8
	подви жные		0,2	0,4	100	0,5	0,5	0,5	0,9	1,4		

Продолжение таблицы 3.2.1

№ узла монито ринга	Форма нахож дения	pH	Cd, мг/кг	Co, мг/кг	Mn, мг/кг	Cu, мг/кг	As, мг/кг	Ni, мг/кг	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг	Cорг, %	Z _c
3	валов ые	4,5	0,57	17,1	1700	65,8	12,3	59,1	22,4	72,1	7,8	8,4
	подви жные		0,2	0,4	100	0,4	0,5	0,5	0,5	1		
4	валов ые	4,4	0,63	15,1	1500	78,2	12,4	49,8	15,3	63,6	12,2	7,9
	подви жные		0,2	0,4	100	0,4	0,5	0,5	0,5	1		
5	валов ые	4,6	0,59	19,4	1700	78,7	11,3	54,6	17,8	62,8	11,2	8,3
	подви жные		0,2	0,4	100	0,4	0,5	0,5	0,5	1		
6	валов ые	4,9	0,55	15,2	1267	62,1	11	48,4	19,1	62,3	10,2	6,5
	подви жные		0,2	0,4	100	0,4	0,5	0,4	0,5	1		
7	валов ые	5	0,39	16,7	664	34,5	11,6	85,6	14,5	87,2	1,6	6,4
	подви жные		0,2	0,5	100	0,4	0,5	0,7	0,5	1,3		
8	валов ые	5,1	0,55	16,2	854	55,8	13,6	57,4	18,3	104	4,5	7,7
	подви жные		0,2	0,4	100	0,4	0,5	0,4	0,9	5,8		
ОДК/ПДК* вал		-	1,0–2	50	1500	66	5	40	65	110	-	—
ОДК/ПДК подвижные				5	80–700	3	-	4	6	23		
Кларки, ИМГРЭ			0,5	8	850	20	-	40	10	10		

Расширенные результаты анализа с большим охватом территории почв возле объектов мониторинга проведены в 2025 году и представлены в приложении 4; валовые содержания элементов по данным РФА, в том числе Fe, — в приложении 5. Показано, что значения геохимических параметров почв за 2025 г. (см. приложение 4) 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 фиксируются содержания с превышением ОДК/ПДК.

Из таблицы 3.2.1 видно, что реакция почв кислая: pH 4,4–5,0 ед., а содержание валовых форм **Mn, Ni, Cu и As** превышает нормативы [130]. Локальные фоновые валовые содержания элементов (приложение 4) составили: Cu — 0,5–1,5 мг/кг, As — 1,2–1,5 мг/кг, Ni — 12–14 мг/кг, Mn — 300–310 мг/кг и характеризуют природный (естественный) уровень почв на ненарушенных территориях, сложенных делювиально-элювиальными суглинками без аномальных геохимических источников.

Были также определены содержания элементов на фоновых территориях: 4 точки на удалении 10 км от границы промплощадки в зоне отсутствия прямого техногенного воздействия и 3 точки на удалении 40 км в районе вахтового жилого посёлка Нючакан — всего 7 точек. Региональный геохимический фон Среднего Приангарья выше локального и составляет: для мышьяка — 2,8–4,0 мг/кг (при кларке почв мира по Виноградову А. П. 1,7 мг/кг), для никеля — 35–40 мг/кг, для марганца — 700–850 мг/кг, для меди — 20–25 мг/кг. Повышенный характер регионального фона по As для Иркутской области обусловлен распространением нижнепалеозойских (кембро-ордовикских) аргиллитов, алевролитов и глинистых сланцев, обогащённых мышьяком (до 10–30 мг/кг), которые слагают, в частности, поверхностные горизонты Ярактинского месторождения; привозной грунт с указанных карьеров использован для планировки промплощадки КГКМ и формирует на ней локальные положительные геохимические аномалии по As.

Связь повышенных содержаний As с привозным грунтом подтверждается фактическими данными. По материалам инженерно-экологических изысканий, выполненных до строительства УКПГ-2, содержание мышьяка в естественных почвах участка находилось ниже предела обнаружения применявшегося метода при pH 3,03–3,89, содержании Ni 23–35 мг/кг и Mn 118–164 мг/кг [131]. По данным производственного экологического мониторинга 2023 г. в контрольных пунктах в окрестностях площадки УКПГ-2 содержание As составляло 0,9–3,3 мг/кг (приложение 5). После вертикальной планировки площадки привозным грунтом валовое содержание As составило 11,0–13,6 мг/кг в 2024 г. (среднее 12,0 мг/кг, коэффициент вариации 6,8 %) и 7,3–15,0 мг/кг в 2025 г. (среднее 10,0 мг/кг, коэффициент вариации 19,1 %) (таблица 3.2.1, приложение 4). Уровень 10–13 мг/кг соответствует среднему содержанию As в глинистых

осадочных породах — аргиллитах и сланцах (13 мг/кг [132]); в отдельных разностях этих пород содержание As достигает десятков и сотен мг/кг [133]. Фоновое содержание As в почвах ненарушенных территорий в 3–4 раза ниже (2,8–4,0 мг/кг). В рапе мышьяк не обнаружен (таблица 3.1.1), а подвижная форма As по протоколам испытаний 2025 г. во всех пробах ниже нижней границы диапазона измерений (менее 0,5 мг/кг): мышьяк находится в прочносвязанной форме в минеральной фазе привозного грунта.

Суммарный показатель загрязнения почв Z_c рассчитан для каждого пункта опробования по формуле $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где $K_c = C_i/C_f$ — коэффициент концентрации элемента относительно фонового содержания, n — число элементов с $K_c > 1$ [134]. Фоновыми приняты региональные содержания As — 3,4; Ni — 37,5; Mn — 775; Cu — 22,5 мг/кг (средние значения приведённых выше интервалов) и фон территории для Zn, Pb, Cd и Co — 42; 18; 0,8 и 15 мг/кг соответственно. В 2024 г. Z_c по объектам мониторинга составляет 6,4–8,4 (таблица 3.2.1), в 2025 г. — 3,8–9,1 при среднем значении 6,6 (приложение 4). Среднее значение Z_c соответствует допустимой категории загрязнения почв ($Z_c < 16$) [134]; при этом по отдельным элементам — Mn, Ni и As — сохраняются превышения ОДК/ПДК.

С помощью ГИС наглядно показано, что на территории вахтового посёлка Нючакан (фоновый участок) почва имеет слабощелочной или щелочной характер, pH до 8 ед. На рисунке 3.2.1 представлено сравнительное распределение параметра pH с охватом территории месторождения и фона.

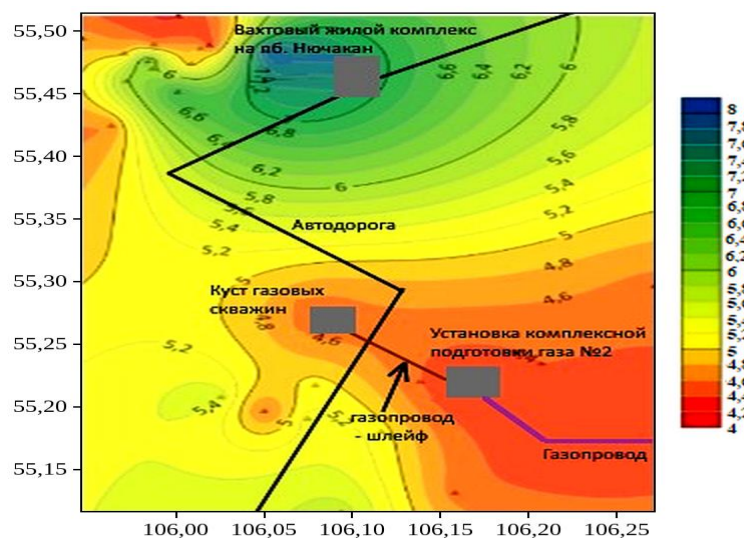


Рисунок 3.2.1 – Распределение значений pH на основе ГИС на территории промплощадки месторождения и в вахтовом поселке Нючакан

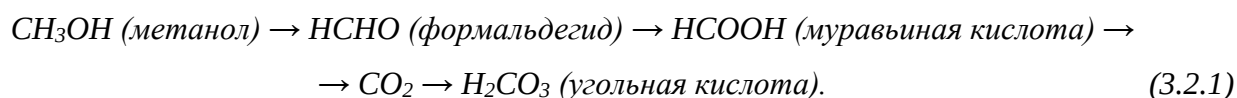
В работе был рассчитан геохимический фон для почв территории методом кларков по Ферсману А. Е. Он составляет: As — 10 мг/кг, Ni — 48 мг/кг, Mn — 683 мг/кг, Zn — 42 мг/кг, Co — 15 мг/кг, Cd — 0,8 мг/кг, Pb — 18 мг/кг, Cu — 19 мг/кг.

Рассчитаны коэффициенты накопления элементов Кк относительно мировых кларков:

- активное накопление выше кларков — для As (Кк = 2,09), Mn (Кк = 1,55) и Ni (Кк = 1,50);
- околосларковое накопление — для Cu (Кк = 1,19), Cd (Кк = 1,04) и Zn (Кк = 0,80);
- дефицит накопления — для Pb (Кк ≤ 1,1) и Co (Кк = 0,60).

– Расчет выполнен по медианным значениям наблюдений с учетом кларков почв мира по Виноградову А. П.: As — 5, Ni — 40, Mn — 850, Zn — 90, Co — 25, Cd — 0,5, Pb — 16, Cu — 55 мг/кг.

В рамках объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга установлено, что метанол поступает в почвы от всех промузлов и распространяется по всей территории промплощадки, являясь системным загрязнителем почв, закисляя территорию. Фактором-причиной понижения pH является почвенное окисление метанола с образованием кислот, в том числе угольной кислоты с pH от 3,5 до 4,5. Метанол разлагается почвенными микроорганизмами, последовательно окисляясь по схеме:



Формирование кислой среды, в свою очередь, является причиной усиливающейся десорбции металлов с Fe-оксидов, что и определяет механизм трансформации геохимических форм большинства элементов в подвижные. Кислые почвы могут повышать растворимость некоторых минеральных форм тяжелых металлов, усиливать их миграцию, способствовать образованию геохимических аномалий и тем самым формировать неуправляемую геоэкологическую опасность территории в зоне месторождения.

Построены корреляции распределения содержаний Mn, Ni, Cu и As в координатах «элемент – pH» и «элемент – C_{орг}».

Установлено, что для Mn, Ni и Cu указанные зависимости имеют хаотический характер распределения (рисунки 3.2.2–3.2.4). Низкие значения коэффициентов детерминации R² линейных трендов (для Mn — 0,036 и 0,425; для Cu — 0,018 и 0,288; для Ni — 0,002 и 0,078) подтверждают отсутствие выраженной зависимости валового содержания указанных металлов от буферных свойств почвы и доказывают преобладание техногенного источника поступления Mn, Ni и Cu – это механический износ металлоконструкций, сварочно-ремонтные работы, автотранспорт.

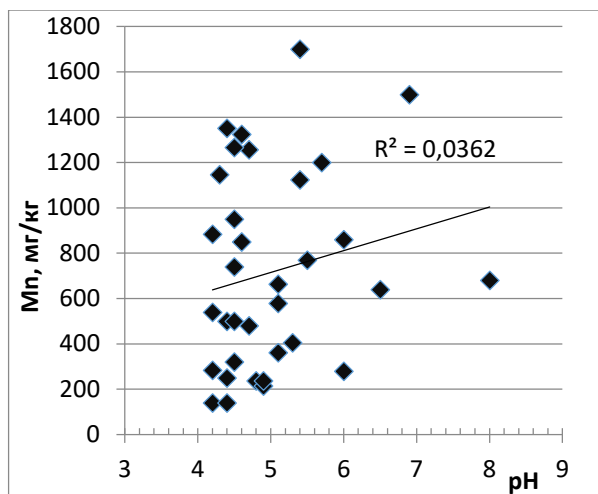
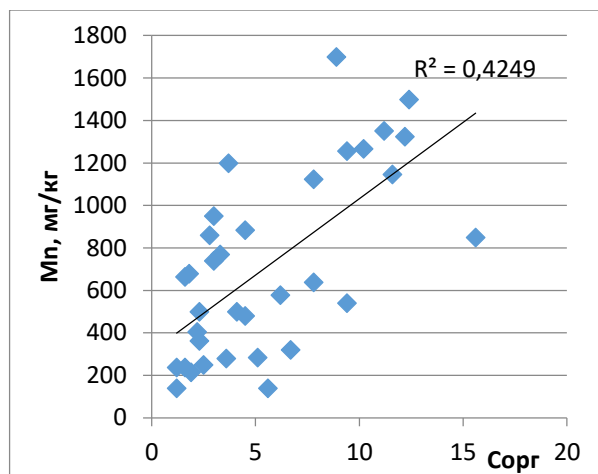


Рисунок 3.2.2 – Зависимость валового содержания Mn от pH и от Сорг

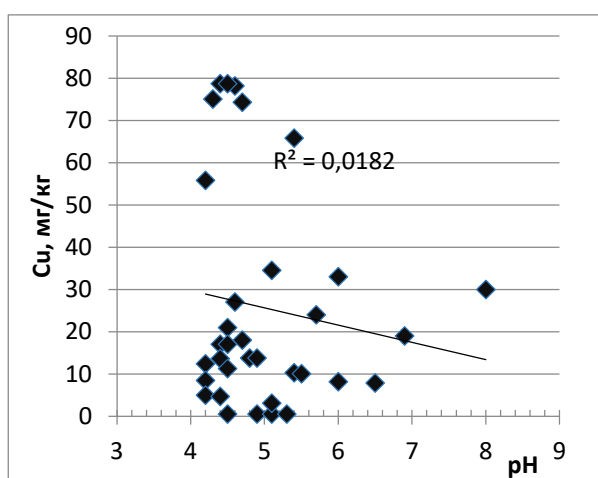
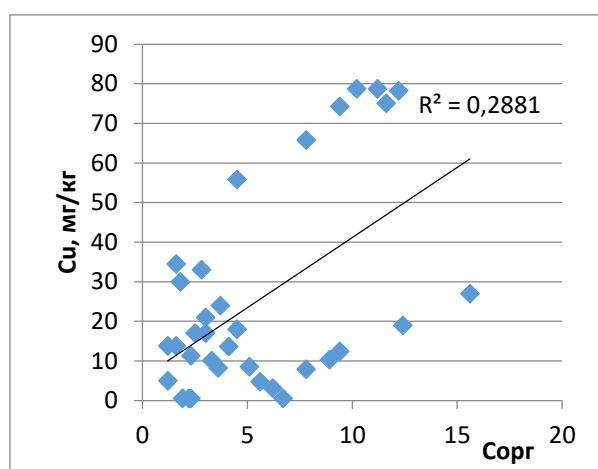


Рисунок 3.2.3 – Зависимость валового содержания Cu от pH и от Сорг

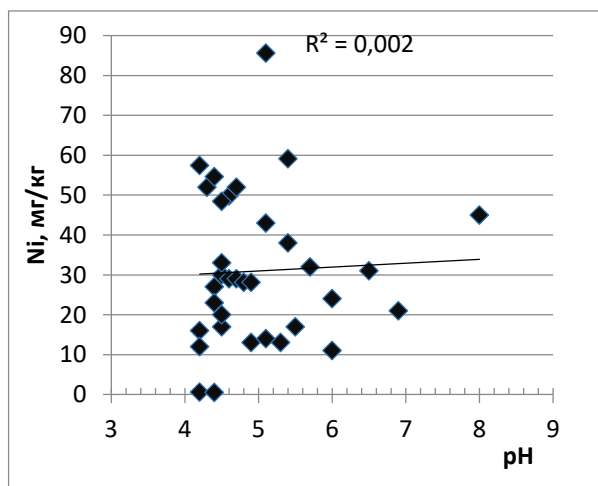
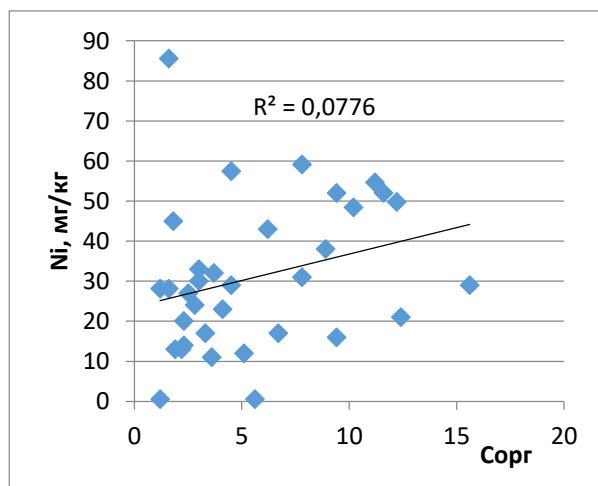


Рисунок 3.2.4 – Зависимость валового содержания Ni от pH и от Сорг

Мышьяк по степени экологической опасности относится к группе высокотоксичных канцерогенных элементов 1-го класса опасности. Поэтому в любых программах мониторинга состояния окружающей среды контроль содержания мышьяка как одного из приоритетных загрязнителей считается обязательным. Для валовых содержаний As установлено аномальное

распределение относительно буферных компонентов почвы ($C_{орг}$, pH) с формированием геохимических кластеров (рисунок 3.2.5) [135].

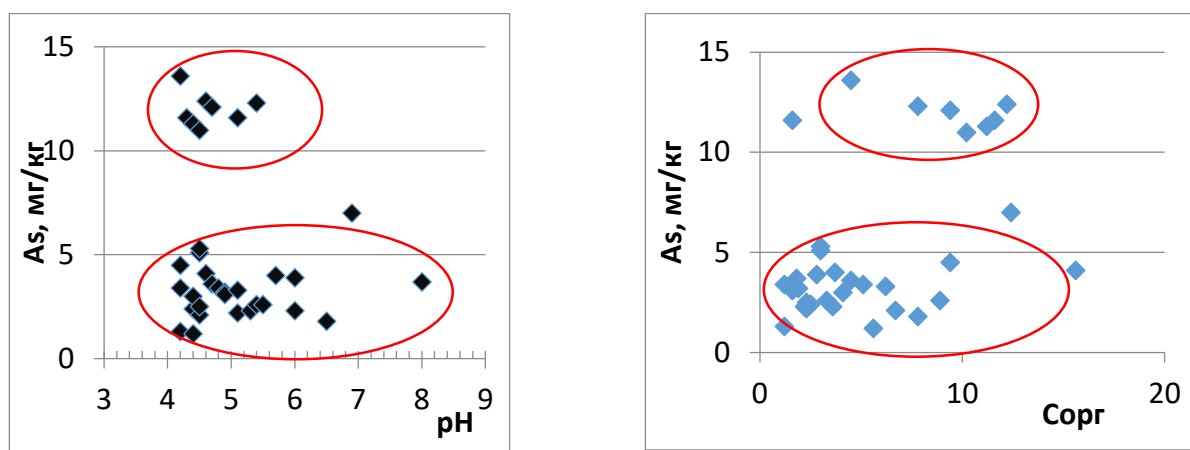


Рисунок 3.2.5 – Зависимость валового содержания As от pH и от $C_{орг}$

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. 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). Механизм перехода валовых форм в подвижные в кислых техноземах инициирован десорбцией с поверхности оксидов Fe, в частности оксоанионов (AsO_4^{3-}). Указанные эффекты не учитываются действующим экологическим контролем почв в зоне газодобычи.

Необходимо было также выявить поведение мышьяка в почве в присутствии большого количества железа (содержание Fe общ. достигает 45 000 мг/кг), что является характерной особенностью территории газоконденсатного месторождения.

Показано, что закрепление As на твердой железистой фазе принципиально отличается от поведения тяжелых металлов (рисунки 3.2.6–3.2.8).

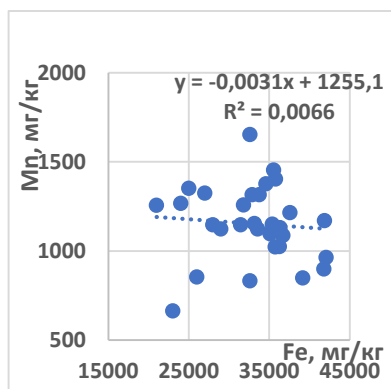


Рисунок 3.2.6 – Зависимость валовых содержаний Mn от Fe в почве

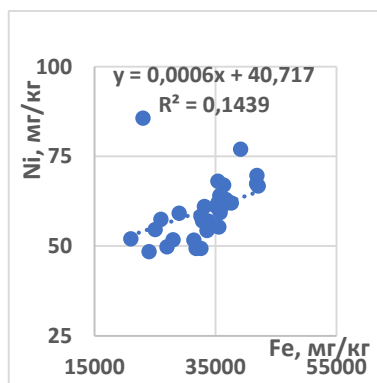


Рисунок 3.2.7 – Зависимость валовых содержаний Ni от Fe в почве

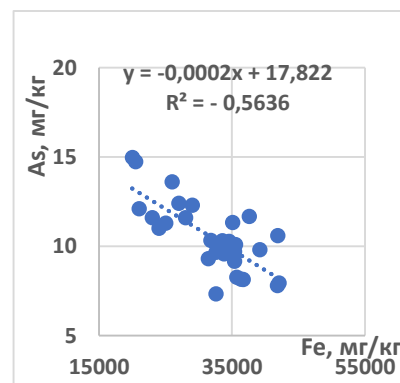


Рисунок 3.2.8 – Зависимость валовых содержаний As от Fe в почве

Установлена статистически значимая отрицательная корреляция между содержаниями в почве Fe и As с коэффициентом детерминации $R^2 =$ геопространственная (заметная связь по шкале Чеддока) (рисунок 3.2.8). Это означает, что As, в отличие от Mn и Ni, слабо сорбируется на твердой железистой фазе при pH = 4,5. Причиной наблюдаемого эффекта может быть высокая чувствительность этого металлоида к pH среды, так как он максимально закрепляется, например, для форм с высокой степенью окисления (V) в щелочной среде по сравнению с кислой [136, 137]. Известно, что за счет реакций окислительного выветривания As-содержащих минералов образуются неорганические соединения мышьяка преимущественно в форме As(III) и As(V), количественное соотношение в почве между которыми зависит от комплекса факторов – вещественных и окислительно-восстановительных характеристик почв, условий периодичности увлажнения и т. д. Необходимо также иметь в виду, что мышьяк имеет около 60 различных минеральных форм, из которых ~60 % составляют арсенаты, 20 % — сульфиды и сульфосоли, остальные 20 % — арсениды, арсениты, оксиды, силикаты и элементарный мышьяк. При выветривании сульфидные минералы мышьяка легко окисляются и переходят в арсенаты.

В последнее время вопрос о нормативах содержания мышьяка в почвах (ОДК/ПДК) активно обсуждается в научной среде в связи с противоречивостью мониторинговых данных по содержанию и миграции элемента в почвах. Средние концентрации As в верхнем слое незагрязненной почвы могут достигать 10 мг/кг [138], тогда как ОДК/ПДК мышьяка составляют 2–10 мг/кг в зависимости от типа почв, в том числе 5 мг/кг — для кислых суглинистых и глинистых почв при pH < 5,5 по СанПиН 1.2.3685-21 [124].

В то же время санитарно-гигиенические нормативы при экологическом контроле почвы на месторождении не учитывают формы нахождения As в почвах, но известно, что в кислой и слабокислой среде подвижность As незначительная, так как образующиеся арсенат-ионы закрепляются полуторными окислами Fe, Mn. Результаты исследований Качор О. Л. весьма наглядно демонстрируют специфическое поведение As в техногенных почвах [139]. Мониторинг и геохимическая миграция мышьяка при техногенном воздействии частично рассмотрены также в работах Путилина В. С., Галицкой И. В., Безугловой О. С., Коваля П. В., Гребенщиковой В. И. [140], Белоголовой Г. А., более подробно — в работах Водяницкого Ю. Н. [85].

Таким образом, характер распределения содержаний валовых и подвижных форм элементов от параметров состояния почвы может быть обусловлен разной чувствительностью металлов к их закреплению в почве на железистом геохимическом барьере.

В частности, выявлено слабое закрепление As в присутствии гидроокислов железа [141]. Причиной может быть разрушение различных форм первичных минералов мышьяка в кислой почве с извлечением из них катионов металлоида, которые с разной интенсивностью мигрируют в почвенном слое. Водяницкий Ю. Н. считает, что токсичность мышьяка зависит от степени

окисленности: трехвалентный мышьяк в 2–3 раза токсичнее, чем пятивалентный, который менее подвижен и прочнее адсорбируется. Определение химических форм мышьяка в почве, проведенное ранее другими авторами, показало, что в аэробных почвах он содержится в основном в форме анионов AsO_4^{3-} , в анаэробных — в форме AsO_3^{3-} . Все оксиды мышьяка водорастворимые, а, например, галогенарсенаты, наоборот, гидрофобны. Однако эти особенности не учитываются при оценке уровня загрязнения почв мышьяком в зоне месторождения.

Таким образом, выявлена природная аномалия по мышьяку в почвах газоконденсатного месторождения. Выявленные зависимости также не учитываются при экологическом контроле и производственном мониторинге территории в зоне газодобычи. Налицо необходимость разработки и внедрения системы техно-геохимического мониторинга в зоне горного техногенеза с учетом взаимообусловленных превращений валовых и подвижных форм тяжелых металлов и мышьяка и выявления источников его поступления в почвы промплощадки месторождения.

3.3 3D-моделирование взаимообусловленного распределения параметров

Для выявления причин наблюдаемых эффектов аномального распределения анализируемых элементов в почвенном слое получены 3D-модели взаимообусловленного поведения геохимических параметров для контролируемых элементов при обогащении почвы железом. Получены визуализированные трехмерные зависимости, которые выявили разную чувствительность элементов к pH среды и Сорг на фоне насыщения почв железом.

На рисунках 3.3.1–3.3.8 представлены 3D-модели распределения валовых форм элементов от pH и Сорг в присутствии большого количества железа (Fe) в почвенном слое (железистый барьер).

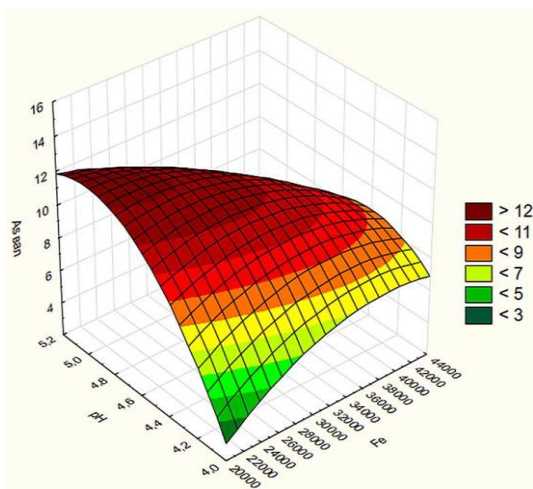


Рисунок 3.3.1 — 3D-модель взаимообусловленного распределения валовых As, Fe от pH почвы

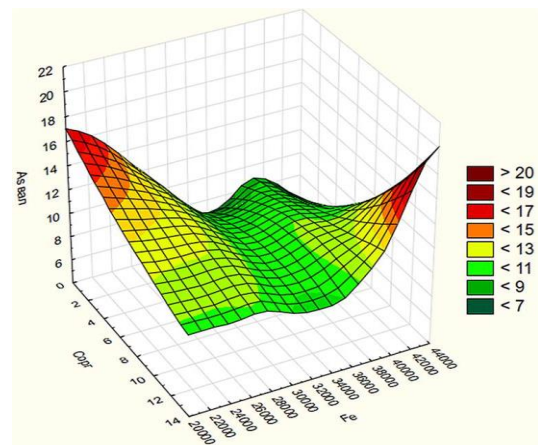


Рисунок 3.3.2 — 3D-модель взаимообусловленного распределения валовых As, Fe от Сорг почвы

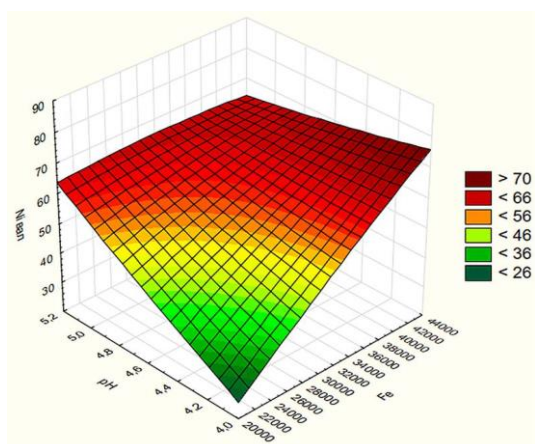


Рисунок 3.3.3 — 3D-модель взаимообусловленного распределения Ni, Fe от pH

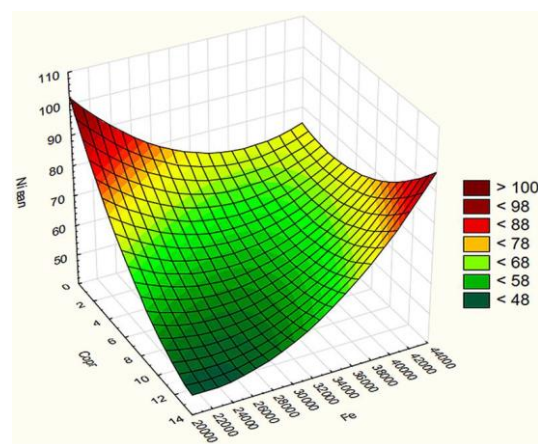


Рисунок 3.3.4 — 3D-модель взаимообусловленного распределения Ni, Fe от Corg

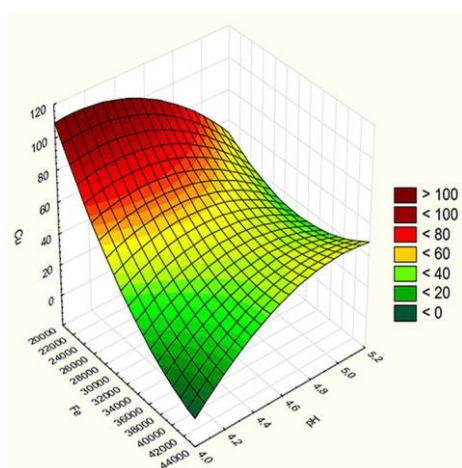


Рисунок 3.3.5 — 3D-модель взаимообусловленного распределения Cu, Fe от pH

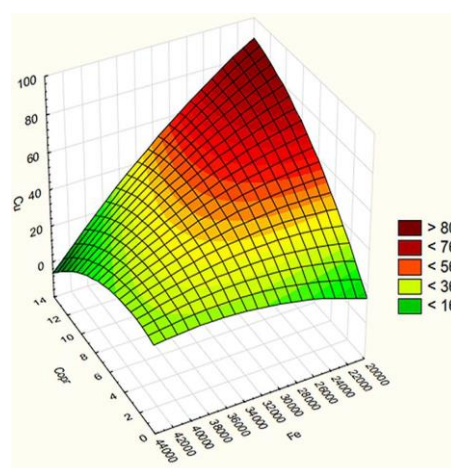


Рисунок 3.3.6 — 3D-модель взаимообусловленного распределения Cu, Fe от Corg

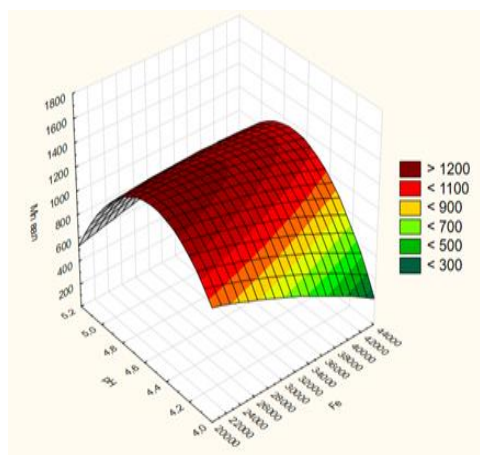


Рисунок 3.3.7 — 3D-модель взаимообусловленного распределения Mn, Fe от pH

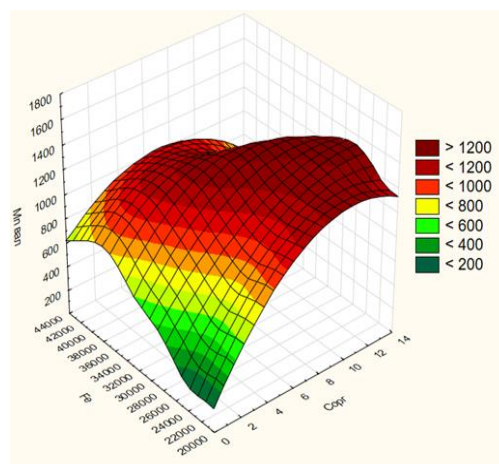


Рисунок 3.3.8 — 3D-модель взаимообусловленного распределения Mn, Fe от Corg

Сравнительный анализ моделей для As, Ni, Mn и Cu выявил различный характер распределения элементов в почве для валовых форм при обогащении ее железом в кислой среде. Отличие состоит в том, что Mn и Ni накапливаются на окислительном железистом барьере, тогда как содержание валового As с ростом Fe снижается ($R^2 = -0,564$) и образует геохимические кластеры.

Построены 3D-модели, показывающие динамику валовых и подвижных форм As, Ni, Mn и Cu к содержанию органического углерода $C_{орг}$, pH и $N_{общ}$ (рисунки 3.3.9–3.3.20). Выявленное различие в поведении элементов может означать высокую чувствительность каждого элемента к химической трансформации даже при небольших изменениях параметров, особенно к pH (рисунки 3.3.9, 3.3.12, 3.3.15, 3.3.18). В то же время зависимости содержаний As от $C_{орг}$ и $N_{общ}$ указывают на плавный характер трансформации.

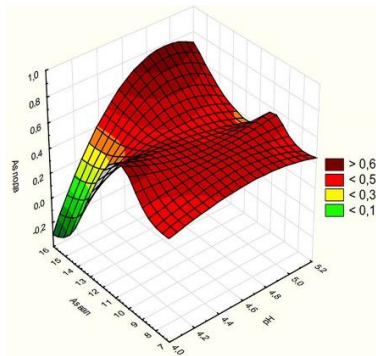


Рисунок 3.3.9 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм As от pH

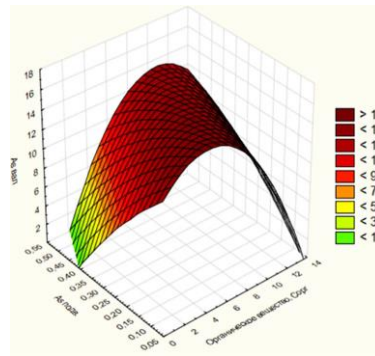


Рисунок 3.3.10 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм As от $C_{орг}$

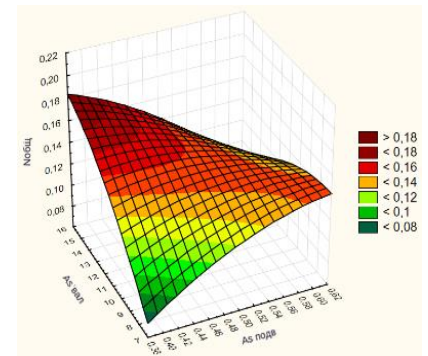


Рисунок 3.3.11 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм As от $N_{общ}$

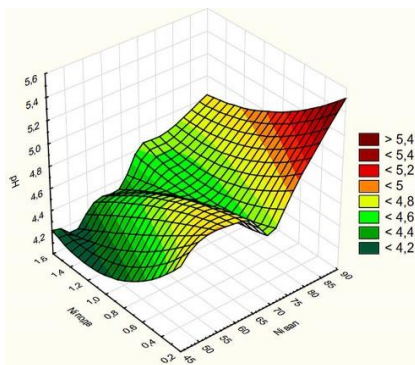


Рисунок 3.3.12 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Ni от pH

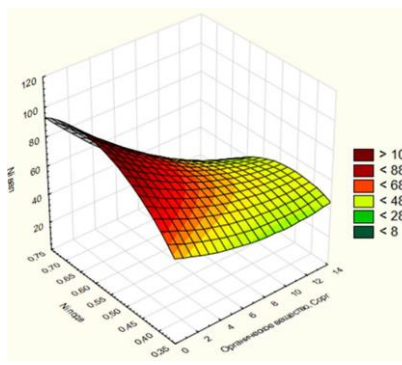


Рисунок 3.3.13 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Ni от $C_{орг}$

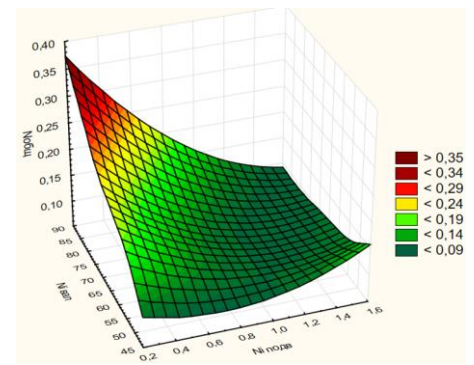


Рисунок 3.3.14 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Ni от $N_{общ}$

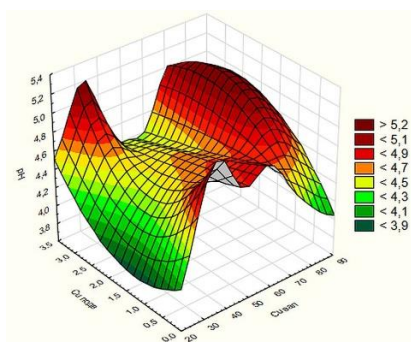


Рисунок 3.3.15 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Cu от pH

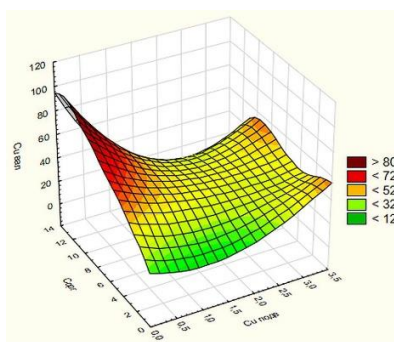


Рисунок 3.3.16 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Cu от $C_{орг}$

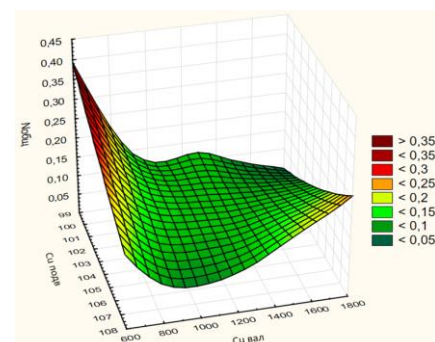


Рисунок 3.3.17 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Cu от $N_{общ}$

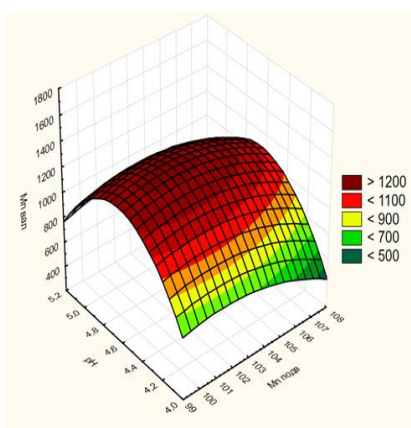


Рисунок 3.3.18 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Mn от pH

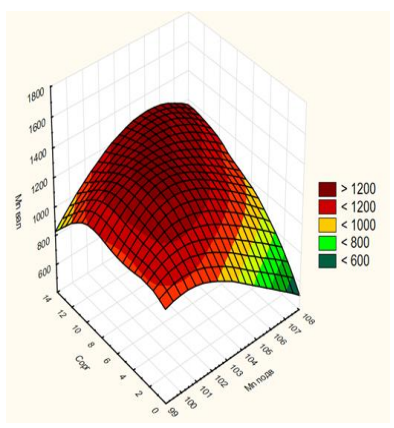


Рисунок 3.3.19 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Mn от $C_{орг}$

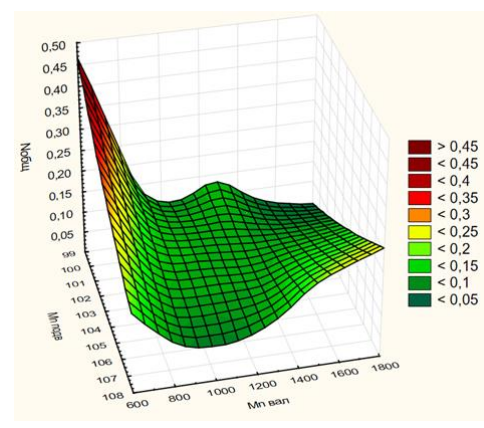


Рисунок 3.3.20 – 3D-модель распределения валовых и подвижных форм Mn от $N_{общ}$

3.4 Эколого-экономическая оценка превышения нормативов As, Mn и Ni

Превышение ОДК/ПДК в почвах промплощадки создаёт для недропользователя финансовые риски трёх видов: административный штраф за порчу земель по ч. 2 ст. 8.6 КоАП РФ — для юридических лиц от 40 до 80 тыс. руб. [142]; обязанность возместить вред, причинённый почвам (ст. 77, 78 Федерального закона № 7-ФЗ [143]); обязанность рекультивации загрязнённых земель. Плата за негативное воздействие на окружающую среду взимается за выбросы, сбросы и размещение отходов (ст. 16 Федерального закона № 7-ФЗ [143]) и на загрязнение почв не распространяется, поэтому основная часть возможных платежей приходится на возмещение вреда.

Размер вреда при химическом загрязнении почв исчисляется по Методике, утверждённой приказом Минприроды России от 08.07.2010 № 238 [144]:

$$УЩ_{загр} = CЗ \cdot S \cdot K_r \cdot K_{исп} \cdot T_x, \quad (3.4.1)$$

где C_3 — показатель степени загрязнения, зависящий от суммы отношений фактического содержания загрязняющих веществ к нормативу $\Sigma C_i/C_n$: 1,5 — при сумме менее 5; 2,0 — от 5 до 10; 3,0 — от 10 до 20 и далее до 6,0 — при сумме более 50; S — площадь загрязнённого участка, m^2 ; K_r — показатель глубины загрязнения (1,0 для слоя до 20 см); $K_{исп}$ — показатель в зависимости от категории земель и их целевого назначения (1,5 для земель лесного фонда, на которых размещены объекты обустройства КГКМ [131]); T_x — такса для исчисления размера вреда (500 руб./ m^2 для таёжной природной зоны). Степень загрязнения определяется по суммарному отношению всех загрязняющих веществ к их нормативам, а отдельный расчёт вреда по каждому веществу с последующим суммированием Методикой не предусмотрен [145].

Масштаб таких платежей за 2025 г. показывает, что суммы требований Росприроднадзора о возмещении вреда по почвам составляли 1,1–1,8 млн руб. за участки площадью 200–400 m^2 , а за участок площадью 2,4 га — до 1,05 млрд руб. [146].

Для промплощадки КГКМ площадью 80 га выполнена оценка возможного размера вреда по данным опробования 2025 г. (приложение 4); площадь промплощадки распределена поровну между 23 пунктами опробования. При оценке загрязнения мышьяком при использовании его ПДК 2,0 мг/кг без учёта типа почв размер вреда достигает 1 187 млн руб. При ОДК для кислых суглинистых и глинистых почв при использовании ПДК/ОДК 5 мг/кг при $pH < 5,5$, которая применима к почвам промплощадки с pH 4,4–5,1, размер вреда составляет 900 млн руб. Предотвращённый вред, связанный со снятием претензии по мышьяку, составляет 287 млн руб.

Результаты расчета по методике [144] при исходных данных по территории $S = 80$ га, $K_r = 1,0$, $K_{исп} = 1,5$, $T_x = 500$ руб./ m^2 и оценка возможного размера вреда почвам промплощадки КГКМ приведены в таблице 3.4.1.

Таблица 3.4.1 – Оценка возможного размера вреда почвам промплощадки КГКМ

Подход к оценке	Норматив A_s , мг/кг	$\Sigma C_i/C_n (A_s)$	C_3	Вред, млн руб.
Оценка по ПДК A_s без учёта типа почв	2,0	4,9–9,0	2,0	1 187
ОДК A_s для кислых суглинистых и глинистых почв	5,0	2,7–4,6	1,5	900
A_s исключён как унаследованная составляющая	—	1,2–2,6	1,5	900
Предотвращённый вред по мышьяку				287

Выводы по третьей главе

Выявлены превышения нормативов валового содержания элементов в почвах промплощадки газоконденсатного месторождения: Mn — до 1700 мг/кг, As — до 15 мг/кг, Ni — до 85 мг/кг, Cu — до 75 мг/кг. Значения геохимических параметров в 2025 г. практически сохраняют динамику 2024 г., что указывает на устойчивое загрязнение почвы. Для Mn, Ni и Cu зависимости валового содержания от pH и $C_{орг}$ имеют хаотичный характер ($R^2 = 0,002–0,425$), что свидетельствует о преобладании техногенного источника их поступления.

Для валовых содержаний As установлено аномальное распределение относительно буферных компонентов почвы ($C_{орг}$, pH) с формированием геохимических кластеров. Получены 3D-модели взаимообусловленного распределения валовых и подвижных форм As, Ni и Cu в зависимости от pH и $C_{орг}$ в условиях кислой среды и насыщения почвы железом ($Fe_{общ}$ до 45 000 мг/кг), обнаружившие различную активность (подвижность) элементов при постоянном закислении почв. По данным 2025 г. доля подвижной формы составляет для Mn 6–13 %, Cu 2–13 %, Ni 1–3 %, подвижный As находится на нижней границе диапазона определения (0,4–0,6 мг/кг).

Показано, что промстоки (рапа) газовой скважины не являются источником поступления Mn и As в почвы. Повышенные содержания Mn, Ni и Cu связаны с износом металлоконструкций, сварочно-ремонтными работами и автотранспортом, а повышенное содержание As — с привозным грунтом из карьеров Ярактинского месторождения (аргиллиты, глины и глинистые сланцы, обогащенные мышьяком): до строительства УКПГ-2 мышьяк в почвах площадки не обнаруживался, после планировки привозным грунтом его содержание составило 7,3–15,0 мг/кг. Это позволяет скорректировать иски органов государственного экологического контроля почв в отношении мышьяка.

Выявленные зависимости не учитываются действующим экологическим контролем, который оперирует только валовыми содержаниями. Для оценки состояния почв и выявления источника поступления элемента необходимо контролировать пару «валовая форма — подвижная форма».

Высокое содержание общего железа (до 45 000 мг/кг) обуславливает аккумуляцию Mn и Ni на окислительном железистом барьере, тогда как As слабо сорбируется на твердой железистой фазе (отрицательная связь Fe – As, $R^2 = -0,564$), что указывает на природную литохимическую аномалию по мышьяку. Рассчитаны коэффициенты накопления относительно кларков почв мира по Виноградову А. П.: активное накопление установлено для As, Mn и Ni ($K_k = 1,50–2,09$), околочларковое — для Cu, Cd и Zn ($K_k = 0,80–1,19$), дефицит накопления — для Pb и Co. Суммарный показатель загрязнения Zс, рассчитанный для каждого пункта опробования, составляет от 6,4 до 8,4 в 2024 г. и от 3,8 до 9,1 в 2025 г., что соответствует допустимой категории загрязнения; превышения ОДК/ПДК установлены по отдельным элементам — Mn, Ni и As.

Оценка размера вреда почвам по мышьяку показала, что предотвращённый вред по мышьяку составляет 287 млн. руб.

Получены новые геохимические и геопространственные зависимости, отсутствующие при оценке состояния почв при активной эксплуатации территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Это может являться научно обоснованной концепцией для разработки методики объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга.

ГЛАВА 4. Геопространственная неоднородность распределения и миграция элементов в почвах КГКМ

4.1 Необходимость прогнозирования миграции элементов в почвах горнопромышленной природно-техногенной системы при добыче газа

Газовая отрасль России представляет собой сложную систему, включающую в себя добычу, транспортирование, хранение и переработку газа. В состав единой системы газоснабжения входит более 200 газовых и газоконденсатных месторождений, более 170 тыс. км магистралей газопроводов, 250 линейных компрессорных станций, на которых установлено 3825 газоперекачивающих агрегатов общей мощностью 46 тыс. МВт, около 22 подземных хранилищ газа, 16 газоперерабатывающих заводов [147]. Состояние территории газоконденсатных месторождений находится под влиянием возрастающей активной разработки и связано с проблемой нарушения таёжных ландшафтов, рисками загрязнения почв продуктами бурения, добычи и транспортировки газа [148]. На территориях добычи газа возникает угроза устойчивой и подчас необратимой трансформации природных экосистем, прежде всего почв. Возникает горнопромышленная природно-техногенная система с доминированием техногенной составляющей. Причем границы такого воздействия значительно превышают территорию непосредственного района освоения [149].

Поэтому выявление и прогнозирование размеров негативного влияния районов газодобычи является актуальной и необходимой перспективной задачей для обнаружения наиболее уязвимых компонент территории при освоении месторождения и почв под влиянием горнопромышленного техногенеза [149, 150]. Разработка методов и технологий исследования, а также мониторинга горнотехнических условий освоения и эффективной эксплуатации месторождений полезных ископаемых нефти и газа является актуальной во всем мире.

Несмотря на ряд работ по изучению территорий в зоне добычи газа в РФ, исследование геохимических аспектов и проведение локального техно-геохимического мониторинга в высокочувствительных северных регионах, а также перспективы техногенного воздействия на почвы остаются актуальными [91, 123, 151]. Это особенно важно для вновь освоенных районов газовых месторождений, каким является расширенная территория Ковыктинского газоконденсатного месторождения и его новые объекты и кусты газовых скважин.

Важную роль играют такие геохимические процессы, как аккумуляция элементов-загрязнителей и их миграция в почве [152–154]. Необходимо учитывать, что при высоком уровне загрязнения, превышающем емкость почвы к связыванию токсикантов, может произойти накопление загрязняющих веществ в почвенном профиле [153, 154].

Мировые исследования и мониторинг состояния почв фиксируют опасный мировой тренд повышения концентраций тяжелых металлов, что наиболее остро наблюдается в зоне освоения недр и добычи полезных ископаемых. В результате на этих территориях формируются опасные эндогенные процессы, возникают локальные геохимические аномалии с высоким содержанием токсикантов, происходит формирование глобальной техногенно измененной геохимической структуры литосферы [155].

Важно отметить, что оценка состояния техногенных почв в зоне Ковыктинского газоконденсатного месторождения после начала активного функционирования и строительства новых кустов газовых скважин 2022–2025 гг. не проводилась. Вышеуказанные обстоятельства обусловили необходимость разработки объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга почв при эксплуатации газоконденсатного месторождения, который позволит выявить реальное воздействие каждого промузла на почвы и доминирующие загрязняющие вещества в привязке к конкретному объекту.

За период эксплуатации Ковыктинского месторождения в границах лицензионного участка задействовано более 7,5 тыс. км² земель, из которых непосредственно промплощадка УКПГ с кустами скважин, установками и коммуникациями занимает около 80 га. Интенсивная добыча газа и сопутствующее техногенное воздействие закономерно приводят к локальной деградации почвенного покрова именно в пределах промплощадки и прилегающей к ней буферной зоны. Необходимо учесть, что суглинистые почвы на территории сформировались как техноземы, которые распространены по всей промплощадке месторождения. Почвогрунты для обустройства и планировки всей промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения завозились с близлежащих карьеров и заимок в пределах Иркутской области, в частности, из Жигаловского и Казачинско-Ленского районов, а также из карьеров Ярактинского месторождения. Оценка химического состава завезенного грунта проводилась на основе проекта на строительство поисково-оценочной скважины № 2. Общий объем завезенного грунта составил до 50 000 тыс. м³.

Наиболее эффективным и наглядным приемом для выявления пространственного распространения загрязняющих веществ на новой территории месторождения является использование ГИС-технологий, позволяющее с высокой степенью информативности оценить изменение состояния почв, выявить ореолы и геохимические аномалии, пути миграции элементов, прогнозировать развитие ситуации в условиях горнопромышленного техногенеза [106, 108, 109, 138, 156].

4.2 Динамика интенсивности освоения месторождения и пространственная ГИС-оценка территории

За период исследований, включая официальные данные за 2019 г. и по 2023–2025 годы настоящих исследований, проведен сравнительный анализ аналитических определений содержаний тяжелых металлов в почвах в обозначенных на картах пунктах регулярного пробоотбора по всем указанным технологическим объектам (приложения 4, 5).

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 (рисунок 4.2.1). Выбор этих элементов обусловлен претензиями органов экологического контроля и фиксируемым превышением их содержаний в почвах промплощадки.

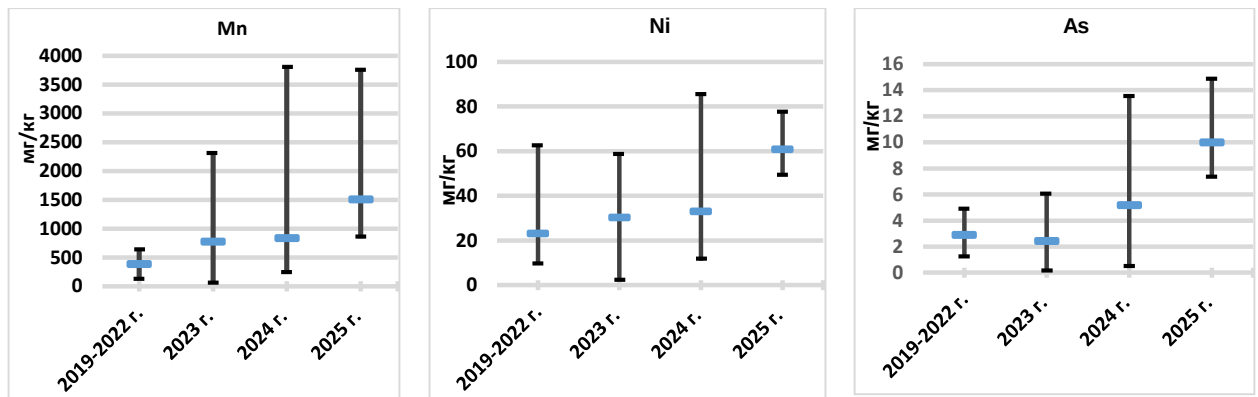


Рисунок 4.2.1 – Диаграммы интенсивности освоения месторождения и содержаний Mn, Ni, As (валовых форм) в почвах промплощадки относительно средних значений

Так, период 2019–2022 гг. соответствует этапу опытно-промышленной эксплуатации: установка и пусконаладка основного оборудования; промышленная эксплуатация газовых скважин еще не велась.

2023 г. — этап интенсивных сварочно-монтажных работ и компоновки оборудования.

2024 г. — период наращивания производственных мощностей и максимальной интенсивности добычи; интенсивные маршруты 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: марганец аккумулируется в зоне газосборных коллекторов и трубопроводов, где ежедневно 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 (химический состав покрытий электродов известен).

Поступление Ni в почвы обусловлено как сварочно-ремонтными работами, так и истиранием металлических деталей автотранспорта: ежедневно по промплощадке проходит до 300 единиц транспорта, до 100 грузовых автомобилей и до 50 единиц спецтехники, что эквивалентно 3000–9000 машин в месяц.

Анализ промузлов и выделяемых ими в окружающую среду веществ (включая рапу) не выявил загрязнения почв 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, формируя геохимическую мышьяковистую аномалию.

Таким образом, анализ динамики распределения загрязнителей на рисунке 4.2.1 согласуется с темпами освоения территории и нарастающим техно-геохимическим воздействием на почвы территории КГКМ [157].

На основе пространственной привязки геохимических данных к узлам территории месторождения построены распределения доминирующих элементов-загрязнителей в почвенном слое посредством ГИС. ГИС на основе пространственной привязки геохимических данных к территории представляет собой многофункциональный инструмент комплексной оценки ее состояния и прогнозирования устойчивости территорий к негативному экологическому воздействию [158, 159].

На примере 2025 года представлены результаты картирования доминирующих элементов Mn, Ni, As, превышающих ОДК/ПДК, и направления их миграции (рисунки 4.2.2–4.2.4). Распределение Cu приведено на рисунке 4.2.5.

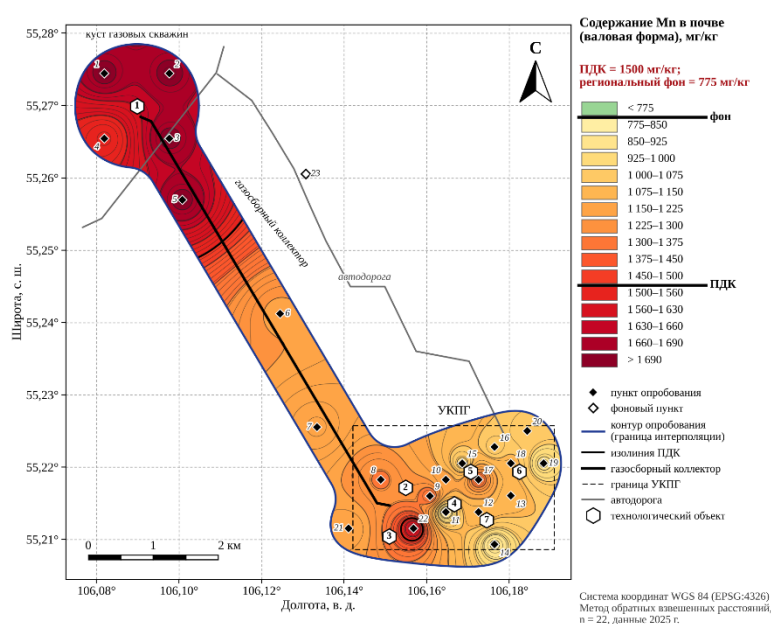


Рисунок 4.2.2 – Распределение валовых форм Mn (мг/кг) в почвах на территории КГКМ

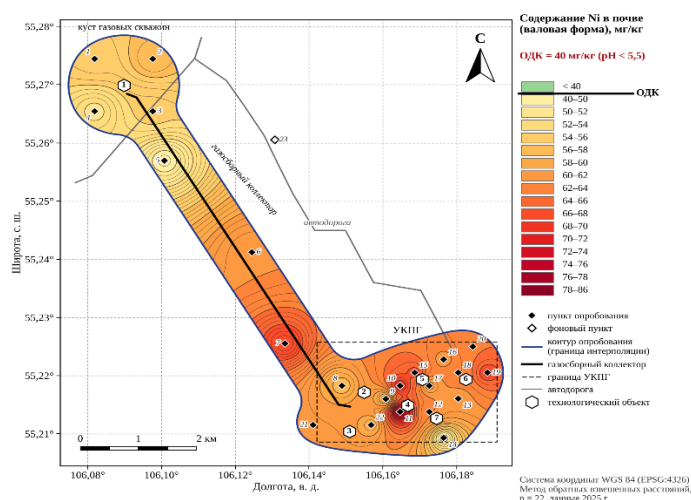


Рисунок 4.2.3 – Распределение валовых форм Ni (мг/кг) в почвах на территории КГКМ

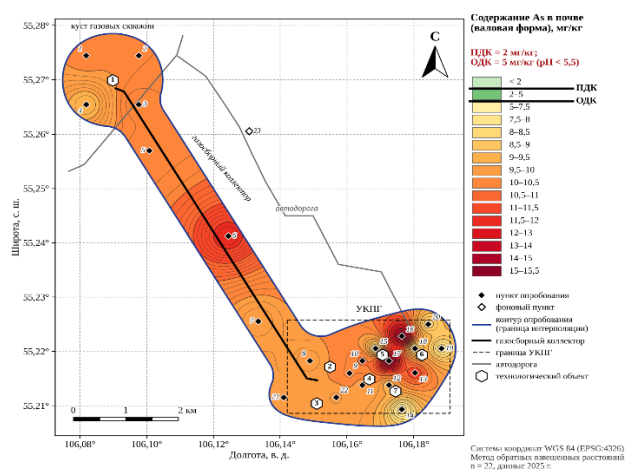


Рисунок 4.2.4 – Распределение валовых форм As (мг/кг) в почвах на территории КГКМ

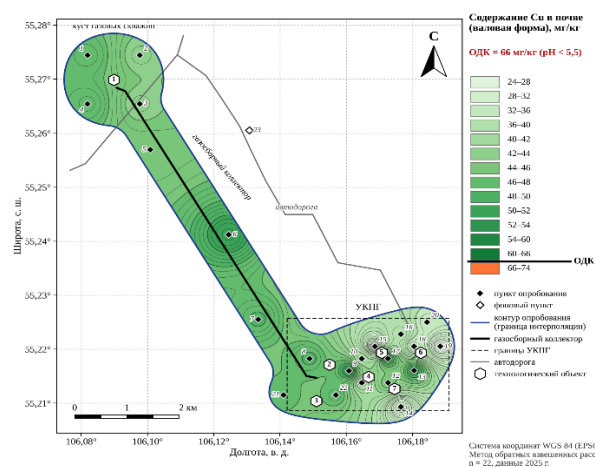


Рисунок 4.2.5 – Распределение валовых форм Cu (мг/кг) в почвах на территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения

Пояснения к рисункам 4.2.2–4.2.5. 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.

Анализ совмещения распределений элементов посредством ГИС с цифровой моделью рельефа выявил устойчивую корреляцию между высотной отметкой и валовыми содержаниями Mn, Ni, Cu в почвах: на участках с высотой 1050–1100 м (плакорные позиции куста скважин) преобладают техногенные потоки, тогда как на участках 850–950 м (склоны и подножия) преобладает аккумуляция за счёт водной миграции.

Таким образом, пространственное распределение техногенных элементов Mn, Ni в почве территории месторождения преимущественно связано с технологическими и производственными процессами, регулярной сваркой, а также потерями при истирании металлических деталей большого количества автотранспорта.

В случае As превышение ОДК/ПДК может быть обусловлено наследованием геолого-геохимической особенности Прибайкальской природной территории с повышенным содержанием этого металлоида в составе привозного Ярактинского грунта для планировки территории [140].

Полученные геопространственные распределения элементов согласуются с результатами геохимического анализа почв, подтверждают концепцию мониторинга почв на основании геохимических параметров в привязке к технологическим узлам и позволяют дифференцировать техногенные источники поступления элементов.

Выводы по четвертой главе

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.

Получены наглядные пространственные распределения доминирующих загрязнителей Mn, Ni, As посредством ГИС, выявлены направления их миграции. Анализ пространственного распределения позволил не только оценить состояние территории в зоне промобъектов, но и прогнозировать геохимическую обстановку территории освоения газоконденсатного месторождения на основании параметров почв [160].

Интеграция распределения элементов на основе ГИС с результатами геохимических исследований является эффективным инструментом комплексной оценки территории в зоне техногенеза и служит основой для создания системы эффективного объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга при добыче газа.

ГЛАВА 5. Цифровая оптимизация расхода метанола в газоконденсатной скважине

5.1 Проблема гидратообразования при добыче газа

При добыче газа существует серьезная проблема закупорки трубопроводов газовыми гидратами (рисунок 5.1.1). Борьба с их образованием на газоконденсатных месторождениях в настоящее время является одной из весьма актуальных, острых и нерешенных технологических задач [161–163]. При газодобыче наличие влаги в газе и снижение температуры при его движении в скважинах создают условия образования кристаллов гидратов и их отложения на стенках подъемных труб.



Рисунок 5.1.1 – Газогидратная пробка

Газовые гидраты возникают при термобарических условиях при бурении, когда природные газы, соединяясь с водой, образуют структуры, которые аккумулируются в стволе буровой скважины, шлейфах, трубах и могут формировать протяжённые ледяные пробки [125, 164, 165]. Газовые гидраты — это соединения, разновидность клатратов, образующихся из воды и низкомолекулярных газов (метана, этана, углекислого газа) при специфических термобарических условиях [166, 167]. Молекула газа попадает внутрь «клетки» из молекул воды, тем самым образуя молекулу гидрата (рисунок 5.1.2) [125, 164].

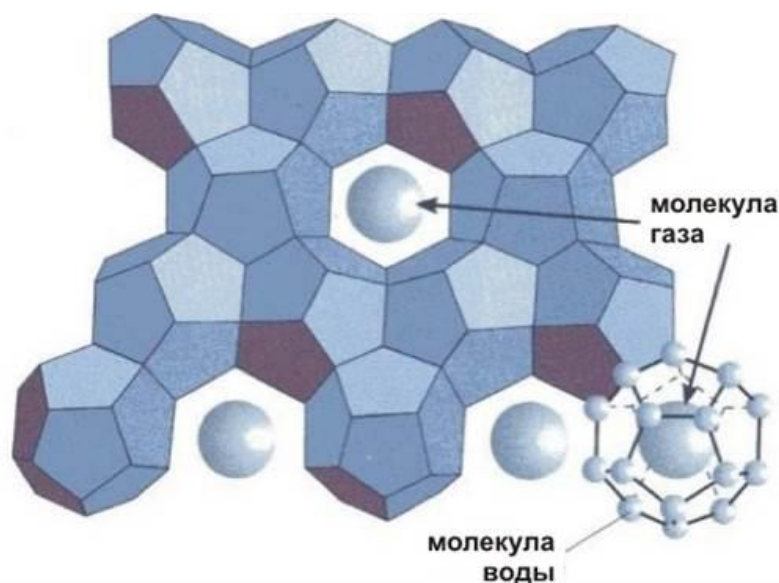


Рисунок 5.1.2 – Структура газового гидрата

Технологические проблемы эксплуатации систем добычи газа: гидратообразование в призабойной зоне пласта и стволах скважин, образование льда в промысловых трубопроводах и др. обуславливают поиск новых подходов к предупреждению гидратообразования с реагентами низкой дозировки. В развитие способов предупреждения образования газовых гидратов существенный вклад внесли отечественные исследователи: Алиев А. Г., Аршинов А. С., Бекиров Т. М., Бондарев Э. А., Булейко В. М., Бурмистров А. Г., Бухгалтер Э. Б., Григорьев Б. А., Гриценко А. И., Гухман Л. М., Дегтярев Б. В., Истомин В. А., Касперович А. Г., Квон В. Г., Колодезный П. А., Коротаев Ю. П., Кульков А. Н., Кулиев А. М., Лакеев В. П., Лутошкин Г. С., Макогон Ю. Ф., Малышев А. Г., Мусаев Р. М., Ненахов В. А., Нестеров А. Н., Саркисянц Г. А., Сайфеев Т. А., Семенов А. П., Семин В. И., Ставицкий В. А., Тупысев М. К., Халиф А. Л., Хорошилов А. В. и многие другие.

Поэтому активная разработка способов и методов снижения газогидратообразования при добыче газа — это актуальная задача в нефтегазовой отрасли. Формирование газовых кристаллогидратов усиливается с понижением температуры, особенно в суровых условиях Сибири и Севера, приводя к уменьшению проходного сечения трубопроводов, что сильно снижает эффективность добычи газа и снижает рентабельность многих месторождений [161, 168].

Для подавления образования газовых гидратов используются следующие приемы:

Химические методы — *термодинамические ингибиторы* (например, метанол, этиленгликоль, моноэтиленгликоль). Они смещают кривую равновесия гидратообразования в сторону более низких температур и высоких давлений, предотвращая образование гидратов.

— *кинетические ингибиторы* замедляют процесс гидратообразования, что позволяет углеводородной продукции добываться и транспортироваться без осложнений.

– *антиагломеранты* — снижают адгезию кристаллов гидрата и предупреждают их налипание на стенки оборудования; низкодозируемые ингибиторы (LDHI) подходят для обработки продукции скважин с высоким содержанием воды.

– *комплексные ингибиторы*, включающие полисахариды (например, арабиногалактан), одноатомные спирты, гликоли и другие компоненты.

Технологические методы — поддержание температуры потока газа выше температуры гидратообразования; теплоизоляция трубопроводов; подбор режима эксплуатации, локальный подогрев; снижение давления в системе сбора и транспорта газа ниже равновесного давления гидратообразования; осушка газа — удаление из него части влаги, что понижает точку росы и риск образования гидратов; устранение резких перепадов давления, которые могут вызывать снижение температуры газа и образование гидратов; систематическое удаление жидкости с помощью конденсатосборников или дренажных патрубков.

Физические методы — механическое удаление гидратов (скребкование или нагрев участка с гидратами); воздействие физическими полями (акустическими, СВЧ); использование низкочастотных упругих колебаний.

Кроме того, разрабатываются новые направления исследований:

- поиск более экологичных и эффективных ингибиторов — альтернативы метанолу;
- разработка многокомпонентных ингибиторов;
- кинетические исследования процесса образования гидратов;
- разработка систем оперативного управления предотвращением гидратообразования (СОУ ПГО), например регулирование подачи ингибитора в зависимости от температуры и давления газа в реальном времени; применение водорастворимых полиуретанов; использование гидрофобизирующих кремнийорганических жидкостей; индукционный нагрев труб как *метод предварительного подогрева газа*.

На сибирских газоконденсатных месторождениях, включая Ковыктинское ГКМ, для снижения газогидратообразования, повышения эффективности добычи газа и непрерывного обеспечения транспорта газового потока в трубах с месторождения все еще используется метанол. Это во многом определяется дешевизной его получения, в частности, из природного газа: стоимость сырья для производства одной тонны метанола в США — 113 долл., в Иране — 97 долл., в России — 65 долл. за тонну. Температура замерзания метанола — минус 97,8 °С.

Диаграммы гетерогенного состояния системы «газ — вода» представлены на рисунках 5.1.3, 5.1.4. Константы равновесия и графоаналитические параметры по уравнению Баррера — Стюарта позволяют оценивать условия образования гидратов по фазовой диаграмме равновесия или гетерогенного состояния.

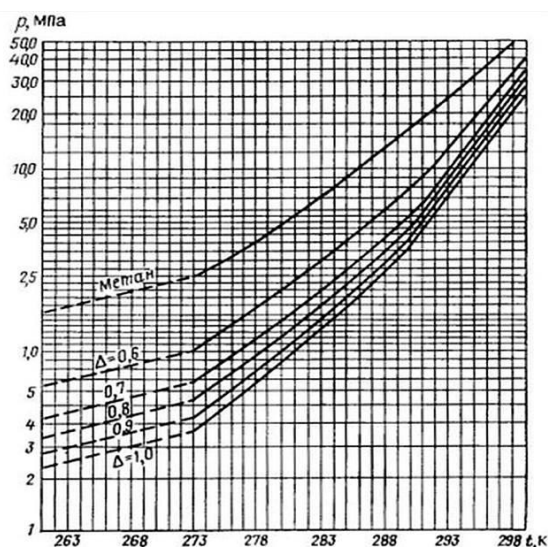


Рисунок 5.1.3 – Условия образования гидратов природного газа в зависимости от температуры и давления

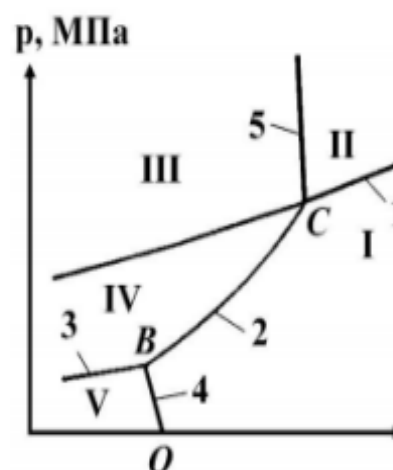


Рисунок 5.1.4 – Фазовое состояние гидратов различной относительной плотности

Гидраты существуют при условиях, соответствующих областям III, IV на графике. На диаграмме в пределах приведённых величин давления и температуры квадрупольными являются точки A, B, C и D. Точка C является верхней критической точкой образования гидратов, точка B – нижней. Эти точки называются также инвариантными, так как в них существуют все четыре фазы: гидрат, газообразный гидратообразователь, гидратообразователь в воде, лёд.

Основным требованием к таким химическим реагентам, кроме самого эффекта ингибирования, является минимизация потерь ингибитора в призабойной зоне скважины [126, 169]. В настоящее время для подавления газогидратообразования в основном применяют распространенный недорогой, но токсичный ингибитор – метанол, хотя уже ведутся разработки более щадящих и экологичных реагентов [165, 170].

В свою очередь при использовании метанола существуют недостатки:

- токсичность;
- пожароопасность, взрывоопасность;
- использование метанола с недостаточной концентрацией приводит к ускоренному росту газогидратов;
- смешивание метанола с сильноминерализованной водой приводит к солеотложениям;
- в ходе регенерации не происходит полное восстановление метанола;
- метанол имеет повышенный удельный расход из-за хорошей растворимости в газовой фазе.

Введение ингибиторов гидратообразования, в частности метанола, в поток влажного газа изменяет энергию взаимодействия между молекулами воды. Вследствие этого снижается

давление паров воды над её поверхностью, что приводит к уменьшению равновесной температуры гидратообразования. Воздействуя непосредственно на отложения гидратов, метанол снижает давление паров воды над ними и вызывает постепенное разложение гидратов.

5.2 Цифровая трансформация газодобывающей отрасли

Политика современных компаний газодобывающей отрасли в настоящее время во многом реализуется при помощи активного использования современных информационно-цифровых технологий с целью повышения рентабельности месторождений (цифровая трансформация) [171]. В настоящее время основные отечественные нефтегазодобывающие компании постоянно внедряют цифровизацию, что способствует повышению рентабельности нефтегазовых компаний [172]. Например:

- ЛУКОЙЛ осуществляет цифровое развитие в соответствии с «Информационной стратегией Группы „ЛУКОЙЛ“ до 2030 года», включающей программы: цифровые двойники, экосистема, цифровой персонал и роботизация;

- ПАО «Газпром нефть» проводит политику цифровой трансформации на всех этапах деятельности — от геологоразведки до реализации продукции. Цифровые решения сосредоточены на пластовом и проектном уровне;

- ПАО «ТАТНЕФТЬ» – цифровые технологии охватывают все процессы: сбор и обработку геолого-технологической информации; создание и актуализацию геолого-гидродинамических моделей, принятие решений по выбору оптимальных геолого-технических мероприятий и их реализации.

- «Роснефть-2022» – создан Комплексный план цифровизации компании, включающий: «цифровое месторождение», «цифровой завод», «цифровая цепочка поставок», «цифровая АЗС»; компания использует цифровые двойники, IoT и Big Data для мониторинга и управления буровыми операциями.

- ПАО «Газпром» — в развитие нормативно-методической базы (СТО Газпром 2-3.3-1242-2021, Р Газпром) по Чаяндинскому и Ковыктинскому ГКМ ведутся работы по созданию системы автоматизированных измерений и дистанционной передачи данных геотехнического мониторинга объектов добычи газа на месторождениях Крайнего Севера, а также по риск-ориентированному управлению промышленной безопасностью. Эти разработки формируют диспетчерский контур и эксплуатационную надёжность объектов, *однако напрямую не решают задачу управляющего пересчёта расхода ингибитора в скважине по перекрёстным сочетаниям технологических параметров.*

Несмотря на общую тенденцию оцифровки масштабного производства, эффективное управление локальными горнотехническими объектами и узлами в процессе их

функционирования связано с неизбежными отклонениями реальных технологических параметров от запроектированных, особенно в отношении скважин [173]. Возможность эффективно регулировать существующий несовершенный технологический уклад конкретных промышленных установок позволяют «цифровые двойники» [172, 174].

Видно, что недостаточно проработано цифровое управление расходом *ингибитора в скважине*. Последнее особенно важно в контексте добычи газа с самого начального низового звена масштабного горного производства — работы отдельной газодобывающей скважины и обоснованной подачи ингибитора в целях экологической безопасности от неучтенных потерь.

Анализ параметров, режима подачи ингибитора и его неучтенных потерь, которые приводят к загрязнению почв на промплощадке месторождения, представляет собой не только технологический аспект проблемы, но также диктует необходимость постоянного мониторинга.

5.3 Разработка алгоритма цифровой оптимизации расхода метанола в рамках объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга

Оптимизация работы начального звена — скважин и, в частности, контроль за подачей ингибитора газогидратообразования, а также подбор и вариативность ключевых технологических параметров — это важнейший производственный технологический этап, обуславливающий эффективность всей газодобычи [162, 165]. Цифровые инструменты работы добывающей скважины могут способствовать выработке в перспективе отраслевых стандартов и созданию единой комплексной системы цифрового технологического мониторинга.

С целью разработки алгоритма оптимизации расхода метанола был проведен суточный детальный анализ режима и контролируемых технологических параметров работы одной из скважин куста газоконденсатного месторождения (фиксация значений через каждый час) при использовании метанола в качестве ингибитора. Это позволило определить особенности и недостатки взаимообусловленного распределения показателей технологического процесса. Проводимые в работе исследования в рамках объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга выявили, что загрязнение почвы метанолом является системным, т. е. поступает практически от каждого производственного узла при добыче и подготовке газа вплоть до распределения в магистраль. Поэтому снижение потерь метанола будет также способствовать решению экологической задачи на территории месторождения.

При выполнении этого этапа работы учитывалось также обязательное условие адаптации полученных результатов для интегрирования в общую систему автоматизированного управления технологическим процессом на реальном объекте газодобычи.

Процесс подачи ингибитора в скважину производится непрерывно и заключается в его нагнетании насосом из расходной емкости в скважину. Схема применяемого на месторождении

процесса подачи метанола в газовую скважину и на установку комплексной подготовки газа показана на рисунке 5.3.1.

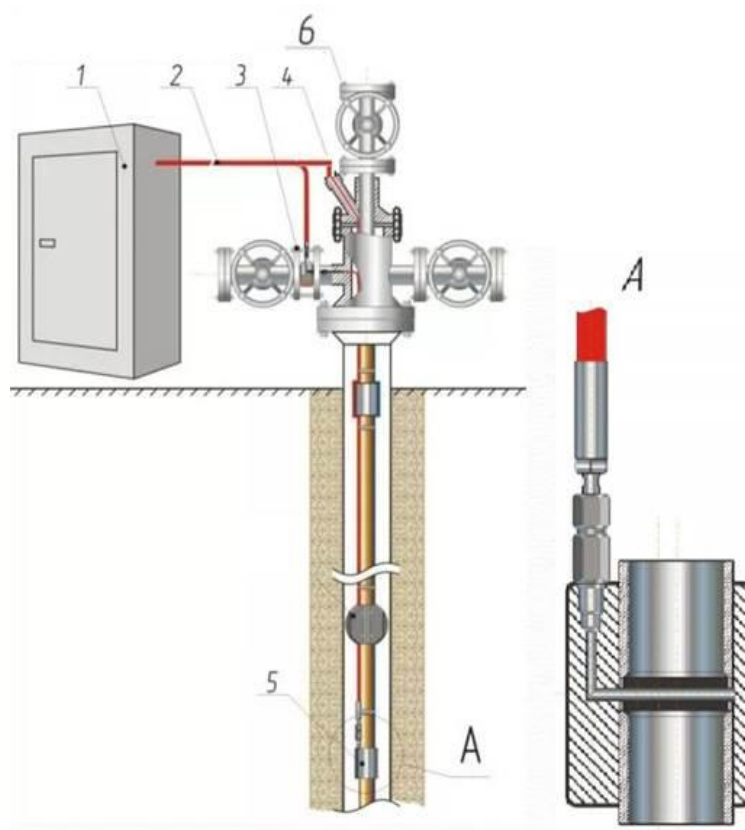


Рисунок 5.3.1 – Принцип подачи ингибитора в скважину. 1 – дозирующее устройство и насос; 2 – метанолопровод; 3 – точка подачи метанола в скважину (в инструментальный фланец); 4 – точка подачи метанола в скважину (в клапан подземный ингибиторный); 5 – клапан подземный ингибиторный; 6 – скважина

Алгоритм строится в логике системного эмпирического подхода: суточная регистрация дебита газа Q (тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$), давления на буфере P (МПа), температуры газа T ($^{\circ}\text{C}$) и фактического расхода метанола ($\text{кг}/\text{ч}$) и сопровождается корреляционно-регрессионным анализом, 3D-моделированием и статистической обработкой данных в STATISTICA 10 и MS Excel. Результаты адаптированы под интеграцию в действующую АСУ ТП газодобывающего предприятия, что обеспечивает возможность тиражирования модели на типовые скважины газоконденсатных месторождений Сибири.

В таблице 5.3.1 приведены значения технологических параметров работы газовой скважины. Из таблицы видно, что распределение параметров работы скважины не согласуется с фактическим расходом метанола, то есть линейная зависимость отсутствует и наблюдается повышенное потребление метанола. Так, в 8, 10, 21, 22, 23 и 24 ч обнаружено повышение расхода метанола с 31 до 37 $\text{кг}/\text{ч}$, что не согласуется с контролирующими технологическими показателями, способными влиять на гидратообразование.

Таблица 5.3.1 – Технологические параметры работы газоконденсатной скважины

Время измерения t, ч	Дебит скважины Q газа, тыс. м ³ /ч	Давление на буфере скважины P, МПа	Температура газа на буфере скважины T, °C	Расход метанола фактический Q мет, кг/ч
1	20,79	13,87	18,1	32
2	21,09	13,76	18,3	30
3	20,74	13,23	18,2	33
4	20,83	13,35	18,4	32
5	21,12	13,70	18,5	30
6	20,90	13,68	18,5	31
7	20,88	13,64	18,5	32
8	20,67	13,11	17,8	34
9	21,15	13,50	18,3	33
10	20,68	13,44	17,9	32
11	20,99	13,78	18,0	30
12	20,82	13,76	18,3	31
13	21,03	13,83	18,4	30
14	20,92	13,75	18,4	30
15	20,96	13,69	18,4	32
16	21,02	13,86	18,5	29
17	20,79	13,55	18,4	33
18	20,81	13,63	18,3	34
19	20,83	13,62	18,2	33
20	20,90	13,68	18,2	32
21	20,80	13,43	17,7	35
22	20,77	13,47	17,6	36
23	20,81	13,51	17,6	34
24	20,79	13,45	17,5	37

Построена 3D-модель взаимообусловленного распределения ключевых технологических параметров в работающем режиме скважины, которая также выявила нелинейный и несогласованный режим параметров и расхода метанола (рисунок 5.3.2).

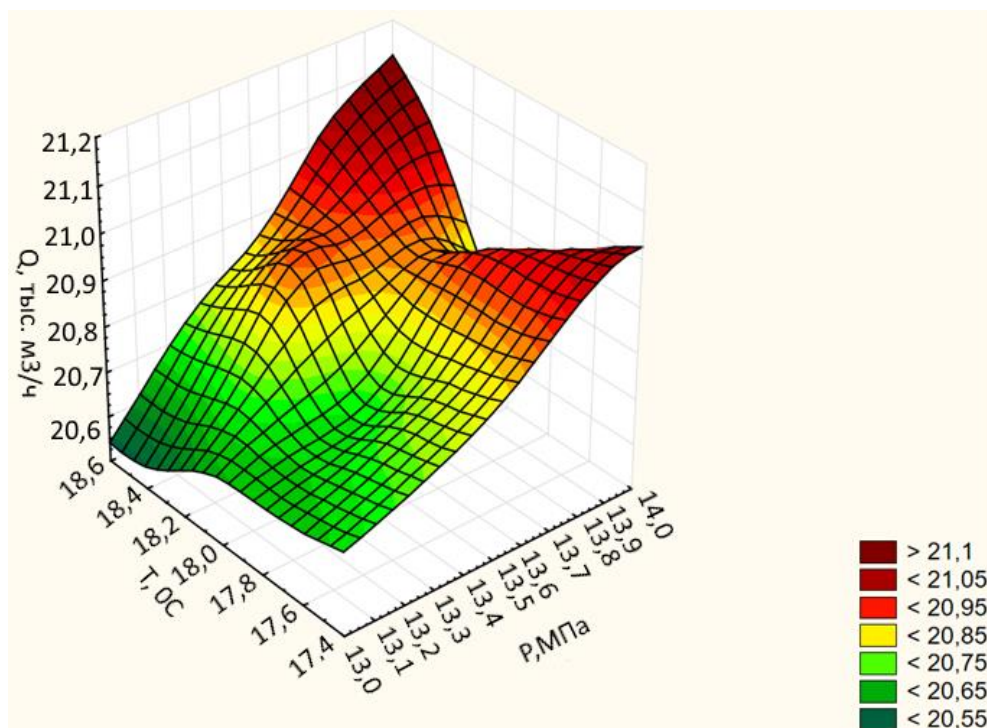


Рисунок 5.3.2 – 3D-модель взаимообусловленного распределения основных технологических параметров работы газодобывающей скважины

Для выявления причин несогласованности и для оптимизации расхода ингибитора гидратообразования разработан пошаговый алгоритм обработки данных (рисунок 5.3.3) с последующим построением цифровой модели работы скважины в режиме реального времени [175–177].



Рисунок 5.3.3 – Пошаговый алгоритм для получения «цифровой модели» в условиях реального времени работы газодобывающей скважины

После выполнения Блока 1 и Блока 2 алгоритма был проведен корреляционно-регрессионный анализ с включением основных рабочих параметров скважины и количества поступающего метанола (Блок 3). Получена математическая модель расхода метанола, которая описывается следующей функцией:

$$Y = 178,967 - 1,923 \cdot X_1 - 3,375 \cdot X_2 + 3,337 \cdot X_3, R^2 = 0,63 \quad (5.3.1)$$

где Y — 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 , °С.

Анализ уравнения (5.3.1) показал, что отдельный 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: отдельный учёт расхода газа Q , давления P и температуры T неадекватно описывает процесс гидратообразования и, соответственно, приводит к повышенному расходу метанола.

На рисунке 5.3.4 представлена сравнительная диаграмма фактического и расчетного расхода метанола при суточной работе скважины.

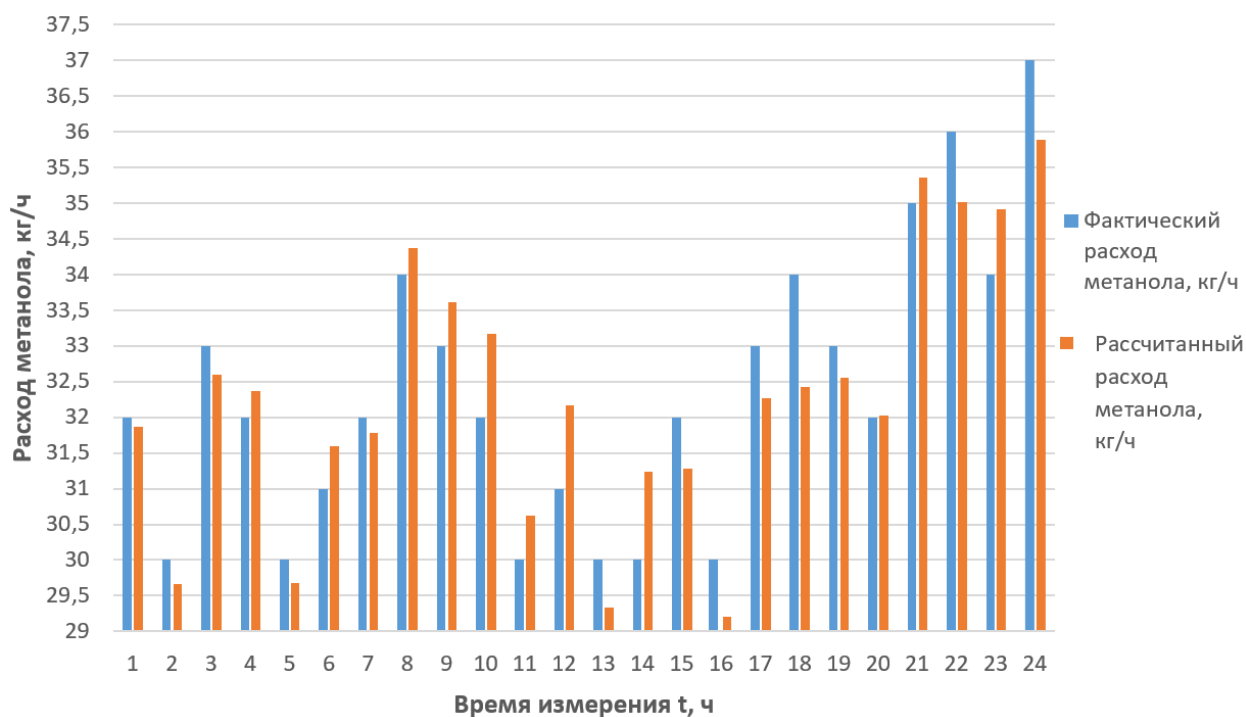


Рисунок 5.3.4 – Сравнительная гистограмма фактического и смоделированного расхода метанола (Q , кг/ч) при работе скважины в течение суток по уравнению (5.3.1)

Так, было выявлено, что в период с 15 часов до 3 часов ночи четко фиксируется превышение фактического расхода метанола по сравнению с рассчитанным. Суммарное превышение подачи метанола за сутки составляет +96 кг.

Для выяснения несоответствия фактического и рассчитанного расхода метанола и выявления доминирующих факторов, влияющих на его расход и, следовательно, на

эффективность ингибирования газовых гидратов, был использован приём попарной комбинации контролируемых параметров (Блок 6).

В этом случае было получено уравнение (5.3.2) с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,856$ (скорректированный 0,805), что характеризует высокое качество корреляции для этой комбинации параметров:

$$Y = -13070,24 - 47,556 \cdot X_1 - 10,276 \cdot X_2 + 16,804 \cdot X_3 + \\ + 883,054 \cdot X_4 + 680,919 \cdot X_5 - 16,568 \cdot X_6, R^2 = 0,85 \quad (5.3.2)$$

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 , °С;

X_3 – произведение давления на буфере скважины P , МПа и температуры газа T , °С;

X_4 – расход газа Q , тыс. м³/ч;

X_5 – давление на буфере скважины P , МПа;

X_6 – температура газа T , °С.

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.

Выявлено, что 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 – мультипликативный процесс.

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

5.4 Термодинамическое и статистическое обоснование модели и роли попарных комбинаций параметров

При буферном давлении 13,11–13,87 МПа (таблица 5.3.1) равновесная температура гидратообразования составляет 20,5–20,9 °С, а фактическая температура газа на буфере — 17,5–18,5 °С. Следовательно, устьевая зона скважины в течение всех суток работает в области термодинамической стабильности гидратов с переохлаждением

$$\Delta T = T_{\text{равн}}(P) - T = 2,2 \dots 3,2 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.4.1)$$

Наибольшее переохлаждение (3,2 °С) приходится на 24-й час наблюдений, наименьшее (2,2 °С) — на 4-й час, что совпадает с максимальным (37 кг/ч) и минимальным (29–32 кг/ч) расходом метанола в таблице 5.3.1.

Понижение равновесной температуры гидратообразования водометанольным раствором описывается уравнением Хаммершмидта [162, 177]:

$$\Delta T = K \cdot C / [M \cdot (100 - C)], \quad (5.4.2)$$

где C — массовая концентрация метанола в водной фазе, %; $M = 32,04$ г/моль — молярная масса метанола; $K = 1297$ — эмпирическая константа. Отсюда требуемая концентрация метанола в водной фазе равна

$$C = 100 \cdot M \cdot \Delta T / (K + M \cdot \Delta T) = 5,2 \dots 7,3 \text{ масс. \%}, \quad (5.4.3)$$

тогда как фактическое содержание метанола в водометанольном растворе на скважине составляет 20–25 масс. %.

Метанол подается на водную фазу, поэтому его расход складывается из количества, необходимого для создания в воде концентрации C , и потерь с газом и конденсатом [162, 178]:

$$G = C / (100 - C) \cdot m_v + g_r \cdot Q + g_k \cdot Q \cdot \text{КГФ}, \quad (5.4.4)$$

где G — расход метанола, кг/ч (в уравнениях (5.3.1) и (5.3.2) — Y); $m_v = Q \cdot \Delta W(P, T)$ — массовый расход водной фазы, конденсирующейся в стволе скважины, кг/ч; ΔW — снижение влагосодержания газа от забоя до устья; влагосодержание по уравнению Бюачека $W = A(T)/P + B(T)$ уменьшается с ростом давления и увеличивается с ростом температуры [179]; g_r , g_k — удельные потери метанола с газом и конденсатом; КГФ — конденсатогазовый фактор.

Все слагаемые пропорциональны дебиту газа Q , а давление и температура входят в них через влагосодержание газа и переохлаждение, поэтому выражение (5.4.4) приводится к виду

$$G = Q \cdot \Phi(P, T). \quad (5.4.5)$$

Выражение (5.4.5) мультипликативно. Для такой функции смешанные производные не равны нулю:

$$\partial^2 G / \partial Q \partial T = (1/Q) \cdot \partial G / \partial T, \quad \partial^2 G / \partial Q \partial P = (1/Q) \cdot \partial G / \partial P. \quad (5.4.6)$$

В аддитивной модели (5.3.1) коэффициент при каждом параметре постоянен, и это свойство не воспроизводится ни при каком подборе коэффициентов. Произведения $Q \times P$ и $Q \times$

Т следуют из физики процесса и необходимы для его корректного описания. Член $P \times T$ учитывает второе обстоятельство: риск гидратообразования определяется переохлаждением, то есть разностью $T_{\text{равн}}(P) - T$, а равновесная температура растет с давлением примерно на $0,55^\circ\text{C}/\text{МПа}$. В рабочем диапазоне размах давления $0,76\text{ МПа}$ смещает равновесную температуру на $0,42^\circ\text{C}$ при размахе температуры газа $1,0^\circ\text{C}$; обе величины одного порядка, и их отдельный учет искажает оценку переохлаждения.

Таким образом, модель переводит подачу ингибитора с фиксированной нормы на фактическое состояние потока газа, а критерием достаточности ингибирования служит измеряемая величина — переохлаждение ΔT . Это делает подход переносимым на другие скважины при условии повторной калибровки коэффициентов.

Проведена статистическая верификация уравнения (5.3.2), включая анализ остатков, проверку на нормальность (тест Шапиро – Уилка), построение Q-Q-диаграммы, проверку отсутствия автокорреляции остатков, проверку гомоскедастичности (постоянства дисперсии остатков) и анализ значимости моделей.

- Остатки рассчитаны как разности между фактическими и предсказанными значениями расхода метанола.

- Среднее значение остатков: 0,0004

- Стандартное отклонение остатков: 0,89

- Остатки не содержат выраженных трендов и автокорреляции.

Проверка нормальности распределения остатков:

1. Результаты теста Шапиро – Уилка:

- Статистика $W = 0,958$

- р-значение = 0,45

2. Тест Шапиро – Уилка проверяет, насколько распределение остатков близко к нормальному (гауссову) распределению.

- Если р-значение больше 0,05, это означает, что нет статистических оснований считать, что распределение остатков отличается от нормального.

- В нашем случае р-значение составляет 0,45, что значительно выше порогового значения 0,05.

- Это говорит о том, что остатки имеют нормальное распределение, то есть модель соответствует важному предположению линейной регрессии.

На рисунке 5.4.1 представлена Q-Q-диаграмма остатков.

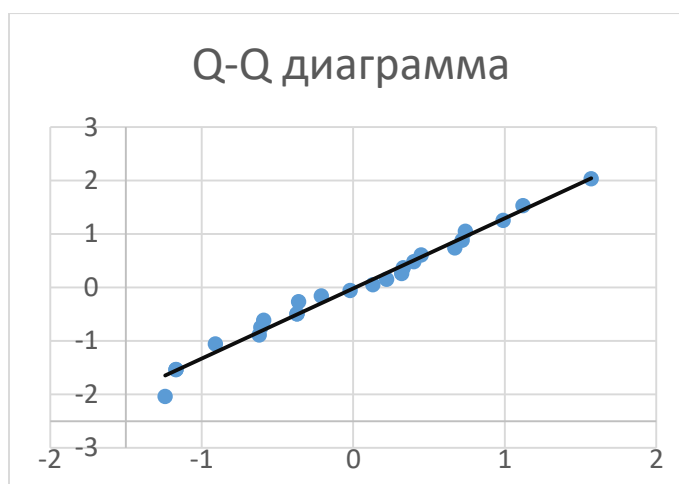


Рисунок 5.4.1 – Q-Q-диаграмма (квантиль-квантиль)

Q-Q-диаграмма (квантиль-квантиль) — это график, который сравнивает распределение остатков с теоретическим нормальным распределением.

– Если точки на диаграмме располагаются вдоль прямой линии, это подтверждает, что распределение остатков близко к нормальному.

– В нашем случае точки на Q-Q-диаграмме лежат вдоль прямой, что дополнительно подтверждает результат теста Шапиро – Уилка.

Проверка отсутствия автокорреляции остатков.

1. Тест Дарбина – Уотсона:

– Статистика $DW = 2,12$

– Значение близко к 2, что свидетельствует об отсутствии автокорреляции остатков.

2. Проверка гомоскедастичности (постоянства дисперсии остатков). На рисунке 5.4.2 представлен график «остатки — предсказанные значения».

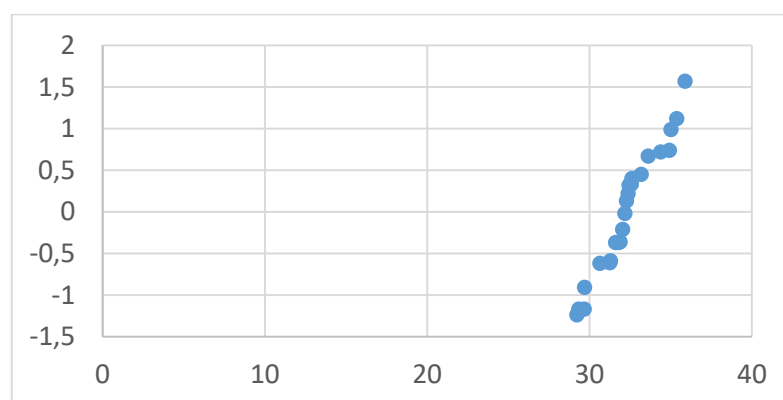


Рисунок 5.4.2 – График «остатки — предсказанные значения»

Визуальный анализ графика не выявил воронкообразной или другой систематической структуры, что свидетельствует о гомоскедастичности.

Тест Бреуша – Пагана:

– p -значение = 0,61 (значительно больше 0,05).

– Это означает, что остатки модели имеют постоянную дисперсию (гомоскедастичность), и предпосылка регрессионного анализа по этому критерию выполняется. Гипотеза о гомоскедастичности остатков не отвергается.

В таблице 5.4.1 представлена сравнительная характеристика статистических моделей на основании уравнений (5.3.1) и (5.3.2).

Таблица 5.4.1 – Сравнение статистических моделей на основании уравнений (5.3.1) и (5.3.2)

Параметр	Уравнение (5.3.1)	Уравнение (5.3.2)
Количество факторов	3	6
Коэффициент детерминации R^2	0,63	0,85
Стандартная ошибка	1,23	0,89
Значимость F	$3,41 \times 10^{-5}$	$2,41 \times 10^{-6}$
Остатки (среднее, стандартное отклонение)	-0,02; 1,23	0,00; 0,89
Нормальность остатков	-	$p = 0,45$ (норма)
Гомоскедастичность	-	$p = 0,61$ (норма)
Автокорреляция	-	DW = 2,12

– Значимость F — это p-значение для всей модели (анализ дисперсии). Чем меньше это значение, тем выше статистическая значимость модели.

Значимость F для уравнения (5.3.2) меньше, чем для уравнения (5.3.1), значит, эта модель статистически значимее.

– Остатки по уравнению (5.3.1): среднее = -0,02; стандартное отклонение = 1,23. Это хуже, чем у модели по уравнению (5.3.2), что еще раз подтверждает преимущество расширенной модели.

– Уравнение (5.3.2) успешно прошло верификацию: остатки распределены нормально, модель статистически значима, качество прогноза высокое.

– Рекомендуется использовать уравнение (5.3.2) для расхода метанола как оптимизированное.

Таким образом, получена цифровая модель эффективной работы газовой скважины, которая может являться основой для корректировки посуточного расхода ингибитора гидратообразования (метанола) и надежного производственного контроля с учетом попарной комбинации контролируемых технологических параметров скважины. 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.

5.5 Экономический расчет и рентабельность оптимизации расхода метанола

Расчёт экономической эффективности предлагаемого решения выполнен по упрощённой методике оценки инвестиционных проектов, принятой в практике нефтегазовой отрасли — метод чистой приведённой годовой прибыли (NP) и простого ROI-индекса с расчётом срока окупаемости без дисконтирования (методически соответствует «Методическим рекомендациям по оценке эффективности инвестиционных проектов», утв. Минэкономки РФ, при горизонте оценки 1 год и стабильной цене на сырьё). Для целей настоящего расчёта применение дисконтирования не требуется ввиду короткого срока окупаемости (менее одного года) и отсутствия капитальных затрат с длительным циклом реализации. Расчёт прямой экономии при подаче метанола проведён для одной и 10 скважин.

Экономический эффект при внедрении математической модели оптимизации расхода метанола на газоконденсатной скважине на основе реальных суточных данных опирался на рыночные цены на метанол в России. В качестве базовых данных использовались: цена метанола – 20 руб./л (25 000 руб./т при плотности 0,796 кг/л), его средний часовой расход – 32 л/ч по 24 суточным замерам (таблица 5.3.1), выявленное снижение расхода метанола на 12,5 %, или 4 л/ч. Экономические показатели эффективности оптимизации рассчитаны по формулам (5.5.1)–(5.5.7).

Расчёт выполнен в следующей последовательности. Снижение часового расхода метанола ΔV на одной скважине при подаче по цифровой модели (5.3.2):

$$\Delta V = V_{\text{ф}} - V_{\text{м}} = 32 - 28 = 4 \text{ л/ч}, \quad (5.5.1)$$

где $V_{\text{ф}}$ — средний фактический часовой расход метанола по 24 замерам (таблица 5.3.1), л/ч; $V_{\text{м}}$ — расход метанола по уравнению (5.3.2), л/ч.

Экономия на одной скважине за час, сутки и год:

$$\mathcal{E}_{\text{ч}} = \Delta V \cdot \text{Ц} = 4 \cdot 20 = 80 \text{ руб./ч}, \quad (5.5.2)$$

$$\mathcal{E}_{\text{сут}} = 24 \cdot \mathcal{E}_{\text{ч}} = 24 \cdot 80 = 1\,920 \text{ руб./сут}, \quad (5.5.3)$$

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 365 \cdot \mathcal{E}_{\text{сут}} = 365 \cdot 1\,920 = 700\,800 \text{ руб./год}, \quad (5.5.4)$$

где Ц — цена метанола, руб./л.

Таким образом, для куста из 10 скважин годовая экономия составляет 7 008 000 руб./год ($10 \times 700\,800$ руб./год).

Затраты на внедрение цифрового алгоритма оптимизации расхода метанола на одной газовой скважине представлены в таблице 5.5.1.

Таблица 5.5.1 – Затраты на внедрение цифрового алгоритма расхода метанола

Статья затрат	Сумма (руб.)	Примечание
Лицензии ПО (STATISTICA, АСУТП)	50 000	Разовая покупка
Настройка мониторинга (контрольно-измерительные приборы Р, t, Q)	30 000	Однократно
Обучение персонала (2 чел., 10 ч)	20 000	1 000 руб./ч
Интеграция модели в АСУТП	15 000	Программист, 20 ч
ИТОГО инвестиции (С)	115 000	1 скважина

Эксплуатационные затраты при работе цифровой модели составляют 2 000 руб./мес. (или 24 000 руб./год). Эти затраты направлены на сопровождение программного обеспечения (поддержку лицензий и регламентное обновление модулей), периодическую поверку контрольно-измерительных приборов и техническую поддержку АСУ ТП.

Чистая прибыль и рентабельность от реализации цифрового алгоритма оптимизации расхода метанола рассчитываются следующим образом:

$$NP = \mathcal{E}_{\text{год}} - \mathcal{Z}_3 = 700\,800 - 24\,000 = 676\,800 \text{ руб./год}, \quad (5.5.5)$$

где $\mathcal{Z}_3$ — годовые эксплуатационные затраты ($2\,000 \text{ руб./мес} \times 12$), руб./год.

Рентабельность (ROI):

$$ROI = \frac{\text{Чистая прибыль от инвестиций}}{\text{Стоимость инвестиций}} \cdot 100 \% = \frac{676\,800}{115\,000} \cdot 100 \% = 588 \% \quad (5.5.6)$$

где чистая прибыль от инвестиций — NP по формуле (5.5.5), руб./год; стоимость инвестиций — единовременные затраты на внедрение $K = 115\,000$ руб. (таблица 5.5.1).

Срок окупаемости единовременных затрат на одной скважине:

$$T_{\text{ок}} = K / \mathcal{E}_{\text{сут}} = 115\,000 / 1\,920 \approx 60 \text{ сут.} \quad (5.5.7)$$

Чистая прибыль при масштабировании цифрового алгоритма на куст из 10 скважин приведена в таблице 5.5.2.

Таблица 5.5.2 – Чистая прибыль при масштабировании цифрового алгоритма оптимизации расхода метанола на куст из 10 газовых скважин

Показатель	1 скважина	Куст 10 скважин
Чистая прибыль (прямая)	676 800 руб.	6 768 000 руб.
Инвестиции	115 000 руб.	1 000 000 руб. (экономия на масштабе –10 %)
Рентабельность ROI	588 %	677 %
Окупаемость	60 дней	52 дня

Рентабельность реализации цифрового алгоритма представлена на рисунке 5.5.1.

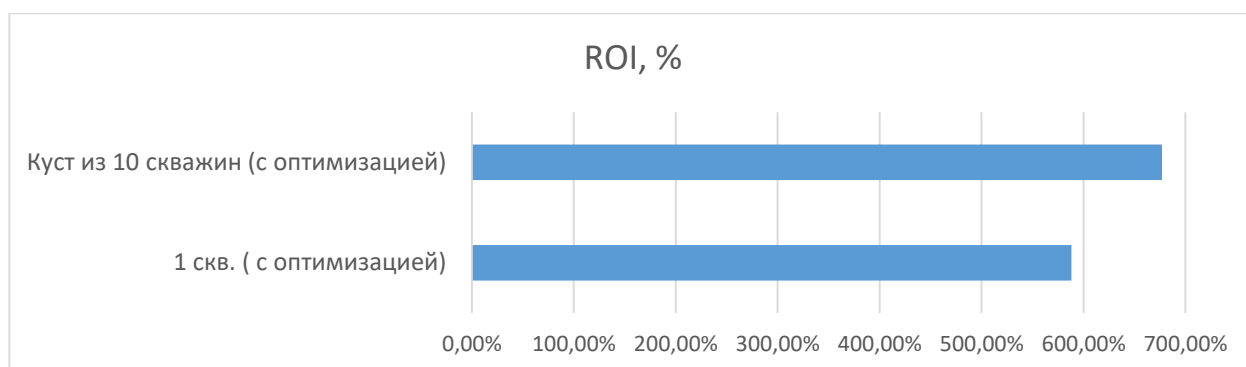


Рисунок 5.5.1 – Диаграмма рентабельности при реализации цифрового алгоритма

При этом можно рассчитать сокращение массы метанола ΔM в кг, поступающего в скважину и частично теряемого в почвы промплощадки:

$$\Delta M = \Delta V \cdot \rho \cdot 24 \cdot 365 = 4 \cdot 0,796 \cdot 8\,760 \approx 27\,900 \text{ кг/год}, \quad (5.5.8)$$

где ΔV — снижение расхода метанола на одной скважине, л/ч; $\rho = 0,796$ кг/л — плотность метанола. Для куста из 10 скважин такое сокращение составляет $\Delta M \approx 279$ т/год.

Сокращение расхода метанола на 27,9 т/год на одну скважину (около 279 т/год на куст из 10 скважин) дает 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.

Выводы по пятой главе

Освещена проблема гидратообразования при добыче газа. Технологические проблемы эксплуатации систем добычи газа обуславливают поиск новых подходов к предупреждению гидратообразования с реагентами низкой дозировки.

На сибирских газоконденсатных месторождениях, включая Ковыктинское ГКМ, для снижения газогидратообразования, повышения эффективности добычи газа и непрерывного обеспечения транспорта газового потока в трубах с месторождения все еще используется токсичный метанол. Однако при работе газовой скважины происходят потери метанола, загрязнение почв месторождения и системное закисление почвенной среды.

Выявлено, что основные отечественные нефтегазодобывающие компании внедряют цифровизацию производства, что способствует повышению экономической эффективности и рентабельности нефтегазовых компаний.

Разработан цифровой алгоритм оптимизированной работы газовой скважины, который может являться основой для корректировки посуточного расхода ингибитора гидратообразования (метанола) и надежного производственного контроля с учетом попарных комбинаций контролируемых технологических параметров скважины – мультипликативный подход. Проведена верификация полученной математической модели, сделано обоснование комплекса термодинамических параметров. Термодинамический расчет показал, что устьевая зона скважины работает с переохлаждением 2,2–3,2 °C относительно равновесной кривой гидратообразования, что и определяет вынужденно повышенный расход метанола до 96 кг/сут. Требуемая по уравнению Хаммершмидта концентрация метанола в водной фазе составляет не более 7,3 масс. % при фактическом его содержании 20–25 масс. %.

Внедрение полученной цифровой модели обеспечивает экономический эффект 7 008 000 руб. в год для куста из 10 скважин, рентабельность $ROI = 588\%$ (прямой эффект) и окупаемость за 60 дней. Цифровой подход можно масштабировать на другие типовые скважины газоконденсатных месторождений Сибири.

Цифровая модель режима скважины может быть включена в структуру комплексного горнотехнического объектно-ориентированного мониторинга на промысле в качестве технологического блока для контроля и сокращения расхода метанола. Это устранил основной фактор устойчивого закисления грунтов в зоне промузлов и снизит формирование подвижных (токсичных) форм элементов. Сокращение расхода метанола на 27,9 т/год на одну скважину (около 279 т/год на куст из 10 скважин) дает также геоэкологический эффект, снижая нагрузку на почвенный покров.

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, Сорг, Нобщ. 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 Z_с, 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 Нобщ 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) обуславливают 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техногенез как фактор формирования техносферы / В. Н. Масляев, В. Н. Маскайкин, К. Д. Егорова, В. А. Шабайкина // Международный научно-практический журнал. – 2022. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnogenez-kak-faktor-formirovaniya-tehnosfery> (дата обращения: 25.09.2026).
2. Грязнов, О. Н. Геоэкологические проблемы горнопромышленного техногенеза на Урале / О. Н. Грязнов, С. Н. Елохина // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – Вып. 2 (46). – С. 28–33. – DOI 10.21440/2307-2091-2017-2-28-33.
3. Елохина, С. Н. Гидрогеоэкологические последствия горного техногенеза на Урале / С. Н. Елохина ; под редакцией О. Н. Грязнова. – Екатеринбург : УИПЦ, 2013. – 187 с.
4. Грязнов, О. Н. Природно-технические системы – универсальные системы взаимодействия инженерных сооружений (объектов) и природной среды / О. Н. Грязнов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2015. – Вып. 4 (40). – С. 5–10.
5. Половов, Б. Д. Геотехнический мониторинг горнотехнических сооружений в системе оценки и обеспечения качества геомеханических решений / Б. Д. Половов, М. Н. Волков, Д. В. Прищепова // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – Вып. 2 (58). – С. 138–158. – DOI 10.21440/2307-2091-2020-2-138-158.
6. Опыт применения геомеханического мониторинга при подземной разработке месторождений полезных ископаемых / В. Д. Барышников, Д. В. Барышников, Л. Н. Гахова, В. Г. Качальский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 5. – С. 61–73.
7. Желтышева, О. Д. Современные технологии мониторинга устойчивости бортов карьеров / О. Д. Желтышева, Е. Ю. Ефремов // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – № 5 (73). – С. 63–66.
8. Козырев, А. А. Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород / А. А. Козырев, Э. В. Каспарьян, Ю. В. Федотова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 4. – С. 168–191.
9. Шевченко, А. А. О необходимости выполнения постоянного геодезического деформационного мониторинга / А. А. Шевченко, А. Э. Бургасова, Р. Е. Глазков // Научные труды КубГТУ : электронный сетевой политематический журнал. – 2016. – № 10. – С. 30–47.
10. Выбор и обоснование состава наблюдений и критериев безопасности при геомеханическом мониторинге на руднике «Интернациональный» / И. В. Зырянов, О. В. Зотеев, В. Д. Барышников, В. В. Пуль // Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 21–27.

11. Hencher, S. Practical rock mechanics / S. Hencher. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 346 p.
12. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных / В. В. Казанцева, Д. С. Ожигин, Н. С. Косарев [и др.] // Записки Горного института. – 2025. – Т. 276, вып. 1. – С. 142–156.
13. Геотехнический мониторинг в горной добыче // Добывающая промышленность. – 2024. – 17 апр. – URL: <https://dprom.online> (дата обращения: 25.09.2026).
14. Кучин, Л. С. Применение дистанционного зондирования Земли для выявления последствий техногенной трансформации природной среды на месторождениях нефти и газа / Л. С. Кучин // Антропогенная трансформация природной среды. – 2025. – Т. 11, № 1. – С. 57–70.
15. Wavelet analysis for evaluating the length of precast spliced piles using low strain integrity testing / E. Loseva, I. Lozovsky, R. Zhostkov, V. Syasko // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 21. – P. 10901–10912. – DOI 10.3390/app122110901.
16. Наилучшая практика и новые технологии в геотехнике открытых горных работ / К. Аннаев, Дж. Мырадова, А. Аннабердиев, А. Караева // Символ науки. – 2024. – URL: <https://cyberleninka.ru> (дата обращения: 25.09.2026).
17. Беспилотные летательные аппараты как инструмент повышения эффективности геолого-разведочных и маркшейдерских работ // Добывающая промышленность. – 2026. – № 4. – URL: https://dprom.online/explore/bespilotnye-letatelnye-apparaty-dp4_26/ (дата обращения: 25.09.2026).
18. Современные методы геотехнического мониторинга и гидрогеологических исследований на карьерах Олимпиадинского ГОКа / В. П. Бережной, А. Е. Кулешов, В. А. Шаворин, В. Н. Лушников // Горный журнал. – 2020. – № 10. – URL: <https://www.rudmet.ru/journal/1961/article/33073/> (дата обращения: 25.09.2026).
19. Березняков, А. И. Научное обоснование и промышленное внедрение комплексного геотехнологического мониторинга систем добычи газа на месторождениях севера Западной Сибири : специальность 25.00.17 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А. И. Березняков. – Москва, 2005. – 297 с.
20. Процессы техногенеза в районах добычи и переработки нефти и газа / А. Я. Гаев, Д. А. Альбакасов, А. В. Малкин [и др.] // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2007. – № 5. – С. 39–41.
21. Паздерин, Д. С. Геотехнический мониторинг как основа безопасной эксплуатации объектов добычи нефти и газа в условиях криолитозоны (на примере Новопортовского месторождения) / Д. С. Паздерин // ProНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2018. – № 1. – С. 68–72. – DOI 10.26887/2587-7399-2018-1-68-72.

22. Кузьмин, Д. К. Разработка метода определения зон потенциальной аварийности при разработке нефтегазовых месторождений по результатам геодинамического мониторинга земной поверхности : специальность 2.8.3 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. К. Кузьмин. – Москва : НИТУ «МИСИС», 2023. – 24 с.

23. Проблемы устойчивости добывающих скважин месторождений полуострова Ямал / А. И. Березняков, Г. И. Грива, А. Б. Осокин [и др.]. – Москва : ИРЦ Газпром, 1997. – 159 с.

24. Березняков, А. И. Принципы управления экологической стабильностью газодобывающих регионов / А. И. Березняков, Г. И. Грива, Л. С. Чугунов // Наука и техника в газовой промышленности. – 2004. – № 1–2. – С. 34–41.

25. Маслов, В. Н. Методология и технология управления разработкой крупных газовых месторождений севера Западной Сибири : специальность 25.00.17 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / В. Н. Маслов. – Тюмень, 2007. – 292 с.

26. Березнякова, Е. И. Методический подход к оценке системной надежности газодобывающих комплексов: на примере Медвежьего газового месторождения : специальность 25.00.17 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е. И. Березнякова. – Москва, 2002. – 148 с.

27. Грива, Г. И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений полуострова Ямал : специальность 25.00.36 : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Г. И. Грива. – Тюмень, 2006. – 305 с.

28. Создание системы автоматизированных измерений и дистанционной передачи данных для геотехнического мониторинга объектов добычи газа ПАО «Газпром» на месторождениях Крайнего Севера / В. А. Затырко, Д. П. Панкратьев, Л. В. Эдер [и др.] // Вести газовой науки. – 2024. – № 2 (58). – С. 160–171.

29. Развитие геотехнического мониторинга объектов обустройства месторождений нефти и газа в криолитозоне России / Л. В. Заря, В. А. Павлов, Р. Ю. Канаев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 11. – С. 59–63. – DOI 10.24887/0028-2448-2022-11-59-63.

30. Гольчикова, Н. Н. Региональные аспекты инженерно-геологической оптимизации размещения объектов нефтегазовой отрасли на территории Астраханского Прикаспия / Н. Н. Гольчикова, С. М. Калягин, И. Р. Абуталиев // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 3. – С. 202–205.

31. Geotechnical design solutions for gas well construction in extremely severe permafrost conditions of the Yamal Peninsula / I. V. Melnikov, S. V. Nersesov, A. B. Osokin [et al.] // Gazovaya promyshlennost. – 2019. – № 12. – P. 64–71.

32. Развитие риск-ориентированного подхода к управлению системой охраны труда и промышленной безопасностью / М. В. Анфимов, В. А. Маркеев, И. С. Сивоконь, С. В.

Толсторожих // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 118–122. – DOI 10.24887/0028-2448-2021-3-118-122.

33. Долгих, Г. М. Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне: актуальные вопросы исследований, расчетов, проектирования, производства, строительства, авторского надзора и мониторинга НПО «Фундаментстройаркос» / Г. М. Долгих. – Новосибирск : Гео, 2014. – 214 с.

34. Попов, А. П. Технология геотехнического мониторинга в криолитозоне / А. П. Попов // Инженерные изыскания. – 2009. – № 4. – С. 20–33.

35. Паздерин, Д. С. Влияние глобального потепления на термостабилизацию грунтов основания заглубленного трубопровода в условиях многолетнемерзлых грунтов / Д. С. Паздерин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 7. – С. 106–108.

36. Амосова, Е. В. Система мониторинга температур протяженных объектов в многолетнемерзлых грунтах / Е. В. Амосова, Д. Ю. Кропачев, Д. С. Паздерин // Газовая промышленность. – 2011. – № 6 (660). – С. 42–45.

37. Горелик, Я. Б. Корректность постановки и решения теплотехнических задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах / Я. Б. Горелик, Д. С. Паздерин // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21, № 3. – С. 49–59.

38. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of aboveground trunk pipelines / I. A. Shammazov, A. M. Batyrov, D. I. Sidorkin, T. Van Nguyen // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 5. – P. 3139–3157. – DOI 10.3390/app13053139.

39. Геологическое пространство как экологический ресурс и его трансформация под влиянием техногенеза : монография / В. Т. Трофимов, Н. Д. Хачинская, Л. А. Цуканова [и др.] ; под редакцией В. Т. Трофимова. – Москва : Академическая наука, 2014. – 566 с.

40. Геохимия техногенеза в районах добычи полезных ископаемых и формирование ореолов загрязнения / Е. М. Дорофеев, В. С. Тынченко, В. А. Кукарцев, Н. А. Шепета // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, № 2. – С. 1060–1071. – DOI 10.21177/1998-4502-2025-17-2-1060-1071.

41. Янкович, Е. П. Эколого-геохимическая оценка природной среды гидрогеоэкологического полигона «Томский» с использованием геоинформационных технологий : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Янкович Елена Петровна ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2017. – 136 с.

42. Куликова, Е. Ю. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ / Е. Ю. Куликова, С. В. Баловцев, О. В. Скопинцева // Устойчивое

развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 205–216. – DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

43. Стогний, В. В. Геоэкологические риски территории Краснодарского края: проблема интегральной оценки степени геологических опасностей / В. В. Стогний, Г. А. Стогний, Т. В. Любимова // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 121–133. – DOI 10.46698/VNC.2021.40.95.010.

44. Куликова, А. А. Региональный критерий отнесения горнопромышленных регионов к территориям с наибольшей подверженностью геоэкологическим изменениям / А. А. Куликова, Т. И. Овчинникова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 27–34. – DOI 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.

45. О Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 № 207-р // Справочно-правовая система КонсультантПлюс.

46. Кочуров, Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развитие : учебное пособие / Б. И. Кочуров. – Москва ; Смоленск, 2003. – 384 с.

47. Экологические проблемы природопользования (теоретические аспекты, практические приемы и их решения) / И. Б. Арчегова, Е. Г. Кузнецова, А. Н. Панюков, И. А. Лиханова // Проблемы региональной экологии. – 2015. – № 3. – С. 75–79.

48. Рабкина, Е. В. Геоэкологическая безопасность при освоении нефтегазовых ресурсов Печорского моря : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Рабкина Евгения Владимировна ; Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина. – Москва, 2005. – 192 с.

49. Глазовская, М. А. Методология и методика почвенных и ландшафтно-геохимических исследований / М. А. Глазовская. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1977. – 192 с.

50. Технологию геохимического деления добычи нефти по пластам создали в СПбГУ совместно с партнерами // Научная Россия : [портал]. – URL: <https://scientificrussia.ru/articles/tehnologiu-geohimiceskogo-delenia-dobyci-nefti-po-plastam-sozdali-v-spbgu-sovmestno-s-partnerami> (дата обращения: 25.09.2026).

51. Геотехнический мониторинг объектов нефтегазовой инфраструктуры // Нефтегазовая инфраструктура на многолетнемерзлых грунтах : III отраслевая конференция (Санкт-Петербург, ноябрь 2025 г.). – Санкт-Петербург, 2025.

52. Газогеохимическое обследование территорий // АО «СахалинТИСИЗ» : [сайт]. – URL: <https://sakhtisiz.com/ekologiya/gazo-geokhimicheskoye-obsledovaniye-territoriy> (дата обращения: 25.09.2026).

53. Технологическая схема разработки Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Раздел 4. Состояние разработки месторождения / ООО «ВолгоУралНИПИгаз». – Оренбург, 2013. – С. 142–156.

54. Газпром геологоразведка начала геохимические исследования на Ковыктинском месторождении : [сообщение пресс-службы ПАО «Газпром» от 22.08.2016] // Neftegaz.RU : [сайт]. – URL: <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/217390> (дата обращения: 20.08.2026).

55. Управляемый след // Российская газета : [сайт]. – 2026. – 28 апр. – URL: <https://rg.ru/2026/04/28/upravliaemyj-sled.html> (дата обращения: 25.09.2026).

56. Устойчивое развитие // Российская газета. – 2026. – 28 апр. (№ 9926).

57. Дахнова, М. В. Применение геохимических методов исследований при поисках, разведке и разработке месторождений углеводородов / М. В. Дахнова // Геология нефти и газа. – 2007. – № 2. – С. 81–89.

58. Роль геохимических методов в прогнозе нефтеносности и оценке ресурсного потенциала черносланцевых толщ (на примере баженовской свиты) / М. Б. Скворцов, М. В. Дахнова, С. В. Можегова [и др.] // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 3–4. – С. 495–503.

59. Грива, Г. И. Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне : диссертация на соискание ученой степени кандидата наук / Г. И. Грива. – Надым, 2000. – 202 с.

60. Гайрабеков, У. Т. Геоэкологические аспекты освоения нефтегазовых месторождений в горных и предгорных районах (на примере Чеченской республики) / У. Т. Гайрабеков // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8, № 2. – С. 127–134. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-2-127-134.

61. Тимонина, Н. Н. Экологические аспекты промышленного освоения нефтегазовых месторождений арктических территорий Республики Коми / Н. Н. Тимонина, Д. С. Кузнецов, С. К. Кузнецов // Арктика: экология и экономика. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 449–460. – DOI 10.25283/2223-4594-2023-3-449-460.

62. Лаверов, Н. П. Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы / Н. П. Лаверов, В. И. Богоявленский, И. В. Богоявленский // Арктика: экология и экономика. – 2016. – № 2. – С. 4–13.

63. Фадеев, А. М. Стратегическое управление нефтегазовым комплексом в Арктике : монография / А. М. Фадеев, А. Е. Череповицын, Ф. Д. Ларичкин. – Апатиты : КНЦ РАН, 2019. – 289 с. – DOI 10.25702/KSC.978.5.91137.407.5.

64. Ким, С. К. Опыт применения технологии антикоррозионной защиты, внедряемой на месторождениях ООО «Лукойл-Коми» / С. К. Ким, Д. Г. Даниленко // Проблемы освоения Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. – Ухта : О-Краткое, 2012. – С. 306–319.

65. Ястребов, А. А. Оценка геоэкологических условий нефтегазодобычи Надым-Пурской и Пур-Тазовской нефтегазоносных провинций : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Ястребов Алексей Александрович ; Институт геологии им. Е. М. Сергеева РАН. – Москва, 2014. – 114 с.

66. Беликова, Н. Г. Геоэкологические аспекты природно-технических систем: на примере газоконденсатных месторождений Южного Приуралья : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Беликова Наталья Геннадьевна ; Оренбургский государственный университет. – Оренбург, 2009. – 17 с.

67. Башкин, В. Н. Геоэкологические проблемы при добыче газа в Западной Сибири: пути решения / В. Н. Башкин, Р. В. Галиулин // Жизнь Земли. – 2019. – № 3. – С. 264–271. – DOI 10.29003/m669.0514-7468.2019_41_3/264-271.

68. Окмянская, В. М. Актуальные вопросы локального экологического мониторинга промышленной площадки на примере нефтегазодобывающего региона / В. М. Окмянская // International agricultural journal. – 2022. – № 6. – С. 1085–1102. – DOI 10.55186/25876740_2022_6_6_27.

69. Белозерцева, И. А. Интегральная оценка экологического состояния почвенного покрова при добыче газа в Среднем Приангарье / И. А. Белозерцева // Почвоведение. – 2020. – № 2. – С. 244–258. – DOI 10.31857/S0032180X20020021.

70. Почвы : карта № 57 / И. А. Белозерцева, Л. Л. Убугунов, А. А. Сороковой [и др.] // Экологический атлас Байкальского региона. – 2017. – URL: <http://atlas.isc.irk.ru> (дата обращения: 17.01.2026).

71. Экологическое районирование почв бассейна озера Байкал / Л. Л. Убугунов, И. А. Белозерцева, В. И. Убугунова [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2019. – № 6. – С. 640–653. – DOI 10.15372/SEJ20190602.

72. Soils of the Lake Baikal drainage basin: Results of research for 1980-2017 / L. L. Ubugunov, V. I. Ubugunova, I. A. Belozertseva [et al.] // Geography and Natural Resources. – 2018. – Vol. 39, № 4. – P. 332–342. – DOI 10.1134/S1875372818040066.

73. Дорожукова, С. Л. Экологические проблемы нефтегазодобывающих территорий Тюменской области / С. Л. Дорожукова, Е. П. Янин. – Москва : ИМГРЭ, 2004. – 56 с.

74. Горбунова, О. И. Экологический менеджмент в нефтегазовых компаниях России: рейтинг экологической ответственности / О. И. Горбунова, Л. В. Каницкая // Известия Байкальского государственного университета. – 2017. – Т. 27, № 3. – С. 366–371. – DOI 10.17150/2500-2759.2017.27(3).366-371.

75. Shvarts, E. A. Assessment of environmental responsibility of oil and gas companies in Russia: the rating method / E. A. Shvarts, A. M. Pakhalov, A. Y. Knizhnikov // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 127. – P. 143–151.

76. Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в ЯНАО / А. Ю. Опекунов, М. Г. Опекунова, С. Ю. Кукушкин, А. Г. Ганул // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. – 2012. – № 4. – С. 87–101.

77. Юркевич, Н. В. Анализ экологического баланса в арктических регионах нефтедобычи на примере НГК ЯНАО / Н. В. Юркевич, И. В. Филимонова // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2019. – Т. 2, № 5. – С. 286–294. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-2-5-286-294.

78. К вопросу о гармонизации биологических и геохимических результатов исследований при мониторинге воздействия нефтегазодобычи / А. Ю. Опекунов, В. В. Спасский, М. Г. Опекунова [и др.] // *Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов : материалы XIII Международной ландшафтной конференции (Воронеж, 14–17 мая 2018 г.)*. – Москва : Истоки, 2018. – Т. 2. – С. 339–341.

79. Макаров, В. З. Теория и практика ландшафтно-экологических исследований крупных городов с применением ГИС-технологий : специальность 25.00.23 «Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук / Макаров Владимир Зиновьевич ; Санкт-Петербургский государственный университет. – Санкт-Петербург, 2001. – 44 с.

80. Соромотин, А. В. Техногенная трансформация природных экосистем таежной зоны в процессе нефтегазодобычи: на примере Тюменской области : специальность 03.00.16 «Экология» : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Соромотин Андрей Владимирович ; Тюменский государственный университет. – Тюмень, 2007. – 442 с.

81. Московченко, Д. В. Ландшафтно-геохимические особенности Приполярного и Северного Урала / Д. В. Московченко // *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. – 2009. – № 10. – С. 197–209.

82. Глазьева, А. Б. Геоэкологическая оценка влияния нефтегазового хозяйства на окружающую среду Воронежской области : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Глазьева Александра Борисовна ; Воронежский военный авиационный инженерный институт. – Воронеж, 2003. – 23 с.

83. Оценка воздействия на окружающую среду при разработке нефтяных и газовых месторождений ОАО «Оренбургнефть» : отчет о НИР / А. И. Семячков ; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2010. – 94 с. – № ГР 680766688. – Инв. № БО54137.

84. Андросова, Н. К. Геохимия техногенеза в районе добычи полезных ископаемых / Н. К. Андросова // Записки Горного института. – 2013. – Т. 203. – С. 35–38.
85. Водяницкий, Ю. Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах / Ю. Н. Водяницкий. – Москва : Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2009. – 95 с.
86. Сомов, В. В. Миграция и аккумуляция тяжелых металлов в природных и антропогенно преобразованных ландшафтах Башкирского Зауралья : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Сомов Всеволод Владимирович ; Российский государственный гидрометеорологический университет. – Санкт-Петербург, 2018. – 27 с.
87. Шабанов, М. В. Геохимические аномалии тяжелых металлов в почвах природных и антропогенных ландшафтов / М. В. Шабанов, М. С. Маричев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 6. – С. 230–239.
88. Казанцев, И. В. Содержание тяжёлых металлов в почвенном покрове в условиях техногенеза / И. В. Казанцев, Т. Б. Матвеева // Самарский научный вестник. – 2016. – Т. 5, № 1. – С. 34–37. – DOI 10.17816/snvn20161107.
89. Добровольский, В. В. Успехи биогеохимии рассеянных металлов / В. В. Добровольский // Почвоведение. – 1995. – № 2. – С. 252–255.
90. Дягилева, А. Г. Влияние техногенеза на экологическое состояние мерзлотных почв на примере Нюрбинского ГОКа / А. Г. Дягилева, Я. Б. Легостаева // Вестник СВФУ. – 2013. – Т. 10, № 2. – С. 79–84.
91. Эколого-геохимическая характеристика территории газоконденсатных промыслов в пределах северо-таежных ландшафтов Якутии / Я. Б. Легостаева, Л. А. Томская, М. И. Ксенофонтова [и др.] // Наука и образование. – 2011. – № 2. – С. 64–69.
92. Содержание и распределение тяжелых металлов в почвах техногенных ландшафтов / Л. Н. Серебренникова, А. И. Обухова, С. И. Решетников, В. С. Горбатов // Почвоведение. – 1982. – № 12. – С. 71–76.
93. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас. – Москва : Мир, 1989. – 439 с.
94. Ayangbenro, A. S. A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents / A. S. Ayangbenro, O. O. Babalola // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2017. – Vol. 14, № 1. – P. 94–109. – DOI 10.3390/ijerph14010094.
95. Eric, G. R. Heavy Metal Toxicity & Contamination: What You Need To Know / G. R. Eric // Hydroviva : [сайт]. – 2017. – URL: <https://www.hydroviva.com/blogs/water-smarts/heavy-metal-toxicity> (дата обращения: 24.04.2026).

96. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals / N. Gaur, G. Flora, M. Yadav, A. A. Tiwari // *Environmental Science: Processes and Impacts*. – 2014. – № 16. – P. 180–193. – DOI 10.1039/C3EM00491K.
97. Contaminated Sites in Europe: Review of the Current Situation / P. Panagos, M. Van Liedekerke, Y. Yigini, L. Montanarella // *Journal of Environmental Management*. – 2013. – Vol. 129. – P. 10–17. – DOI 10.1155/2013/158764.
98. Носова, М. В. Геохимическая оценка распределения подвижных форм тяжелых металлов в нефтезагрязненных аллювиальных почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири / М. В. Носова, В. П. Середина, С. А. Стовбунник // *Принципы экологии*. – 2025. – № 1. – С. 16–28. – DOI 10.15393/j1.art.2025.15562.
99. Predicting Firm's Performance Based on Panel Data: Using Hybrid Methods to Improve Forecast Accuracy / N. V. Martyushev, V. Spitsin, R. V. Klyuev [et al.] // *Mathematics*. – 2025. – Vol. 13. – P. 1247–1279. – DOI 10.3390/math13081247.
100. Бочаров, В. Л. Эколого-математические исследования техногенно-природных геосистем / В. Л. Бочаров, В. И. Кашникова, Л. Н. Строгонова. – Воронеж : ИПЦ Воронежского университета, 2007. – 115 с.
101. Моделирование режимов работы тягового электрооборудования горнопромышленного транспорта / А. Э. Аухадеев, О. А. Филина, Б. В. Малозёмов, Н. В. Мартюшев // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2025. – Т. 17, № 2. – С. 812–822. – DOI 10.21177/1998-4502-2025-17-2-812-822.
102. Klyuev, R. V. Development of a methodology for planning an experiment to study the parameters of mills at a mining and processing plant / R. V. Klyuev // *Russian Mining Industry*. – 2024. – № 5S. – P. 105–109. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109.
103. Трёхмерное моделирование солянокупольных структур по данным детального бурения в Прикаспии / В. В. Лапковский, Б. В. Лунёв, М. П. Антипов [и др.] // *Георесурсы*. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 192–202. – DOI 10.18599/grs.2023.4.18.
104. Galchenko, Yu. P. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in lithosphere / Yu. P. Galchenko, V. A. Eremenko // *Eurasian Mining*. – 2020. – № 1. – P. 30–36. – DOI 10.17580/em.2019.02.01.
105. Чудин, Я. С. Совершенствование методов гидродинамического прокси-моделирования газовых месторождений и ПХГ : специальность 25.00.17 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чудин Ян Сергеевич ; ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ». – Москва, 2022. – 23 с.

106. Джалилова, Г. Т. Разработка и внедрение информационно-аналитических систем в мониторинге деградационных процессов горных почв / Г. Т. Джалилова // Молодой ученый. – 2018. – № 19 (205). – С. 18–20.
107. Берденов, Ж. Г. Применение ГИС-технологий при изучении геосистем техногенного происхождения Актюбинской агломерации / Ж. Г. Берденов, Г. М. Джаналеева // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2015. – Т. 21. – С. 133–138. – DOI 10.24057/2414-9179-2015-1-21-133-138.
108. Сидиков, Ф. У. Геоинформационная система: перспективы, рациональное использование программного обеспечения ArcGIS / Ф. У. Сидиков // Молодой ученый. – 2012. – № 4 (39). – С. 86.
109. ArcView Gis, Using ArcView Gis: справочник и методика работы с программным продуктом (Разработка ГИС проектов, распечатка карт, подготовка другого аналитического материала). – New York : ESRI, 1996.
110. Гордиенко, Л. В. Обзор современного состояния ГИС-отрасли в газовой промышленности / Л. В. Гордиенко, И. В. Горда // Инновационная наука. – 2016. – № 10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennogo-sostoyaniya-gis-otrasli-v-gazovoy-promyshlennosti/viewer> (дата обращения: 23.04.2026).
111. Череповицын, А. Е. Разработка новой системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере / А. Е. Череповицын, Н. А. Третьяков // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 628–642.
112. Слово редактора: Цифровая трансформация в управлении процессами и оборудованием предприятий ТЭК и МСК / Ю. Л. Жуковский, И. И. Белоглазов, Д. А. Клебанов, И. О. Темкин // Записки Горного института. – 2025. – Т. 275, № 5. – С. 3–4.
113. Цифровая трансформация процесса технического обслуживания и ремонта оборудования для построения промышленной метавселенной / Н. И. Котелева, В. В. Вальнев, А. С. Симаков, М. М. Ширази // Записки Горного института. – 2025. – Т. 275, № 5. – С. 30–41.
114. Хохлов, С. В. Применение методов цифрового моделирования для прогнозирования параметров развала взорванной горной массы / С. В. Хохлов // Записки Горного института. – 2025. – Т. 275, № 5. – С. 196–204.
115. Дерябин, С. А. Онтологическое моделирование и управление цифровой трансформацией архитектуры горно-добывающих предприятий / С. А. Дерябин, И. О. Темкин // Записки Горного института. – 2025. – Т. 275, № 5. – С. 130–144.
116. Цифровизация горнодобывающей промышленности // TAdviser : [сайт]. – 2025. – 4 авг. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровизация_горнодобывающей_промышленности (дата обращения: 27.09.2026).

117. Цифровизация нефтегазовой отрасли – тренды, кейсы, технологии // Smartgopro : [сайт]. –

2025. – URL: https://smartgopro.com/NOVOSTI2/DIGITALIZATION_OIL_GAS_INDUSTRY/ (дата обращения: 23.04.2026).

118. Миллер заявил, что Ковыкта до конца года выйдет на проектную мощность // Интерфакс : [сайт]. – 2026. – 26 июня. – URL: <https://www.interfax.ru/business/1098468> (дата обращения: 27.09.2026).

119. Ковыкта — жемчужина Восточной Сибири // ТЭК России. – 2023. – № 4. – URL: https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2023/4/1138/ (дата обращения: 27.09.2026).

120. На Ковыктинском ГКМ к 2027 г. будет запущена новая УКПГ-45 и 6 кустов скважин // Neftegaz.RU : [сайт]. – 2024. – 12 сент. – URL: <https://neftegaz.ru/news/oilfield/854830-na-kovyktinskom-gkm-k-2027-g-budet-zapushchena-novaya-ukpg-45-i-6-kustov-skvazhin/> (дата обращения: 27.09.2026).

121. Обустройство Ковыктинского газоконденсатного месторождения, Основные технические решения. Раздел 1. Пояснительная записка. Часть 1. Общая пояснительная записка. Книга 1. Текстовая часть 0092.020. 004.ОТР.0004.-ПЗ1.1 // ООО «Газпром проектирование». – Инв. № 12099786. – URL: <https://ovos.ecom.su/bitstream/handle/123456789/957/razdel-pd-1-chast-pd-1-kniga-pd-1-0092.004.p.13.0004-pz1.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 26.04.2026).

122. Обустройство Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Раздел 16. Мероприятия по обеспечению требований в области охраны окружающей среды и обеспечению экологической безопасности при пользовании недрами : технологическая схема разработки / ООО «ВолгоУралНИПИгаз». – Оренбург, 2013. – С. 415–542.

123. Белозерцева, И. А. Картографирование почв и содержания в них химических элементов на территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения / И. А. Белозерцева, Е. А. Истомина, С. В. Солодянкина // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78, № 5. – С. 17–25.

124. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 : введены в действие 01.03.2021.

125. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks / R. Gizatullin, M. Dvoynikov, N. Romanova, V. Nikitin // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 5. – P. 1–13. – DOI 10.3390/en16052387.

126. Study on waxy crudes characterization and chemical inhibitor assessment / N. Makwashi, D. Zhao, M. Abdulkadir [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 204. –

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521003946> (дата обращения: 26.04.2026). – DOI 10.1016/j.petrol.2021.108734.

127. Козлов, А. А. Методика обнаружения координаты утечки газа как способ повышения безопасности и экологичности эксплуатации магистрального газопровода / А. А. Козлов, И. С. Александров, Р. А. Шестаков // Экология и промышленность России. – 2024. – Т. 28, № 8. – С. 32–37.

128. Geochemical accumulation and source tracing of heavy metals in arable soils from a black shale catchment, southwestern China / W. Wei, S. Ling, X. Wu [et al.] // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 857, № 2. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.159467.

129. Подвижные формы металлов в почвах Надым-Пуровского междуречья (Западная Сибирь) / Е. А. Романенко, Д. В. Московченко, А. А. Кудрявцев, Г. Н. Шигабаева // Вестник Нижневартковского государственного университета. – 2020. – № 2. – С. 136–145. – DOI 10.36906/2311-4444/20-2/18.

130. 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.

131. Обустройство Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Этап 5. Объекты УКПГ-2 (в том числе эксплуатационные скважины, конденсатопровод, терминал отгрузки конденсата в пос. Окунайский, ЦДКС) : проектная документация. Раздел 8. Перечень мероприятий по охране окружающей среды. Часть 1. Оценка воздействия намечаемой хозяйственной деятельности на окружающую среду. Книга 1. Текстовая часть. 0092.020.004.П5.0004-ООС1.1.1. Том 8.1.1.1 / ООО «Газпром проектирование», Саратовский филиал. – Саратов, 2020. – С. 63–64, 100.

132. Turekian, K. K. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust / K. K. Turekian, K. H. Wedepohl // Geological Society of America Bulletin. – 1961. – Vol. 72, № 2. – P. 175–192.

133. Smedley, P. L. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters / P. L. Smedley, D. G. Kinniburgh // Applied Geochemistry. – 2002. – Vol. 17, № 5. – P. 517–568. – DOI 10.1016/S0883-2927(02)00018-5.

134. МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест : методические указания : утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 07.02.1999.

135. 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.

136. 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.

137. 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.

138. Выявление и оценка загрязнения окружающей среды токсичными химическими элементами на основе многоцелевого геохимического картирования / А. А. Головин, Н. Г. Гуляева, О. П. Кальева, Б. А. Колотов // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 7. – С. 57–61.

139. Качор, О. Л. Разработка научно-практических основ ликвидации накопленного экологического ущерба от мышьяковистых отходов горно-перерабатывающей промышленности : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / О. Л. Качор. – Иркутск, 2019.

140. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В. И. Гребенщикова, Э. Е. Лустенберг, Н. А. Китаев, И. С. Ломоносов. – Новосибирск : Гео, 2008. – 234 с.

141. 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.

142. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях : Федеральный закон от 30.12.2001 № 195-ФЗ // Справочно-правовая система КонсультантПлюс.

143. Об охране окружающей среды : Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ // Справочно-правовая система КонсультантПлюс.

144. Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды : Приказ Минприроды России от 08.07.2010 № 238 // Справочно-правовая система КонсультантПлюс.

145. Определение Судебной коллегии по экономическим спорам Верховного Суда Российской Федерации от 15.10.2024 № 306-ЭС24-4078 // Справочно-правовая система КонсультантПлюс.

146. Росприроднадзор взыскивает ущерб за загрязнение почв в регионах России // НИА «Экология» : [сайт]. – 2025. – 28 окт. – URL: <https://nia.eco/2025/10/28/109273/> (дата обращения: 07.10.2026).
147. Шавина, Е. В. Тенденции развития мировой газовой отрасли в современных условиях / Е. В. Шавина // Геоэкономика энергетики. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 40–58. – DOI 10.48137/2687-0703_2020_12_4_40.
148. На страже экологической безопасности / Р. И. Шигульдин, Р. Ф. Сагатов, А. И. Аслямов [и др.] // Бурение и нефть. – 2023. – № 7–8. – С. 34–36.
149. Аленичев, В. М. Критерии системной оценки изменений природно-технологических систем при недропользовании / В. М. Аленичев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 207–216. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_51_0_207.
150. Pashkevich, M. A. Ecological security and sustainability / M. A. Pashkevich, A. S. Danilov // Journal of Mining Institute. – 2023. – Vol. 260, № 2. – P. 153–154.
151. Солнцева, Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов : монография / Н. П. Солнцева. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 395 с.
152. Кожевин, П. А. Показатели почвенного «здоровья» в оценке почв (обзор) / П. А. Кожевин // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2023. – № 2. – С. 16–25. – DOI 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25.
153. Копчик, С. В. Оценка современных рисков избыточного накопления тяжелых металлов в почвах на основе концепции критических нагрузок (обзор) / С. В. Копчик, Г. Н. Копчик // Почвоведение. – 2022. – № 5. – С. 615–630. – DOI 10.31857/S0032180X22050033.
154. Yakovets, L. Migration of heavy metals in the soil profile / L. Yakovets // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2021. – Vol. 54, № 1. – P. 8–12. – DOI 10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12.
155. Сарапулова, Г. И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы / Г. И. Сарапулова // Записки Горного института. – 2020. – Т. 243, № 3. – С. 388–392. – DOI 10.31897/PMI.2020.3.388.
156. Применение геоинформационных технологий в ОАО «Саратовнефтегаз» / В. З. Макаров, А. Н. Чумаченко, С. Н. Бышов [и др.] // Территория нефтегаз. – 2007. – № 2. – С. 16–21.
157. 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.

158. Власова, Л. В. Геоинформационные аналитические модели комплексной оценки природных опасностей для единой системы газоснабжения России / Л. В. Власова, Г. С. Ракитина, С. И. Долгова // Вести газовой науки. – 2017. – № 1 (29). – С. 57–70.

159. 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 : ИРНТУ, 2024. – С. 72–74.

160. 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.

161. Рябов, А. Д. Современный подход к образованию газовых гидратов: прогнозирование, методы предупреждения и борьбы / А. Д. Рябов // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXIII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К. И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина (Томск, 8–12 апреля 2019 г.). – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – Т. 2. – С. 166–168.

162. Истомин, В. А. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа / В. А. Истомин, В. Г. Квон. – Москва : ИРЦ Газпром, 2004. – 508 с.

163. 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 : ИРНТУ, 2022. – Т. 2. – С. 93–98.

164. Sloan, E. D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates / E. D. Sloan // Nature. – 2003. – Vol. 426, № 6964. – P. 353–359. – DOI 10.1038/nature02135.

165. Широбоков, О. С. Газовые гидраты в газопроводах природного газа / О. С. Широбоков, М. В. Свалова // Актуальные проблемы современной когнитивной науки : сборник статей Международной научно-практической конференции (Пермь, 5 июля 2019 г.). – Уфа : Аэтерна, 2019. – С. 15–20.

166. Misyura, S. Y. Non-Stationary Combustion of Natural and Artificial Methane Hydrate at Heterogeneous Dissociation / S. Y. Misyura // *Energy*. – 2019. – Vol. 181. – P. 589–602. – DOI 10.1016/J.Energy.2019.05.177.

167. Bar-Kohany, T. Transient Combustion of a Methane-Hydrate Sphere / T. Bar-Kohany, W. A. Sirignano // *Combustion and Flame*. – 2016. – Vol. 163. – P. 284–300. – DOI 10.1016/J.combustflame.2015.10.004.

168. Грунвальд, А. В. Рост потребления метанола в газовой промышленности России и геозкологические риски, возникающие при его использовании в качестве ингибитора гидратообразования / А. В. Грунвальд // *Нефтегазовое дело*. – 2007. – 25 с. – URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Grunvald/Grunvald_2.pdf (дата обращения: 26.04.2026).

169. Khaibullina, K. S. Development of an asphalt-resin-paraffin deposits inhibitor and substantiation of the technological parameters of its injection into the bottom-hole formation zone / K. S. Khaibullina, G. Y. Korobov, A. V. Lekomtsev // *Periodico Tche Quimica*. – 2020. – Vol. 17, № 34. – P. 769–781. – DOI 10.52571/PTQ.v17.n34.2020.793_P34_pgs_769_781.

170. 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.

171. Дмитриевский, А. Н. К вопросу цифровизации процессов газодобычи / А. Н. Дмитриевский, Н. А. Еремин, В. Е. Столяров // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2019. – № 2. – С. 136–152.

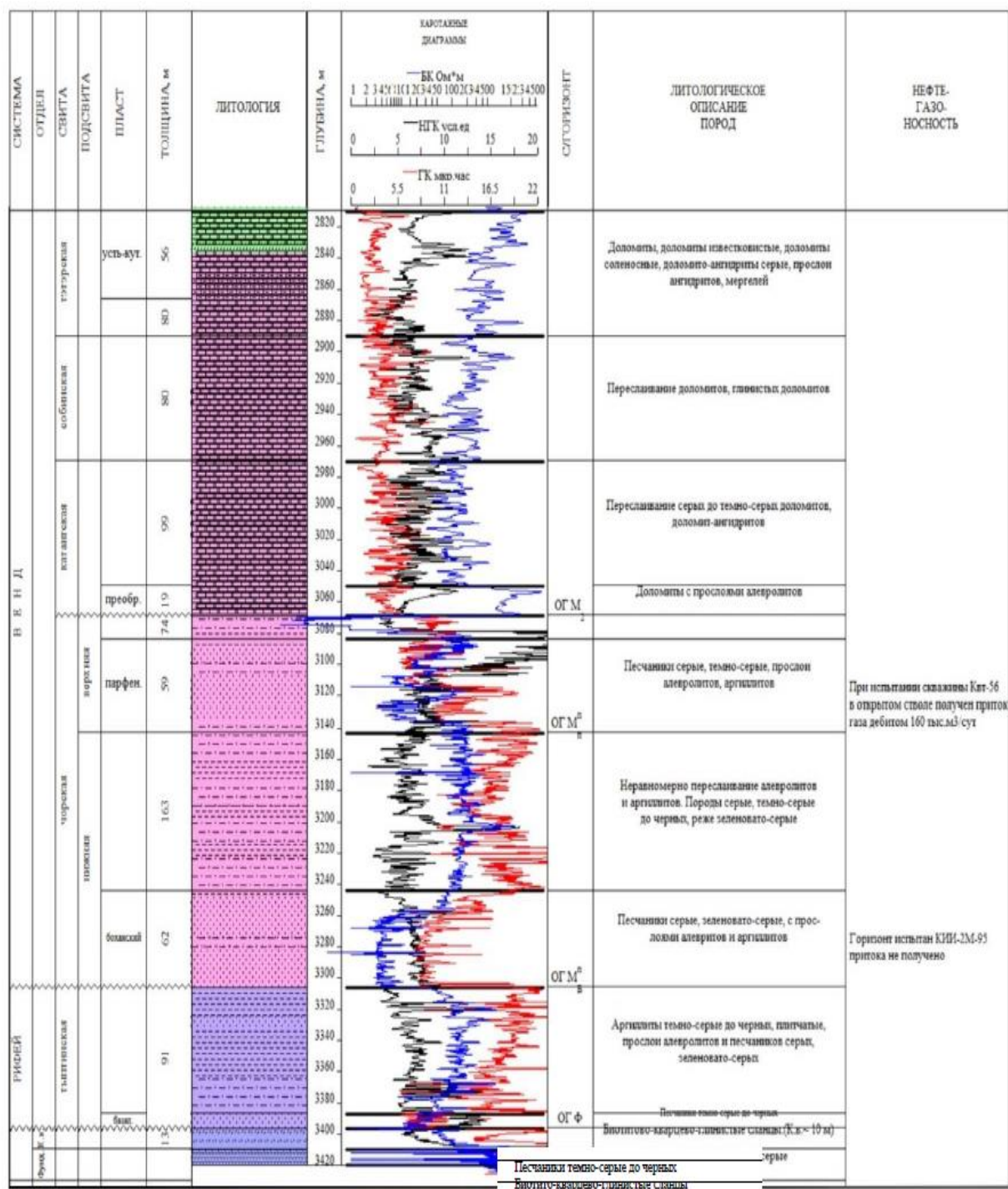
172. Цифровизация технологий добычи газа / В. Е. Столяров, И. К. Басниева, Н. А. Еремин [и др.] // *Актуальные проблемы нефти и газа*. – 2018. – № 2 (21). – URL: https://oilgasjournal.ru/issue_21/stolyarov-basniewa-eremin.html (дата обращения: 23.04.2026).

173. Шаповало, А. А. Методология управления развитием энергетики производственных объектов газовой отрасли / А. А. Шаповало // *Записки Горного института*. – 2025. – Т. 272. – С. 181–190.

174. Захаров, В. Н. Принципы и направления цифровизации горнотехнических систем комплексного освоения недр / В. Н. Захаров, Д. Р. Каплунов, В. С. Федотенко // *Горный журнал*. – 2023. – № 2. – С. 4–8. – DOI 10.17580/gzh.2023.02.01.

175. 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.

176. 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 : ИРННТУ, 2025. – С. 220–222.
177. Hammerschmidt, E. G. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines / E. G. Hammerschmidt // Industrial and Engineering Chemistry. – 1934. – Vol. 26, № 8. – P. 851–855.
178. Истомин, В. А. Газовые гидраты в природных условиях / В. А. Истомин, В. С. Якушев. – Москва : Недра, 1992. – 236 с.
179. Bukacek, R. F. Equilibrium moisture content of natural gases / R. F. Bukacek. – Chicago : Institute of Gas Technology, 1955. – Research Bulletin № 8. – 12 p.



Приложение 2. Справка о выполнении технического задания



Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Иркутск»
(ООО «Газпром добыча Иркутск»)

Газопромысловое управление Ковыктинского ГКМ в Жигаловском районе Иркутской области

«16» 03 2026 г.

№ 1

Справка

о выполнении технического задания и использовании результатов

Настоящим подтверждается, что техническое задание № 1 на выполнение работ «Геоэкологическая оценка территории в зоне газоконденсатного месторождения на основе геохимических параметров почв для объекта УКПГ-2 и эксплуатационные скважины» в рамках проекта «Обустройство Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Этап 5. Объекты УКПГ-2» (шифр 0092.020.014.P5.0004.149.0002.0000.000), выданное Пыжьянову Даниилу Игоревичу для проведения исследований по диссертационной работе, выполнено в полном объеме.

В рамках выполнения технического задания проведены: сбор и анализ исходных данных по работе скважин и УКПГ-2 Ковыктинского ГКМ; полевые исследования с отбором проб почвы по разработанной сетке на промплощадке (куст газовых скважин № 209, установка комплексной подготовки газа); лабораторные аналитические работы по определению содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов (Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn, Cd, Co, Fe, Hg) и мышьяка, а также азота, органического углерода, pH и иных параметров почв и сравнительный анализ с нормативными значениями; статистическая обработка полученных результатов; сезонный сравнительный анализ с учетом данных за период 2019–2025 гг.; построение моноэлементных карт пространственного распределения химических элементов на основе ГИС-технологий и 3D-моделирование взаимообусловленных геохимических параметров почв; разработан цифровой алгоритм для оптимизации подачи термобарического ингибитора метанола при работе газоконденсатной скважины и прогнозирования его расхода.

Результаты выполненных работ соответствуют требованиям технического задания и могут быть использованы при организации производственного экологического контроля, разработки системы объектно-ориентированного техно-геохимического мониторинга и масштабировании предлагаемого оптимизированного технологического режима работы газоконденсатных скважин и подачи метанола на объектах Ковыктинского газоконденсатного месторождения.

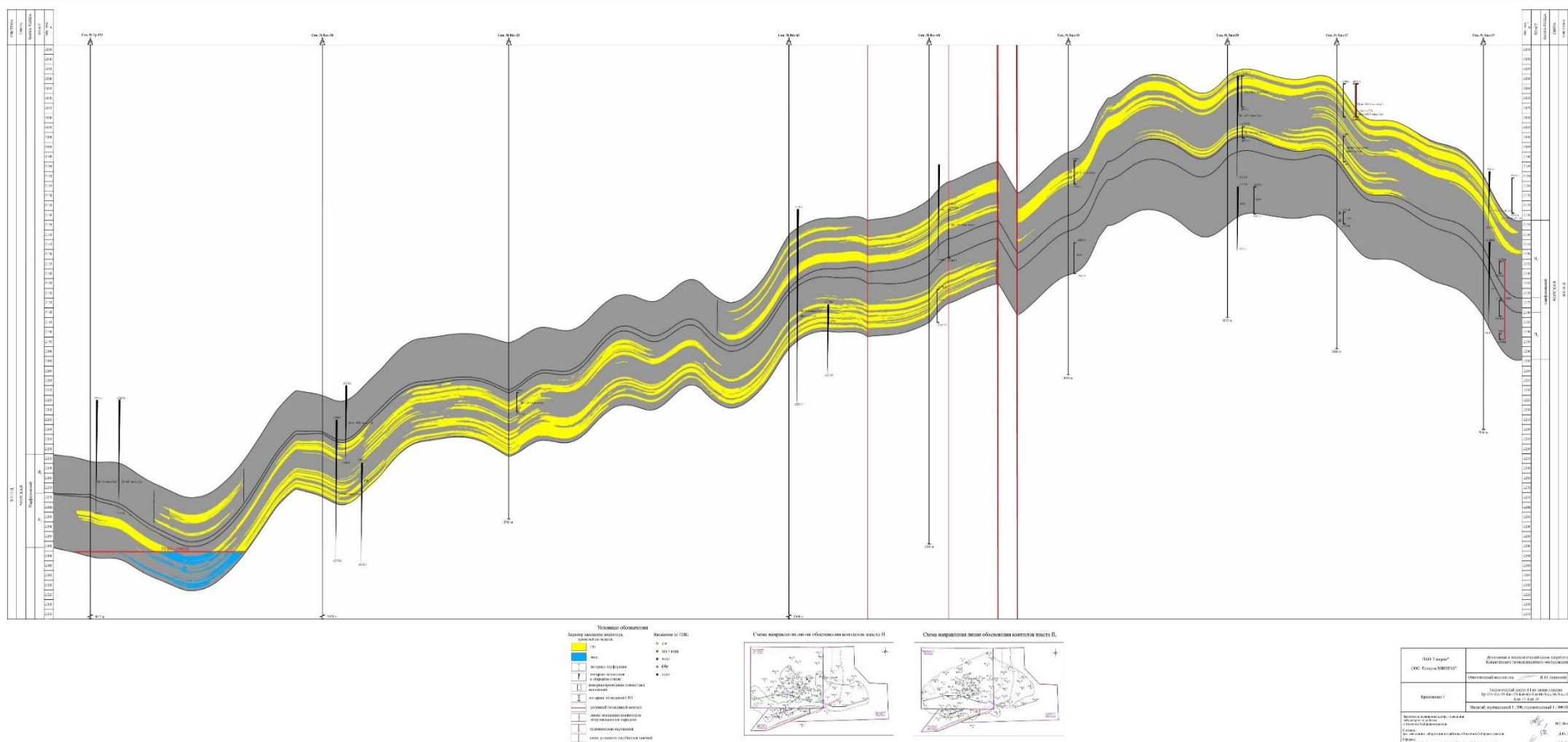
Замечаний к выполненной работе не имеется.

Начальник производственного отдела
по добыче и подготовке газа, газового конденсата
Ковыктинского газопромыслового управления



Д.В. Клыжко

Приложение 3. Геологический разрез месторождения по линии разведочных скважин



Приложение 4. Результаты анализов почв за 2025 год

Таблица П4.1 – Результаты анализов проб почв за 2025 год: валовые и подвижные формы (среднее содержание) по 8 узлам техно-геохимического мониторинга

№	Форма нахождения	pH	Cd, мг/кг	Co, мг/кг	Mn, мг/кг	Cu, мг/кг	As, мг/кг	Ni, мг/кг	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг	Сорг, %	Zc
Узел мониторинга №1												
1	валовые	4,4	1,7	5,7	1700,3	47,3	10,1	55,3	14,7	65,3	5,1	7,4
	подвижные		0,2	0,4	102,0	1,1	0,5	0,9	0,7	1,2		
2	валовые	4,6	1,0	8,9	1700,0	43,3	10,1	57,0	13,7	61,0	8,7	6,3
	подвижные		0,2	0,4	103,0	1,2	0,6	0,9	0,8	1,6		
3	валовые	4,9	1,5	3,9	1700,0	43,3	10,3	54,3	13,7	65,3	6,3	7,0
	подвижные		0,2	0,4	100,0	0,9	0,5	0,8	1,1	1,6		
4	валовые	5,0	1,9	1,0	1500,0	47,7	9,3	51,7	14,3	62,3	7,9	7,0
	подвижные		0,2	0,4	102,0	0,9	0,6	0,8	0,9	1,8		
Узел мониторинга №2												
5	валовые	5,1	1,3	1,0	1700,0	44,7	10,3	49,3	13,3	62,7	13,3	6,6
	подвижные		0,2	0,4	103,0	0,8	0,5	0,8	0,7	1,3		
6	валовые	4,8	1,6	1,0	1550,0	51,7	11,7	62,0	14,7	74,7	2,5	7,7
	подвижные		0,2	0,8	100,0	2,5	0,4	1,3	1,8	3,0		
7	валовые	4,9	1,5	9,0	1300,0	48,3	9,7	68,0	14,3	72,0	6,2	6,9
	подвижные		0,2	0,8	106,0	1,8	0,6	1,2	1,3	1,8		
Узел мониторинга №3												
8	валовые	4,5	1,0	5,3	1315,3	48,7	9,6	57,0	14,0	66,7	10,3	6,0
	подвижные		0,2	0,4	107,0	1,0	0,5	0,8	0,6	1,6		
9	валовые	4,5	1,5	1,0	1377,3	53,0	10,3	55,7	15,3	66,7	8,7	7,1
	подвижные		0,2	0,4	102,0	0,9	0,4	0,8	0,9	2,1		
Узел мониторинга №4												
10	валовые	4,4	2,6	1,0	1169,7	40,7	10,6	69,7	14,3	79,7	5,9	8,4
	подвижные		0,2	0,4	100,0	1,4	0,6	0,9	0,6	1,3		
11	валовые	4,6	1,6	6,4	849,3	38,0	9,8	77,0	12,7	78,7	0,9	6,6
	подвижные		0,2	0,8	106,0	2,7	0,5	1,2	1,5	2,3		
Узел мониторинга №5												
12	валовые	4,9	1,0	12,7	1116,0	45,3	9,2	62,0	13,0	69,0	11,3	5,7
	подвижные		0,2	0,4	107,0	1,1	0,5	0,9	1,0	1,6		

Продолжение таблицы П4.1

№	Форма нахождения	pH	Cd, мг/кг	Co, мг/кг	Mn, мг/кг	Cu, мг/кг	As, мг/кг	Ni, мг/кг	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг	Сорг, %	Zc
13	валовые	5,1	1,6	8,8	1097,3	51,7	11,3	61,0	13,7	70,7	4,6	7,3
	подвижные		0,2	1,0	100,0	3,3	0,6	1,5	2,0	3,0		
14	валовые	4,8	1,2	2,2	832,3	27,3	7,3	49,3	10,3	65,0	2,3	3,8
	подвижные		0,2	0,4	106,0	0,9	0,5	0,6	0,5	1,9		
Узел мониторинга №6												
15	валовые	4,9	1,0	9,9	963,0	24,7	7,9	66,7	8,8	81,0	4,4	4,6
	подвижные		0,2	1,2	107,0	3,1	0,5	1,0	1,0	2,0		
16	валовые	4,5	1,8	11,0	1024,3	40,0	14,7	61,3	13,0	74,3	9,3	8,1
	подвижные		0,2	0,8	107,0	2,2	0,4	1,3	1,2	3,2		
17	валовые	4,5	1,9	12,5	1403,3	52,0	15,0	59,3	15,3	68,7	7,6	9,1
	подвижные		0,2	0,4	102,0	1,1	0,6	0,9	0,9	1,5		
Узел мониторинга №7												
18	валовые	4,9	1,6	10,8	1087,3	32,7	8,1	63,0	10,4	73,0	3,2	5,7
	подвижные		0,2	0,7	106,0	2,6	0,5	0,8	0,8	1,9		
19	валовые	5,0	1,0	11,1	898,3	24,7	7,8	67,3	9,6	78,3	2,1	4,5
	подвижные		0,2	1,3	107,0	2,4	0,4	1,0	1,0	1,7		
20	валовые	4,8	1,0	20,4	1022,0	34,3	8,3	64,0	12,8	72,3	7,8	5,3
	подвижные		0,2	0,8	106,0	1,9	0,5	1,2	1,2	1,8		
Узел мониторинга №8												
21	валовые	4,9	1,0	19,1	1154,0	47,0	9,9	61,0	13,7	64,3	4,8	6,2
	подвижные		0,2	0,7	107,0	1,9	0,6	1,2	1,7	1,9		
22	валовые	4,5	2,0	16,0	1652,7	47,7	9,7	58,3	13,3	64,3	7,4	7,8
	подвижные		0,2	0,8	102,0	2,5	0,5	1,5	0,5	3,1		
Фоновая точка на удалении 10 км												
23	валовые	4,4	1,8	14,3	700	25	4	35	9,3	70,5	3,4	6,0
	подвижные		0,2	1,0	103,0	2,6	0,6	0,9	0,8	1,9		
ОДК/ПДК* вал		-	1,0–2	50	1500	66	5	40	65	110	-	—
ОДК/ПДК подвижные				5	80–700	3	-	4	6	23		
Кларки, ИМГРЭ			0,5	8	850	20	-	40	10	10		

Приложение 5. Результаты анализов почв за 2019–2023 годы

Таблица П5.1 – Содержание валовых форм элементов в почвах объектов КГКМ по данным производственного экологического мониторинга 2019 г., мг/кг

№ пробы	pH	Mn	Ni	Cu	Zn	Co	Cr	Fe	S	НП	Сорг, %
<i>Узел мониторинга №1</i>											
1	6,6	426	32	0,85	43	12	25	16 100	107	57	3,7
2	4,6	151	9,4	< 0,5	19	6,0	14	9490	401	52	3,3
3	5,9	539	62	12	65	17	40	22 100	317	< 50	1,2
<i>Узел мониторинга №2</i>											
4	7,1	403	16	4,6	17	7,7	12	6030	235	78	6,2
5	7,0	393	16	3,7	16	7,6	12	5890	322	< 50	8,8
6	6,8	394	16	4,3	16	7,6	12	5890	260	53	5,4
<i>Узел мониторинга №3</i>											
7	5,1	362	14	< 0,5	25	9,0	20	12 400	564	57	1,8
8	5,3	405	13	< 0,5	23	10	18	11 300	659	< 50	2,3
9	5,1	579	43	3,1	48	16	36	19 500	271	< 50	1,5
<i>Узел мониторинга №4</i>											
10	5,3	215	14	1,3	20	7,2	15	9110	549	355	6,1
11	4,3	317	21	< 0,5	35	8,7	26	15 300	356	< 50	5,6
12	6,2	433	24	1,4	24	12	14	8620	182	< 50	1,3
<i>Узел мониторинга №5</i>											
13	6,5	639	31	7,9	29	12	23	11 600	293	< 50	2,2
14	4,5	321	17	< 0,5	24	11	17	10 900	376	< 50	3,0
15	4,9	215	13	< 0,5	24	7,2	17	10 500	539	< 50	2,3
<i>Узел мониторинга №№6,7,8</i>											
16	4,3	334	9,3	< 0,5	21	8,1	13	9390	560	< 50	51
17	4,1	344	9,4	< 0,5	21	8,2	13	9590	402	68	4,1
18	4,5	362	23	< 0,5	36	11	25	16 800	465	< 50	1,2
ОДК/ПД	< 5,5	1500	40	66	110	–	–	–	–	–	–
К	> 5,5	1500	80	132	220	–	–	–	–	–	–

Таблица П5.2 – Динамика содержания валовых форм элементов в почвах куста газовых скважин за 2019–2022 гг., мг/кг

Год	№ пробы	pH	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb	Co	Cr	S	НП
2019	1	6,5	639	31	7,9	29	< 0,5	12	23	293	< 50
	2	4,5	321	17	< 0,5	24	< 0,5	11	17	376	< 50
	3	4,9	215	13	< 0,5	24	< 0,5	7,2	17	539	< 50
2020	4	6,0	280	11	8,2	20	2,3	3,0	10	148	176
	5	4,2	284	12	8,5	29	3,0	3,9	13	120	117
2021	6	4,8	226	27,9	24,8	38	0,5	7,0	24,9	156	5,0
2022	7	6,0	860	24	33	53	11,5	11	38	570	0,5
	8	8,0	680	45	30	79	6,5	14	41	240	0,5
ОДК/ПДК	< 5,5	1500	40	66	110	65	–	–	–	–	–
	> 5,5	1500	80	132	220	130	–	–	–	–	–

Таблица П5.3 – Содержание валовых форм элементов в почвах объектов КГКМ по данным производственного экологического мониторинга 2023 г., мг/кг

№ пробы	pH	Mn	Ni	As	Cu	Zn	Pb	Cd	Co	Cr	Hg	Fe	НП
<i>Узел мониторинга №1</i>													
1	7,2	1100	32	2,3	32	44	11,5	0,08	10	30	0,039	20 000	5,0
2	6,9	410	24	< 0,1	29	53	6,2	0,08	5,5	27	0,055	12 000	< 5
3	7,0	540	21	< 0,1	47	31	8,0	0,12	5,2	27	0,09	13 000	< 5
4	7,3	900	26	1,1	63	39	9,8	0,07	8	30	0,049	16 000	< 5
5	7,4	1100	30	2,9	33	42	13	0,19	9	30	0,031	19 000	< 5
<i>Узел мониторинга №2</i>													
6	7,0	880	38	4,1	75	48	8,3	< 0,05	10	36	0,07	18 000	< 5
7	6,5	740	25	5,0	19	44	10,8	< 0,05	8	28	0,040	17 000	< 5
8	7,1	880	33	6	23	45	13	< 0,05	10	37	0,042	22 000	< 5
9	7,8	820	28	5,3	27	45	10,8	< 0,05	8	30	0,036	18 000	< 5
<i>Узел мониторинга №3</i>													
10	4,2	2200	19	4,6	16	51	8,7	0,31	8	22	0,10	20 000	< 5
11	7,4	700	25	2,9	17	40	12	< 0,05	9	25	0,028	19 000	< 5
12	6,3	1100	37	1,2	73	55	8,6	0,14	9	30	0,059	19 000	5,4
13	6,2	630	21	0,7	51	33	5,7	0,11	5,1	18	0,09	10 500	< 5
14	4,9	920	29	0,7	58	39	6,8	< 0,05	8	23	0,057	15 000	< 5
<i>Узел мониторинга №4</i>													
15	7,9	800	40	2,1	23	47	9,2	< 0,05	11	39	0,050	21 000	6,2
16	8,3	970	59	2,4	25	63	9,7	< 0,05	15	40	0,027	25 000	5,8
17	8,4	720	53	1,1	18	56	7,0	< 0,05	13	41	0,022	21 000	5,1
18	8,4	840	59	2,5	26	63	11,3	< 0,05	14	48	0,024	26 000	32
<i>Узел мониторинга №5</i>													
19	5,4	2300	29	1,4	15	75	9,0	0,10	15	27	0,065	21 000	< 5
20	4,5	450	28	0,9	26	51	10,0	< 0,05	8	42	0,028	28 000	< 5
21	4,4	900	29	3,3	14,7	53	9,2	< 0,05	13	44	0,030	29 000	< 5
22	4,8	460	33	1,0	23	54	7,4	< 0,05	8	41	0,034	29 000	6,9
23	4,5	520	29	1,7	26	50	9,3	< 0,05	9	35	0,028	29 000	< 5
<i>Узел мониторинга №6</i>													
24	4,5	500	20	2,5	11,3	38	6,2	< 0,05	6,1	36	0,043	22 000	< 5
25	4,4	250	27	2,4	17	43	6,6	< 0,05	5,8	38	0,040	23 000	< 5
26	4,4	500	23	3,0	13,6	46	5,8	< 0,05	8	35	0,025	24 000	< 5
27	4,5	950	30	5,1	21	51	10,7	< 0,05	16	40	0,018	29 000	< 5
<i>Узел мониторинга №7</i>													
28	6,0	96	2,7	< 0,1	1,6	6,9	2,7	< 0,05	0,9	11,3	0,017	3500	< 5
29	5,3	210	5,0	< 0,1	4,2	18	3,6	< 0,05	1,8	15	0,014	7100	< 5
30	7,0	730	34	1,0	25	54	5,5	< 0,05	10	36	0,09	22 000	16
31	6,9	210	7,8	1,1	9,0	15	4,3	< 0,05	2,8	15	0,019	8600	12
<i>Узел мониторинга №8</i>													
32	4,7	480	29	3,6	18	52	11,1	< 0,05	9	41	0,027	29 000	< 5
33	4,2	540	16	4,5	12,4	40	8,7	< 0,05	5,4	27	0,034	20 000	< 5
34	5,4	1700	38	2,6	10,3	51	9,5	< 0,05	16	39	0,046	27 000	< 5
35	6,9	1500	21	7	19	45	16	< 0,05	12	33	0,039	28 000	< 5
Фоновая точка на удалении 10 км													
36	7,0	700	37	3	21	20	4,5	< 0,05	2,3	18	0,009	8700	< 5
37	4,5	740	36	4	24	5,4	6,2	< 0,05	12	40	0,013	25 000	< 5
38	7,0	733	37	3,5	25	48	10,3	< 0,05	13	39	0,017	22 000	5,3
Фоновая точка на удалении 40 км													
39	4,6	850	35	4	25	57	10,5	< 0,05	13	41	0,018	28 000	< 5
40	4,5	740	38	3,7	23	5,4	6,2	< 0,05	12	40	0,013	25 000	< 5
41	6,9	840	39	3,2	21	43	7,5	< 0,05	8	33	0,058	16 000	< 5
ОДК/ПД	< 5,5	1500	40	5	66	110	65	1,0	—	—	2,1	—	—
К	> 5,5	1500	80	10	132	220	130	2,0	—	—	2,1	—	—