

На правах рукописи



Нечаев Дмитрий Андреевич

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ
КАРСТООПАСНОСТИ**

(на примере нефтепровода «Чаянда-ВСТО»)

Специальность – 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

АФТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Строкова Людмила Александровна**
доктор геолого-минералогических наук,
профессор отделения геологии Инженерной
школы природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического
университета (г. Томск)

Официальные оппоненты: **Готман Наталья Залмановна**
доктор технических наук,
профессор кафедры «Автомобильные дороги,
аэродромы, основания и фундаменты»
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Российский университет
транспорта» (г. Москва)

Щербаков Сергей Владимирович
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией прогнозного
моделирования в геосистемах кафедры
динамической геологии и гидрогеологии
геологического факультета федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Пермский
государственный национальный
исследовательский университет» (г. Пермь)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский (Приволжский)
федеральный университет» (г. Казань)

Защита диссертации состоится «4» декабря 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.423.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30 (III уч. Корпус, ауд. 3326).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (сайт <http://ursmu.ru>)

Автореферат разослан «4» октября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.г.-м.н, профессор



Абатурова И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи со стратегической важностью объектов трубопроводного транспорта нефти и газа к их эксплуатации предъявляются особые требования для обеспечения безопасной и безостановочной работы. В настоящее время одни из важнейших трубопроводных систем, такие как магистральный нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий Океан» (далее – ВСТО), магистральный газопровод «Сила Сибири», расположены на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями, которые характеризуются развитием опасных геологических процессов. Еще большую важность для предприятий нефтегазового сектора имеют промысловые трубопроводы, которые непосредственно связывают ресурсные базы (месторождения) с магистральными трубопроводами. Эксплуатация промысловых трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях с высокими внутренними нагрузками, а также непростыми условиями технического обслуживания, предполагает проведение постоянного мониторинга для предотвращения изменения проектного положения. Одним из опасных геологических процессов при эксплуатации трубопроводов является *карст* – процесс, вызывающий серьезные нарушения грунтового основания и обуславливающий высокую аварийность участков трубопроводов, где он зафиксирован. Прогнозирование карстовых процессов в пределах трассы трубопровода особенно важны, в связи с чем имеется необходимость в разработке методических подходов к оценке и прогнозу карстообразования на протяженных и труднодоступных участках трубопроводов.

Степень разработанности научной проблемы. Оценке и описанию карстовых процессов предложено достаточно много решений и объяснений такими авторами, как Максимович Г.А., Дублянский В.Н. и Дублянская Г.Н., Толмачев В.В., Андрейчук В.Н., Катаев В.Н., Хоменко В.П. Также на сегодняшний день существуют некоторые классификации и методы прогнозной оценки опасности территорий к развитию карста и расчету карстовых провалов, которые предложили Саваренский И.А., Толмачев В.В., Шахунянц Г.М., Троицкий Г.М. и др. Если говорить о вопросах воздействия карста на промысловые трубопроводы, то открытых публикаций весьма ограниченное количество. Середин В.В., Галкин В.И., Пушкарев М.В., Лейбович Л.О. представили варианты методик по специальному инженерно-геологическому районированию трассы на основе балльной оценки и вероятностно-статистического подхода к оценке трубопровода по степени надежности его работы в условиях карста. Существует более обширная методика оценки карстово-суффозионных процессов на основе интегральной оценки множества факторов, предложенная Катаевым В.Н., Щербаковым С.В., которая апробирована при проектировании трассы водовода Солдатовского нефтяного месторождения Пермского края. Имеется методика комплексной оценки карстоопасности на основе множественного корреляционного анализа инженерно-геологических данных, предложенная Ермолаевой А.В., которая

использовалась при оценке проектируемого магистрального газопровода «Сила Сибири» в республике Саха (Якутия). Существующие на сегодняшний день работы по оценке карстоопасности трассы трубопроводов рассматривают активизацию карста на стадии проектирования, при этом авторы указывают о необходимости рассмотрения карста в период эксплуатации трубопроводов. Одним из главных вопросов при рассмотрении воздействия карста на трубопровод является решение задачи о напряженно-деформированном состоянии трубопроводов, расположенных в зонах развития карстующихся пород, с учетом их конструктивных особенностей под воздействием эксплуатационных и изменяющихся карстовых процессов. Вопросы оценки напряженно-деформированного состояния сооружений в условиях развития карста обсуждались Чичеловым В.А., Зариповым Р.М., Шаммазовым А.М., Готман Н.З., Кожевниковой Н. В.

Необходимо отметить, что линейные сооружения, такие как промысловые трубопроводы, отличаются своей значительной протяженностью и резким изменением инженерно-геологических условий в пределах трассы, где проявления карстового процесса и его активизация связаны с условиями строительства и эксплуатации трубопроводов и требует постоянного контроля и прогнозирования участков возможного его развития. В связи с этим диссертационная работа рассматривает оценку и прогноз карстоопасности в малоизученных, сложных по инженерно-геологическим условиям трасс промысловых трубопроводов в период эксплуатации по данным мониторинга технического и геотехнического состояния линейной части трубопроводов.

Целью исследования является обоснование комплексной инженерно-геологической оценки и прогноза карстоопасности в пределах трассы промысловых трубопроводов и влияние карстовых процессов на изменение напряженно-деформированного состояния трубопровода.

Идея работы заключается в том, что для оценки устойчивого состояния трубопровода в условиях карстоопасности необходимо провести прогноз развития карста по трассе трубопровода и определить напряженно-деформированное состояние участков трубы для определения дальнейших решений по их мониторингу и эксплуатации.

Объект исследования – инженерно-геологические условия массива пород трассы и эксплуатационные характеристики нефтепровода «Чаянда-ВСТО».

Предмет исследования – изменение напряженно-деформированного состояния нефтепровода «Чаянда-ВСТО» в условиях развития карстовых проявлений в период его эксплуатации.

Для достижения цели последовательно выполнены следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ и систематизацию существующих представлений об оценке и прогнозе карстового процесса и влияния карста на условия эксплуатации промыслового трубопровода;
2. Провести с использованием множественного корреляционно-регрессионного анализа количественную оценку значимости факторов

инженерно-геологических условий и их влияния на степень и характер закарстованности территории трассы;

3. Выполнить инженерно-геологическое районирование трассы трубопровода по уязвимости к карсту на основе пространственной оценки данных;

4. Провести численное моделирование для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода в условиях развития карста;

5. Разработать алгоритм принятия определенных технических решений по мониторингу и эксплуатации трубопровода исходя из результатов расчета напряженно-деформированного состояния участка трубопровода в условиях карстоопасности.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Впервые для трассы промыслового трубопровода «Чаянда-ВСТО» установлено, что развитие карста обусловлено инженерно-геологическими условиями территории и эксплуатационными характеристиками трубопровода.

2. С помощью множественного корреляционно-регрессионного анализа возможно определить значимые факторы инженерно-геологических условий территории, обуславливающих развитие карста в пределах трассы промыслового трубопровода.

3. Научно обосновано применение метода соотношения частот для построения карты районирования трассы трубопровода по уязвимости к карсту, позволяющей определить конкретные границы зон, в которых наиболее вероятно возникновение карста.

4. Доказано, что для оценки нагрузки на трубопровод в условиях развития карста, необходимо рассматривать как напряжения, возникающие в участке трубопровода, так и деформации трубы под действием непроектных нагрузок, представленных карстовым провалом. Реализованное численное моделирование позволяет определить деформации и перемещения трубопровода в условиях развития карста и тем самым обосновать возникновение упругопластических изгибов трубы, ранее выявленных по результатам внутритрубной диагностики (далее – ВТД).

5. Научно обосновано применение конкретных технических решений для определённых участков трубопровода на основе районирования трассы трубопровода по уязвимости к карсту и оценки напряженно-деформированного состояния карстоопасных участков.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Использование множественного корреляционно-регрессионного анализа позволяет установить значимые факторы инженерно-геологических условий территории, которые влияют на распределение карстопроявлений в пределах трассы трубопровода (соответствие пункту паспорта научной специальности (далее – п.п.н.с.) – 2, 11).

2. Районирование трассы трубопровода по карстоопасности, основанное на анализе закономерностей пространственного распределения карстовых форм в зависимости от геолого-литологических и гидрогеологических факторов, а также характеристик трубопровода, с учетом

веса каждого, позволяет прогнозировать местоположение карстопроявлений (п.п.н.с. – 12, 17).

3. Технические решения по дальнейшей эксплуатации трубопровода должны приниматься на основе определения изменения напряженно-деформированного состояния участков трубопровода, расположенных в карстоопасных зонах, с учетом максимально возможных диаметров карстовых провалов и расчета критерия надежности (п.п.н.с. – 3, 12).

Теоретическая и практическая значимость работы определяется в следующем:

- Предложена методика комплексной оценки опасных участков промысловых трубопроводов в условиях карстоопасности на этапе эксплуатации объекта, позволяющая определять объемы проведения ревизии, обследования трубопровода, мониторинга и необходимость в ремонте.

- Предложена методика определения расчетного диаметра карстового провала, основанная на ранее утвержденных методах расчета с учетом особенностей эксплуатации трубопровода;

- Разработан перечень основных мероприятий по карстозащите трубопровода, которые возможно использовать в зависимости от «класса безопасности» трубопровода для обеспечения как его надежной эксплуатации, так и эффективного мониторинга.

Результаты оценки напряженно-деформированного состояния карстоопасных участков нефтепровода «Чаянда-ВСТО» позволили определить природу возникновения упругоэластических изгибов в результате активации карстовых процессов и разработать рекомендации по защите трубопровода и корректировке программы мониторинга и диагностики.

Фактический материал. Для анализа и сбора данных была использована информация по 665 скважинам инженерно-геологических изысканий (2013 г.), данные по геотехническому мониторингу на основе 30 гидрогеологических скважин и 7 циклам мониторинга (с 2019 г. по 2023 г.), результаты по визуальному объезду вдоль трассы нефтепровода «Чаянда-ВСТО» (70 км) в 2023г., отбор 4 проб грунта в карстоопасных районах трассы для дальнейшего анализа, а также анализ результатов внутритрубной диагностики на основе 7074 записей магнитного дефектоскопа (данные 2021г.). На основе данных построены факторные карты территории трассы, цифровые модели исследуемого объекта, карты уязвимости территории к карсту и двумерные модели конечных элементов для оценки напряженно-деформированного состояния (далее – НДС).

Методология и методы исследования. В работе использованы следующие научные методики:

- дешифрирование космоснимков и создание цифровых моделей рельефа территории трассы нефтепровода при помощи программ ArcGIS Desktop, PCI Geomatica.

- методы статистической обработки данных (множественный корреляционный анализ, регрессионный анализ, метод соотношения частот)

для оценки взаимосвязи факторов активации карста в пределах трассы трубопровода. Обработка данных производилась при помощи программ MS Excel, Statistica и встроенных инструментов ArcGIS Desktop.

– численное моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния системы «грунтовой массив – трубопровод – карст» с учетом особенностей трубопровода (наличие упругопластических изгибов), грунтового массива и карста. Обработка и анализ производились в программном комплексе Midas GTX NX.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивалась научно-методологической обоснованностью исследования, использованием значительного объема материалов инженерно-геологических изысканий и диагностики трубопровода, геофизических исследований, статистическими закономерностями между данными. Основные положения, используемые автором, основываются на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин (теория надежности трубопроводов, теория вероятностей, математическая статистика), сопряженных с предметом исследования диссертации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 195 страниц машинописного текста, 54 рисунка, 25 таблиц, список литературных источников из 205 наименований.

Во введении содержится обоснование актуальности темы диссертации, формулируется цель и задачи работы, её научное и практическое значение. Намечены основные этапы исследования и пути решения поставленных задач.

В первой главе представлен анализ существующих методов оценки и общего состояния вопросов эксплуатации и мониторинга промышленных трубопроводов в условиях развития карстовых процессов.

Вторая глава посвящена разработке методики комплексной оценки карстоопасности для промышленных трубопроводов.

В третьей главе приведены практические результаты районирования трассы по уязвимости к карсту на примере промышленного нефтепровода «Чаянда-ВСТО».

Четвертая глава содержит основные аспекты по разработке технических решений на основе применения результатов районирования трассы трубопровода с возможным развитием карста, построением расчетных моделей.

В заключении приведены основные выводы по исследованию.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю Л.А. Строковой за внимание, ценные советы и замечания при написании данной работы. Автор выражает большую благодарность доктору геол.-минерал. наук, заведующему кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии УГГУ Абатуровой И.В. за ценные советы и замечания, рекомендации и помощь. Автор выражает глубокую признательность преподавателям ТПУ канд. геол.-минерал. наук, доценту ОГ ИШПР Недолирко Н.М., канд. геогр. наук, доценту ОГ ИШПР Решетько М.В., канд. геол.-минерал. наук, доценту ОГ ИШПР Кузеванову К.И., доктору геол.-минерал. наук, заведующему кафедрой-руководителю отделения геологии на правах

кафедры ИШПР Гусевой Н.В. за помощь и рекомендации. Автор выражает благодарность коллективу геотехнической службы инженерно-технического центра ООО «Газпром добыча Ноябрьск» Гостеву Д.В., Дудкину Р.Н. за веру в проект и помощь в его внедрении и апробации на Чаяндинском НГКМ. Особая благодарность главному инженеру проекта ООО «СИБАУТСОРСПРОЕКТ» Ларкину Д.А. за совместную работу, профессионализм и решение нестандартных задач. Автор благодарит начальника Чаяндинского НГПУ Давыдова Ю.С., персонал линейно-эксплуатационной службы ООО «Газпром добыча Ноябрьск» в лице Гасояна М.Г. за предоставленную возможность апробации работы, помощь и защиту интересов. Большая благодарность семье и близким родственникам за поддержку и веру.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. *Первое защищаемое положение*

Использование множественного корреляционно-регрессионного анализа позволяет установить значимые факторы инженерно-геологических условий территории, которые влияют на распределение карстопроявлений в пределах трассы трубопровода.

При рассмотрении особенностей развития карста в условиях эксплуатации промысловых трубопроводов возникает необходимость в изучении множества факторов, которые способствуют развитию карста, среди которых выделены следующие группы: геологические, структурно-тектонические, гидрогеологические, геоморфологические, инженерно-геологические. Также для характеристики влияния трубопровода были определены основные эксплуатационные параметры трубопровода и факторы растительного покрова. Для оценки взаимосвязи между карстом на территории трассы и выделенными факторами обосновано применение *интегрального статистического метода*, а именно множественного корреляционно-регрессионного анализа, согласно следующим последовательным этапам:

1. Первоначально определяется результирующий признак карстоопасности.

2. Территория трассы трубопровода разбивается на равные по протяженности участки, в пределах которых вычисляются значения исследуемых величин (факторов и результирующего признака карстоопасности).

3. Производится оценка и исключение из анализа участков, в пределах которых отсутствуют карстующиеся породы (в данном исследовании - карбонатные), подтверждаемая по результатам оценки коэффициента корреляции Спирмена.

4. На основе обработанной выборки экспериментальных данных рассчитываются коэффициенты корреляции между показателем карстоопасности и факторами с последующей проверкой значимости по критерию Стьюдента.

5. На основе наиболее значимых факторов рассчитывается уравнение множественной регрессии для показателя карстоопасности.

6. Проводится проверка связи на основе критерия Стьюдента и Фишера, а также оценка адекватности связи показателя карстоопасности и оставшихся факторов.

В качестве результирующего признака выбран показатель *плотности карста (ед./кв.км)*, который позволяет оценить карст в условиях ограниченной информации по основным параметрам карстопоявлений и при отсутствии информации по подземным формам карста. Далее трасса нефтепровода «Чаянда-ВСТО» была условно поделена на равные отрезки длиной 100 м. Для каждой точки извлечены значения показателя карстоопасности – плотности карстовых проявлений, а также 665 наблюдений по двадцати четырем факторам, представленным в таблице 1.

Таблица 1 – Группы и факторы природно-технической среды, используемые при оценке активации карстовых процессов в пределах трассы промышленного трубопровода

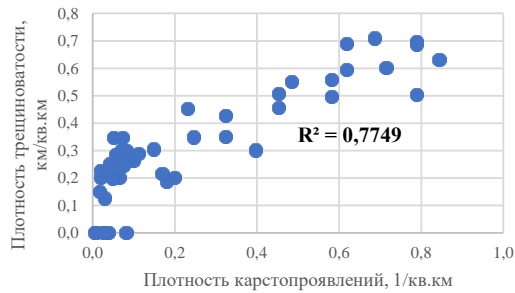
№ п/п	Основные группы факторов	Факторы	Единицы измерения
1	Геологические факторы	Литология	кв. м
		Мощность грунтов покровной толщи	м
2	Геоморфологические факторы	Уклон	град.
		Кривизна	д.е.
		Абсолютная отметка высоты поверхности	м н. у. м.
		Расстояние до водотоков и водоемов	м
		Коэффициент инфильтрации	д.е.
		Топографический индекс влажности	д.е.
3	Структурно-тектонические факторы	Расстояние до тектонических разломов	м
		Плотность трещиноватости	км/кв.км
4	Гидрогеологические факторы	Уровень грунтовых вод	м
		Минерализация подземных вод	г/л
		Скорость грунтовых вод	м/с
5	Факторы растительного покрова	Атмосферно-устойчивый вегетационный индекс	д.е.
6	Эксплуатационные факторы	Распределение температуры по трубопроводу	Цельсий
		Давление трубопровода (вес) на грунт	кПа
		Распределение давления по трубопроводу	кгс/см ²
7	Инженерно-геологические факторы	Модуль деформации грунтов покровной толщи	МПа
		Угол внутреннего трения грунтов покровной толщи	град
		Удельное сцепление грунтов покровной толщи	кПа
		Льдистость пород	д.е.
		Влажность грунтов покровной толщи	д.е.
		Плотность грунтов при природной влажности	г/см ³
		Коэффициент пористости грунтов покровной толщи	д.е.

Оценка генеральной выборки значений производится исходя из определения степени взаимосвязи между плотностью карста и геологическим строением территории. В итоге из 665 точек наблюдения выбраны 47 точек в

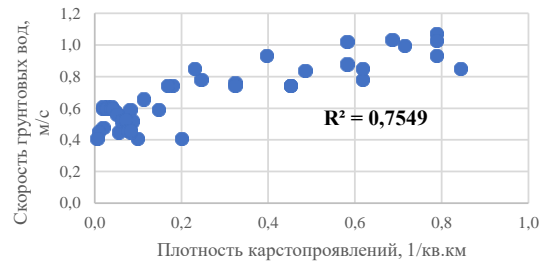
пределах пикетов трассы, где зафиксировано распространение карбонатных пород (известняк и доломиты), предрасположенных к развитию карста. Так как характер распределения почти всех факторов из выборки подчиняется закону нормального распределения, производится расчет парных коэффициентов корреляции r -Пирсона. Значимость полученных коэффициентов корреляции R проверяется согласно критерию Стьюдента ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$). Факторы, имеющие низкие значения коэффициента корреляции (меньше табличного значения) и не соответствующие критерию Стьюдента, исключаются из дальнейшего анализа данных (таблица 2). Диаграммы распределения значимых факторов представлены на рисунке 1.

Таблица 2 - Оценка значимости коэффициентов корреляции R по t -критерию Стьюдента (указаны в порядке убывания значения R)

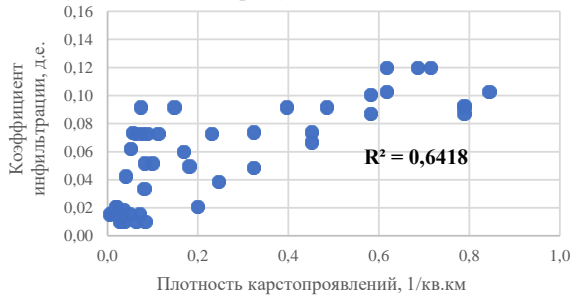
№	Наименование фактора	R	$t_{\text{факт}}$	$t_{\text{табл}}$	Оценка значимости
X ₁	Плотность трещиноватости, км/кв.км	0,881	12,63	2,01	значимый
X ₂	Скорость грунтовых вод, м/с	0,873	12,14	2,01	значимый
X ₃	Коэффициент инфильтрации I_s , д.е.	0,769	8,16	2,01	значимый
X ₄	Вегетационный индекс ARVI, д.е.	-0,742	-7,51	2,01	значимый
X ₅	Мощность грунтов покровной толщи, м	-0,741	-7,48	2,01	значимый
X ₆	Давления участка (вес) на грунт, кПа	0,723	7,10	2,01	значимый



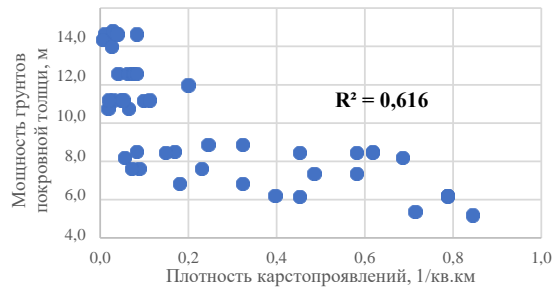
а) Плотность трещиноватости, км/кв.км



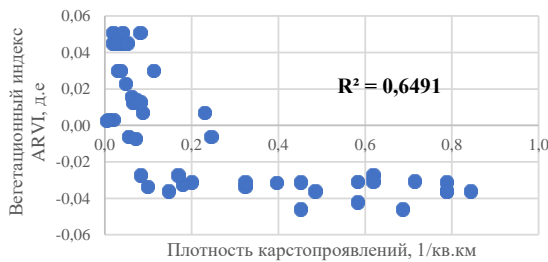
б) Скорость грунтовых вод, м/с



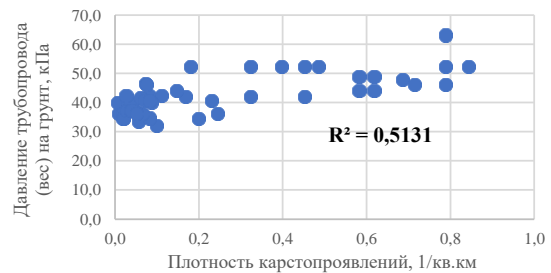
в) Коэффициент инфильтрации I_s , д.е.



г) Мощность грунтов покровной толщи m_r , м



д) Вегетационный индекс ARVI, д.е.



е) Давление трубопровода (вес) на грунт, кПа

Рисунок 1 – Диаграммы распределения значимых факторов (а-е) и резульативного показателя (плотности карстопоявлений)

Далее производится расчет регрессионного уравнения связи. Преобразуя коэффициенты регрессии к стандартизированному виду, получаем уравнение связи факторов X_{1-6} с результирующим показателем Y (плотность карста):

$$Y = 0,45 \cdot X_1 + 0,45 \cdot X_2 - 0,04 \cdot X_3 - 0,25 \cdot X_4 + 0,15 \cdot X_5 + 0,12 \cdot X_6 \quad (1)$$

Уравнение включает оптимальный набор из шести факторов. Проверка надежности уравнения связи и возможности его использования определяются путем использования критерия Фишера F и расчета средней ошибки аппроксимации $\bar{\varepsilon}$. Согласно выполненному регрессионному анализу $F_{\text{факт}} = 25,28$, $F_{\text{табл}} = 2,33$, следовательно, $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, подтверждается наличие связи. Расчет средней ошибки аппроксимации, равной $\bar{\varepsilon} = 5,61\%$, позволяет сделать вывод, что подобранное уравнение связи достаточно точно описывает изучаемые зависимости.

Наибольшее влияние на наличие карста в пределах трассы трубопровода обусловлено гидрогеологическим фактором (скоростью движения грунтовых вод) и структурно-тектоническим (плотностью трещиноватости). Однозначно стоит отметить наличие в уравнении связи значимых коэффициентов регрессии для вегетационного индекса ARVI, который указывает, что с уменьшением индекса (редким покровом растительности) увеличивается возможность развития карстовых процессов. На развитие карстовых процессов воздействует вес трубопровода – увеличение его нагрузки на окружающий грунт способствует развитию карста. Также значимым является коэффициент инфильтрации вод, позволяющий утверждать, что влияние именно поверхностных вод наиболее важно учитывать при прогнозировании карста в пределах трассы нефтепровода.

Полученное уравнение связи наглядно демонстрирует, что помимо основных факторов развития карста, представленных геологическим строением территории и ее гидрологическими характеристиками, развитию карста также способствуют эксплуатационные нагрузки и факторы техногенного воздействия. Таким образом, полученные значения коэффициентов корреляции и коэффициенты уравнений регрессии выделяют среди всех выбранных факторов наиболее значимые, которые необходимо учесть в дальнейшем для пространственного анализа и районирования трассы трубопровода по уязвимости к карсту, а плотность карста выступает оптимальным параметром в условиях протяженности трассы и малой изученности территории.

2. Второе защищаемое положение.

Районирование трассы трубопровода по карстоопасности, основанное на анализе закономерностей пространственного распределения карстовых форм в зависимости от геолого-литологических и гидрогеологических факторов, а также характеристик трубопровода, с учетом веса каждого, позволяет прогнозировать местоположение карстопроявлений.

Принимая во внимание использование в мониторинге космоснимков, аэрофотоснимков, картографического материала, а также учитывая сложность сбора инженерно-геологической информации, *пространственная оценка* данных более эффективна для проведения районирования. В рамках данного

исследования предлагается использовать метод соотношения частот (Frequency ratio, FR), который зарекомендовал себя при оценке воздействия опасных геологических процессов (оползни, сели, подтопление и т.д.) на определенных территориях. Для интерпретации и визуализации карстоопасности предлагается использовать построение карты районирования по уязвимости к карсту, основанной на оценке взаимосвязи выбранных факторов. Общий алгоритм построения карты районирования представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Алгоритм построения карты уязвимости территории к карсту

Проведенный множественный корреляционно-регрессионный анализ выделил из всего набора факторов (24 фактора) шесть наиболее информативных, на основе которых строится карта районирования трассы по уязвимости к карсту. Для определения «веса» каждого фактора методом соотношения частот FR были посчитаны площади каждого класса каждого фактора и их доли (%). Далее в пределах каждого класса определены площади проявления карста (%), а также отношение площади карста к площади самого класса (вес FR). Для определения веса всего фактора необходимо рассчитать коэффициент прогнозирования (Prediction rate, PR), который вычисляется на основе отношения относительной частоты среди всех классов фактора к минимальной относительной частоте классов среди всех факторов. Проведенные расчеты позволили выявить «вес» каждого класса выбранных факторов, представленных в таблице 3.

Затем растровые тематические факторные карты с присвоенными значениями весов FR и PR для их классов интегрируются в итоговую карту, где каждая ячейка имеет определенное значение индекса уязвимости (Karst susceptibility index – KSI), определяемого по формуле:

$$KSI = \sum_{x=1}^n FR \cdot PR, \quad (2)$$

Таблица 3 – Значения весов соотношения частот FR для каждого класса

Наименование фактора	Класс	Площадь класса %	Площадь карста %	Вес класса	Вес фактора
Литология	Оруктахская свита J_1or	13%	7%	0,51	1,75
	Усть-кутская свита O_1uk	5%	7%	1,51	
	Средний отдел ϵ_2	5%	7%	1,26	
	Олёкминская свита ϵ_1ol	5%	18%	3,63	
	Суринская свита O_1sr	8%	7%	0,82	
	Ичерская свита $\epsilon_1i\check{c}$	14%	33%	2,38	
	Верхоленская свита ϵ_3vl	16%	13%	0,83	
	Чарская свита $\epsilon_1\check{c}r$	13%	9%	0,71	
	Илгинская свита ϵ_3il	21%	0%	-	
Скорость грунтовых вод, м/с	менее 0,05	6%	2%	0,38	2,87
	0,05-0,10	4%	13%	3,20	
	0,10-0,50	50%	40%	0,82	
	более 0,5	41%	45%	1,09	
Мощность грунтов покровной толщи, м	менее 6	64%	50%	0,79	1,18
	6-14	19%	30%	1,53	
	более 14	16%	20%	1,21	
Плотность трещиноватости, км/кв.км	менее 0,1	26%	11%	0,42	1,89
	0,1-0,2	9%	4%	0,49	
	0,2-0,4	43%	65%	1,54	
	более 0,4	22%	19%	0,86	
Давление трубопровода (вес) на грунт, кПа	менее 30	37%	51%	1,37	1,29
	30-40	31%	22%	0,70	
	более 40	32%	28%	0,86	
Вегетационный индекс ARVI, д.е.	-1,0-0,0	21%	21%	1,01	1,00
	0,0-0,1	21%	19%	0,91	
	0,1-0,19	34%	37%	1,10	
	0,19-0,30	20%	22%	1,07	
	0,30-0,74	4%	1%	0,31	
Коэффициент инфильтрации I_s , д.е.	0,01	10%	16%	1,65	1,00
	0,01-0,02	14%	15%	1,05	
	0,02-0,03	15%	23%	1,48	
	более 0,03	61%	46%	0,76	

Разработана модель районирования на основе значений индекса уязвимости KSI с выделением таксонов с определенными граничными условиями, представленными в таблице 4.

Таблица 4 – Модель районирования по карстоопасности

Таксон	Степень уязвимости	Граничные условия таксонов по индексу KSI	Значения KSI
I	Неопасная	$KSI = KSI_{min} + 0,25 \cdot K$	менее 12,6
II	Потенциально-опасная	$KSI = (KSI_{min} + 0,75 \cdot K) - (KSI_{min} + 0,25 \cdot K)$	12,6-30,05
III	Опасная	$KSI = KSI_{min} + 0,75 \cdot K$	больше 30,05

где $K = KSI_{max} - KSI_{min}$, KSI_{max} – максимальное значение индекса, KSI_{min} – минимальное значение индекса.

Для определения граничных условий классификационного показателя принимаем, что при максимальном значении KSI_{max} возникают неблагоприятные условия для устойчивости сооружения (трубопровода) и

существует высокая вероятность возникновения карста, и наоборот, при минимальном значении коэффициента KSI_{min} трубопровод находится в устойчивом положении и вероятность возникновения карста близка к нулю. Согласно граничным значениям индекса уязвимости, выделены следующие таксоны:

- Таксон III – Опасные зоны – области, в пределах которых уже существуют карстопроявления, наблюдается их скопление и высокая плотность, а также участки с максимальной нагрузкой факторов;

- Таксон II – Потенциально-опасные зоны – области, в пределах которых уже существуют карстопроявления, и участки, на которых зафиксирована возможность возникновения карста в связи с единичным или комплексным воздействием некоторых факторов;

- Таксон I – Неопасные зоны – области, в которых отсутствует карст.

В итоге разработана карта уязвимости территории трассы к карсту, представленная на рисунке 3.

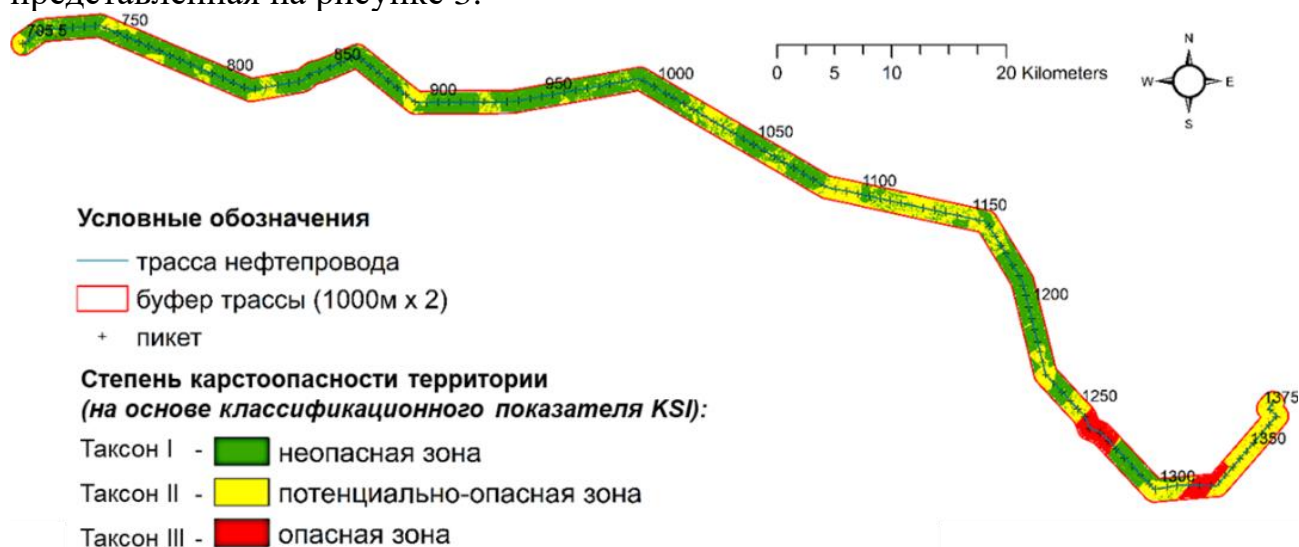


Рисунок 3 – Карта уязвимости территории трассы нефтепровода к карсту

Приведенное районирование территории посредством разработки карты уязвимости трассы к карсту позволяет идентифицировать границы карстоопасных зон, в пределах которых необходимо провести анализ геологического строения и особенностей трубопровода для выделения участков, для которых в дальнейшем производится расчет напряжений и деформаций в условиях возможного развития карста.

3. Третье защищаемое положение.

Технические решения по дальнейшей эксплуатации трубопровода должны приниматься на основе определения напряженно-деформированного состояния участков трубопровода, расположенных в карстоопасных зонах, с учетом максимально возможных диаметров карстовых провалов и расчета критерия надежности.

Для принятия конкретных технических решений по дальнейшей эксплуатации, а также для получения численных показателей степени опасности необходимо оценить возможное воздействие карстовых провалов на

трубопровод посредством расчета конструктивной надежности такой системы. Поэтому в пределах уязвимых к карсту зон выбираются *типовые участки карстоопасности* – участки с явным проявлением карстовых процессов. В пределах каждого участка вычисляется возможный максимальный диаметр карстового провала по методике СП 499.1325800.2021, предложенной Г.М. Троицким, для расчета устойчивости цилиндра грунта над карстовой полостью с учетом нагрузки от фундамента сооружения и специфики трубопровода. Полученные расчетные диаметры провалов позволяют произвести построение расчетной схемы и разработку модели участков для определения эквивалентных напряжений и максимальных деформаций в зоне развития предполагаемых карстовых полостей.

Расчет прочности основан на предельном состоянии несущей способности трубопровода, при котором дальнейшая эксплуатация, характеризующаяся пределом прочности материала (временным сопротивлением металла σ_u , МПа) и предельными допустимыми деформациями (пределом текучести σ_y , МПа), в существующих условиях невозможна. С учетом соответствующих расчетных сопротивлений пределу прочности R_u и пределу текучести R_y условие надежности по прочности промышленного трубопровода запишем в виде

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq \min\{R_u; R_y\}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное напряжение.

С учетом данного условия надежности применительно к участкам промышленных трубопроводов возможны следующие состояния:

1. $\sigma_{\text{ЭКВ}} < R_y$ – условие надежности выполняется, отсутствуют предпосылки к разрушению стенки трубопровода;
2. $R_u > \sigma_{\text{ЭКВ}} \geq R_y$ – возможно образование пластических деформаций;
3. $\sigma_{\text{ЭКВ}} \geq R_u$ – условия надежности не выполняются, высокая вероятность разрыва стенки.

Помимо прочностных характеристик рассматриваемый нами сценарий воздействий карстового провала на трубопровод подразумевает изучение возникающих деформационных изгибов. Поэтому целесообразно произвести оценку надежности трубопровода по условию местной потери устойчивости, которая характеризуется значением изгибной деформации и представляет следующую интерпретацию критерия надежности:

$$\varepsilon_b \leq [\varepsilon_b], \quad (4)$$

где ε_b – максимальное значение изгибной деформации;

$[\varepsilon_b]$ – предельно допустимое значение изгибной деформации.

Предлагается ввести использование коэффициента запаса прочности, значение которого, с учетом фактических изгибных деформаций, запишем в виде:

$$K_\phi = \frac{[\varepsilon_b]}{\varepsilon_b} \quad (5)$$

При этом проектные значения коэффициента запаса, согласно ГОСТ Р 55990-2014, вычисляются по формуле:

$$K_{\text{пр}} = \frac{nk_1k_n}{m} \quad (6)$$

где n – коэффициент надежности по внутреннему давлению;

k_1 – коэффициент надежности по материалу трубы;

k_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода;

m – коэффициент условий работы трубопровода.

Таким образом, условие надежности по критерию изгибных деформаций будет иметь следующий вид:

$$K_{\phi} \geq K_{\text{пр}} \quad (7)$$

Если данное условие выполняется, то можно говорить об отсутствии возможных изгибных деформаций участка трубопровода. Если же фактический коэффициент запаса меньше проектного, значит, возможно возникновение деформаций и необходимо проведение инструментальных измерений на данном участке трубопровода. На основе предложенной оценки надежности трубопровода для каждого из исследуемых типовых карстоопасных участков, которые были ранее идентифицированы на этапе построения карты уязвимости, присваивается определенный **класс безопасности**: *высокий, нормальный, низкий, чрезвычайно низкий*. Каждому классу соответствует определенная оценка надежности на основе прочности и деформации трубопровода. Методика идентификации карстоопасных участков на основе карты уязвимости с присвоением определенного класса безопасности приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Методика идентификации опасных участков промышленных трубопроводов в условиях карстоопасности

Проведенное районирование на основе карт уязвимости позволяет рассмотреть геологические продольные разрезы в определённых границах трассы. Качественная оценка продольного геологического разреза на основе

критериев, обозначенных на рисунке 5, позволяет выделить наиболее неблагоприятные участки в границах потенциально-опасных и опасных зон уязвимости карста – *типовые участки карстоопасности*. Именно для данных участков необходимо произвести расчет геометрических параметров возможных и существующих форм карстовых проявлений. Для определения дальнейших технических решений в рамках мониторинга и эксплуатации трубопровода в «опасных» и «потенциально-опасных» зонах необходимо произвести численный анализ прочности и надежности путем реализации метода конечных элементов. Для модели «трубопровод-грунт-карст» определяются основные элементы и источники данных (внутритрубная диагностика, геотехнический мониторинг, инженерные изыскания и т.п.), которые позволят наиболее точно аппроксимировать грунтовое основание и трубопровод в условиях карстоопасности.



Рисунок 5 – Алгоритм выделения типовых участков карстоопасности и расчета предполагаемых карстовых провалов

Особое внимание уделяется заданию непроектных нагрузок, вызванных образованием карстового провала. Карстопроявления в модели представляются в виде провала грунта, представленного в виде цилиндрической выемки в пределах карстующейся породы под осью трубопровода с шириной, равной расчетному диаметру карстового провала. Для их интерпретации предлагается использовать расчетный метод определения диаметра карстового провала, приведённый в СП 499.1325800.2021 и адаптированный под решение данной задачи. Изменения в методике заключаются в следующих аспектах:

1. В качестве нижней части сооружения (площадь нагрузки) выступает глубина и ширина траншеи подземного трубопровода;
2. В качестве нагрузки от сооружения необходимо принимать среднее удельное давление на единицу поверхности контакта трубопровода с грунтом,

которое учитывает как нагрузку от веса трубопровода с перекачиваемым продуктом, так и нагрузку от грунта засыпки траншеи;

3. Нагрузка от трубопровода с продуктом включается в расчет только с глубины его заглубления, выше границы заглубления учитывается только нагрузка от соответствующего слоя грунта и слоя грунта засыпки траншеи.

Учитывая вышеприведенные особенности, разработана расчетная схема для диаметра предполагаемого карстового провала под участком промышленного трубопровода (рисунок 6).

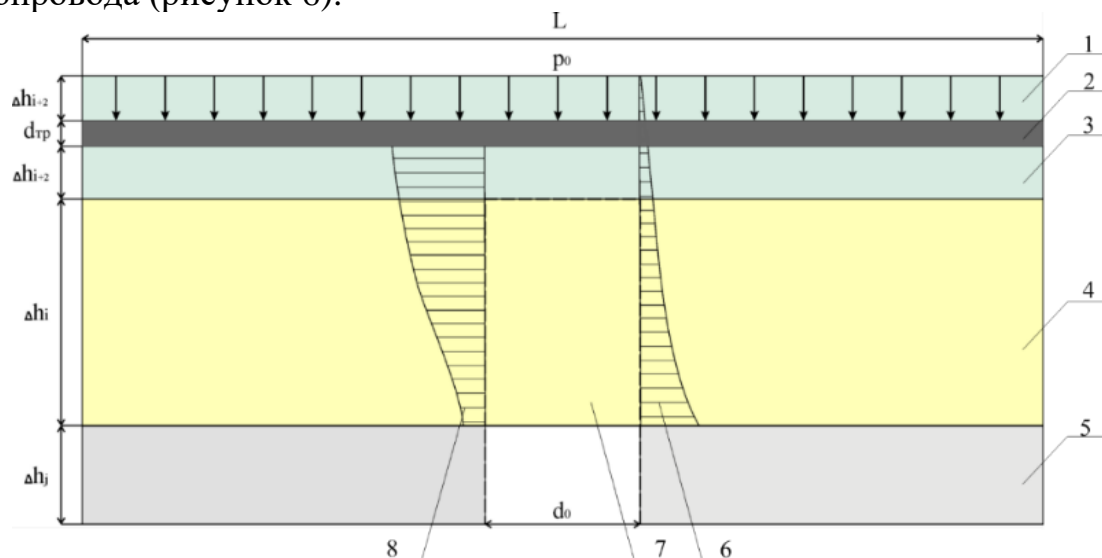


Рисунок 6 – Схема расчета устойчивости цилиндра грунта над карстовой полостью с учетом нагрузки от подземного участка трубопровода: 1 – слой грунта засыпки, 2 – участок трубопровода, 3 – слой грунта подсыпки, 4 – покровная толща грунта, 5 – скальный карстующийся грунт, 6 – эпюра давления выше лежащих слоев грунта, 7 – цилиндрическая поверхность обрушения покровной толщи грунтов, 8 – эпюра напряжений от веса трубопровода; Δh_j – толщина j -го слоя грунта (скальный грунт), м; Δh_i – толщина i -го слоя грунта (покровная толща), м; Δh_{i+1} – толщина $i+1$ -го слоя грунта (слои покровной толщи грунта), м; Δh_{i+2} – толщина $i+2$ -го слоя грунта (грунт засыпки и подсыпки), м; d_0 – расчетный диаметр карстового провала, м; $d_{тр}$ – диаметр участка трубопровода с учетом изоляции, м; L – длина модели; p_0 – среднее удельное давление на единицу поверхности контакта трубопровода с грунтом, кПа

Предлагаемый подход использован при расчете диаметров карстовых провалов на типовых участках карстоопасности нефтепровода «Чаянда-ВСТО» (всего 26 участков), расположенных в потенциально-опасных и опасных зонах согласно карте уязвимости. Участки имеют ярко выраженную карстово-обвальную форму по продольному геологическому разрезу вдоль трассы нефтепровода либо же ранее зафиксированные карстовые формы и деформации в рассматриваемых границах. Проведенный расчет по модернизированной методике относит исследуемую территорию трассы нефтепровода к категории Б согласно СП 11-105-97 часть II, что подтверждает высокую точность расчетных диаметров провалов и соответствует средним диаметрам карстовых воронок, ранее зафиксированных в ходе инженерных изысканий.

В качестве расчетных участков для разработки моделей были определены схожие по характеристикам типовые участки карстоопасности (выбрано 6 участков из 26), в пределах которых были рассчитаны предполагаемые

диаметры провалов. Выбраны участки, в границах которых ранее были зафиксированы по результатам ВТД упругопластические изгибы трубопровода (2 участка), с наибольшим предполагаемым диаметром карстового провала (1 участок) и участки, схожие по геологическому строению и эксплуатационным характеристикам трубопровода (3 участка). В результате приведенного моделирования получены значения эквивалентных напряжений, а также максимальные деформации трубопровода при соответствующих нагрузках (рисунок 7).

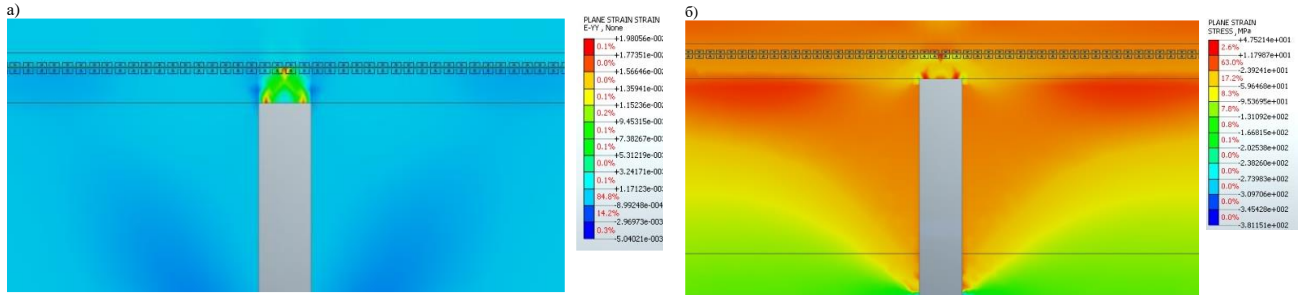


Рисунок 7 – Результаты моделирования для расчетного участка с упругопластическим изгибом в условиях развития карстового провала (пример - участок № 25, ПК1369-ПК137): а) эквивалентные деформации; б) эквивалентные напряжения

Согласно результатам проведенного моделирования, концентрации напряжений и деформаций сосредоточены в области над карстовым провалом, максимальные концентраторы напряжений и деформаций в том числе сосредоточены непосредственно на балочной модели участка нефтепровода. Ярko выражены деформации грунта и их движение в область карстового провала, что свидетельствует о точности построения модели. Приведенный подход в моделировании позволяет также определить общие перемещения трубопровода в условиях образования карстовых провалов (рисунок 8). Полученные численные значения могут подтвердить направления изгибных деформаций, которые были ранее выявлены по результатам диагностики трубопровода, и тем самым являются доказательством возникновения изгибов под воздействием карста.

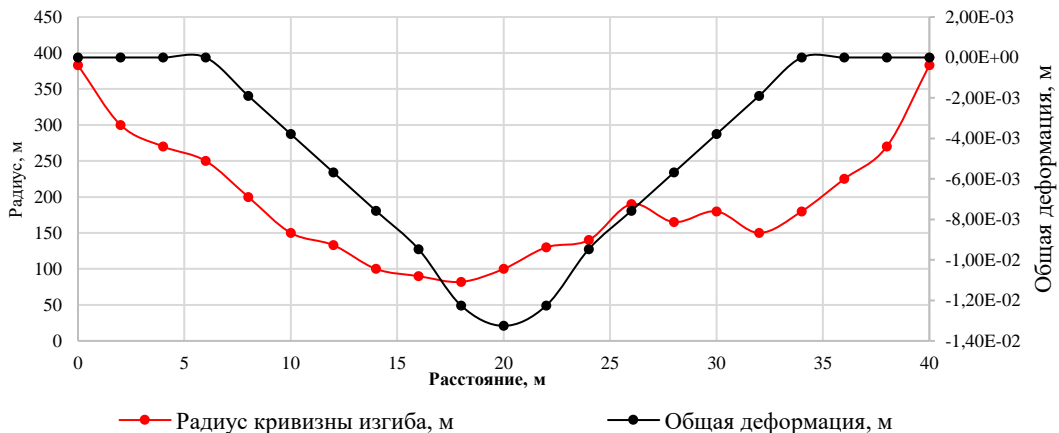


Рисунок 8 – Сопоставление общего перемещения грунта (модель) и графика кривизны изгиба одного из рассматриваемых расчетных участков нефтепровода (участок № 25)

Аналогично разработаны модели для всех расчетных участков и определены соответствующие классы безопасности согласно расчету соответствующих показателей по формулам (3)-(7).

Отмечаем, что несмотря на то, что все участки по критерию надежности по прочности (по эквивалентным напряжениям) полностью выдерживают нагрузку при максимальных значениях возможных карстовых провалов, значения критерия надежности по деформациям для некоторых расчетных участков (3, 17, 19, 25) не соответствуют проектным значениям, что говорит о воздействии карста на трубопровод в период эксплуатации (таблица 5).

Таблица 5– Расчет класса безопасности для типовых участков карстоопасности

№ расчетного типового участка, границы	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	R_u , МПа	R_y , МПа	ϵ_b	K_ϕ	K_{np}	Класс безопасности
7, ПК1156-ПК1158	38,92	232,042	207,97	0,0028	3,5	2,11	Высокий
3, ПК1025-ПК1026	46,22			0,005	2,01		Нормальный
22, ПК1300-ПК1305	40,53			0,002	5,1		Высокий
17, ПК1251-ПК1252	26,22			0,0067	1,5		Нормальный
19, ПК1260-ПК1261	37,88			0,0112	0,9		Нормальный
25, ПК1369-ПК137	47,52			0,0198	0,5		Нормальный

На основании таблицы 4 возможно определить класс безопасности для каждого расчетного участка, значение которого далее распространяется на аналогичные типовые участки из ранее сформированных групп. Исходя из значений класса безопасности для каждого участка, границ «потенциально-опасных» и «опасных зон» (с учетом присвоения значения класса безопасности «Высокий» для «неопасных» зон трассы), вся трасса ранжируется на классы безопасности с конкретными границами (рисунок 9). Предложенный подход создания групп участков, схожих по геологическим и эксплуатационным признакам, позволяет сократить объем проведения работ. Однако обращаем внимание, что наиболее сложные участки необходимо рассматривать индивидуально с построением и анализом напряженно-деформированного состояния участка для выявления особых нагрузок (пример в данной работе, расчетный участок №25).

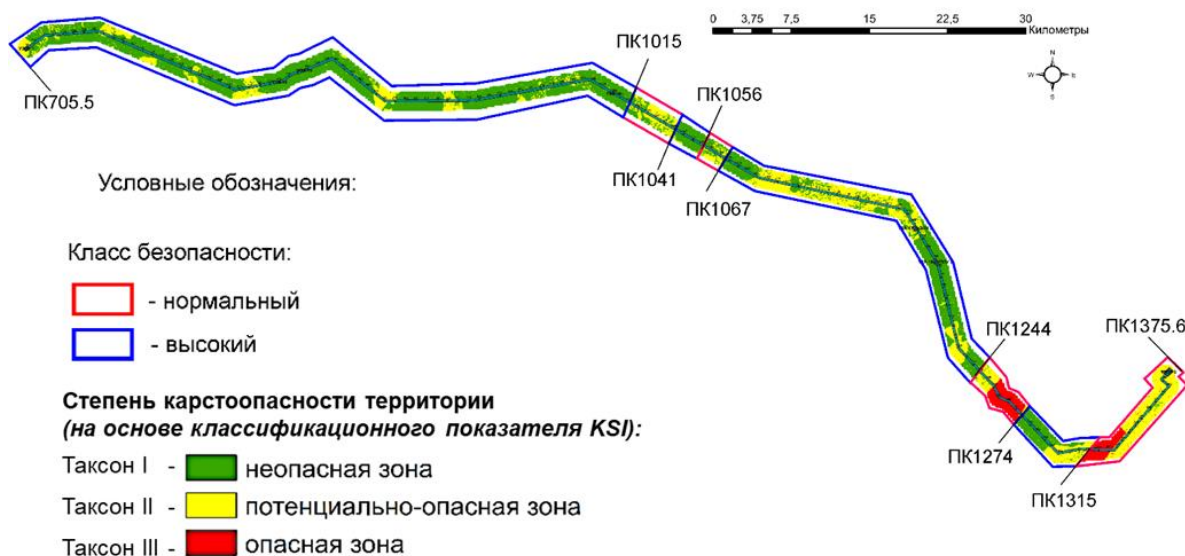


Рисунок 9 – Карта-схема уязвимости трассы трубопровода к карсту и границы участков по классам безопасности согласно оценке напряжений и деформаций

На основе современных нормативно-технических документов, опыта эксплуатации трубопроводных систем, с учетом ранжирования всех прогнозных участков карстоопасности по классам безопасности, разработан перечень мероприятий, позволяющий определить основные технические решения по защите и мониторингу трассы трубопровода от карста в зависимости от класса безопасности участка трубопровода (таблица 6).

Таблица 6 – Основные мероприятия по защите промысловых трубопроводов от карста в зависимости от класса безопасности участка трубопровода

Мероприятия	Класс безопасности			
	Высокий	Нормальный	Низкий	Чрезвычайно низкий
<i>Геотехнические</i>	Не требуются	Не требуются, укрепление грунта по 2 типу	Закрепление грунта по 1 типу	Закрепление грунта по 1 типу ¹⁾
<i>Водозащитные</i>	Требуются при необходимости, при наличии скопления вод в пределах обвалования трубопровода			
<i>Конструктивные</i>	На этапе эксплуатации не реализуется, только при тех. перевооружении, капитальном ремонте и т.д.			
<i>Технологические</i>	Без изменения режима	Без изменения режима, перевод работы на резервный трубопровод (резервную нитку) ²⁾	Снижение давления, перевод работы на резервный трубопровод (резервную нитку)	Прекращение перекачки продукта в ближайшее время, перевод работы на резервный трубопровод, снижение давления до атмосферного до проведения ремонтных мероприятий
<i>Эксплуатационные:</i>				
<i>Технический осмотр</i>	Без изменений, возможно уменьшение объема ³⁾	Без изменений	Увеличение периодичности осмотра	Увеличение периодичности осмотра, внеплановый осмотр
<i>Геотехнический мониторинг (карстомониторинг)</i>	Без изменений, возможно уменьшение объема ³⁾	Установка дополнительных деформационных марок с шагом 50 метров, с периодичностью замера не менее 2-х раз в год	Установка дополнительных деформационных марок с шагом 25 метров, с периодичностью замера не менее 2-х раз в год	Установка дополнительных деформационных марок с шагом 25 метров, с периодичностью замера не менее 2-х раз в год
<i>Ревизия трубопровода</i>	Без изменений, не реже 1 раза в 8 лет	Возможно изменение срока, не менее 1 раза в 8 лет	Проведение в ближайшие 2 года	Проведение в самое ближайшее время
<i>Внедрение волоконно-оптических систем мониторинга ВОС⁴⁾ и др.</i>	Не требуется	Не требуется	Внедрение при возможности подключения на всем протяжении участка	Внедрение при возможности подключения на всем протяжении участка
<i>Проведение диагностики (в приоритете ВТД)⁵⁾</i>	Не требуется, без изменений	Не менее 1 раза в 8 лет	Увеличение периодичности, но не менее 1 раза в 8 лет	Сокращение срока до минимального (1 раз в 1-2 года)

- 1) В зависимости от результатов визуального обследования устанавливается тип закрепления грунта, учитывая реальные возможности эксплуатирующей организации и необходимость закрепления в текущий момент эксплуатации.
- 2) Перевод работы на резервные трубопроводы предполагается при технической возможности (их наличия или возможно подключения временных дюкерных линий).
- 3) По решению эксплуатирующей организации возможно уменьшить объем работ в рамках мониторинга для оптимального распределения трудовых ресурсов на участки, которые подвержены большим нагрузкам, или оставить периодичность и объемы мониторинга согласно текущему уровню.
- 4) Также в качестве альтернативных вариантов возможна установка инклинометров, тензометров и др. средств, обеспечивающих постоянный карстомониторинг участка трубопровода.
- 5) ВТД производится при технической возможности установки временных камер запуска и приема диагностических устройств.

На основе предложенного подхода установлено, что 12,9% от всей протяженности нефтепровода «Чаянда-ВСТО» присвоен класс безопасности «Нормальный», а площадь «потенциально-опасных» и «опасных» зон, предрасположенных к развитию карста, составляет 36,2% от всей исследуемой площади в пределах трассы. На основе предложенных мероприятий даны общие рекомендации по защите от карстоопасности данного нефтепровода, которые могут являться обоснованием внедрения новых методов геотехнического мониторинга и изменения режима эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе реализован методический подход, основанный на комплексной инженерно-геологической оценке и прогнозе карстоопасности в пределах трассы трубопровода. В рамках подхода путем интегральной оценки взаимного влияния факторов и результирующего признака карстоопасности разрабатывается карта уязвимости трассы промышленного трубопровода к активизации карста. Полученная карта позволяет определить границы участков, предрасположенных к развитию карста. Для определения степени воздействия возможных карстовых процессов на трубопровод предлагается произвести оценку наиболее уязвимых его участков по напряженно-деформируемому состоянию. Данная оценка состоит в определении критерия надежности по прочности (эквивалентные напряжения) и по устойчивости (изгибные деформации), с учетом специфики карстового процесса и его влияния на участок трубопровода в зоне воздействия. Предложенный подход позволяет ввести понятие «класса безопасности», следуя которому возможно ранжировать всю трассу трубопровода на участки с определенной степенью карстоопасности и значением надежности трубопровода. В рамках данной работы предложен перечень основных мероприятий, которые необходимо применять в зависимости от «класса безопасности» трубопровода для обеспечения как его надежной эксплуатации, так и эффективного мониторинга.

Апробация методики выполнена на конкретном примере – промышленном нефтепроводе «Чаянда-ВСТО», пролегающем в зоне развития карбонатного карста. В качестве наиболее эффективного метода для оценки факторов активизации карста обосновано применение множественного корреляционно-регрессионного анализа и метода соотношения частот, на основе которых

построена итоговая карта уязвимости. Валидация и оценка полученных результатов показали высокую достоверность. Для оценки напряженно-деформированного состояния используется численное моделирование наиболее предрасположенных к карсту участков. В результате получены значения эквивалентных напряжений и изгибных деформаций, по значениям которых определены «классы безопасности» для участков нефтепровода. По полученным данным предложены технические решения по мониторингу и дальнейшей эксплуатации нефтепровода в условиях развития карстовых процессов.

В качестве дальнейшего совершенствования предлагаемого методического подхода необходимо разработать классификацию типовых карстоопасных участков и определить возможные состояния трубопроводов по стабильности для принятия решений в рамках геотехнического мониторинга. Также следует апробировать предлагаемые подходы к оценке других промысловых трубопроводов в различных малоосвоенных регионах. Однозначно предлагаемая методика позволяет выявить первопричины возникающих аномалий в стенке трубопровода (изгибы, дефекты геометрии) в период эксплуатации и определить перечень конкретных технических решений для организации эффективного мониторинга и надежной эксплуатации трубопроводов в условиях развития карста.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Нечаев, Д.А. Оценка карстово-суффозионной опасности территории трассы нефтепровода «Чаянда-ВСТО» / Д.А. Нечаев, Л.А. Строкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 7. – С. 78-92. – DOI 10.18799/24131830/2023/7/4053. – EDN MBWHZO.

2. Нечаев, Д.А. Оценка опасных геологических процессов при эксплуатации нефтепровода «Чаянда-ВСТО» / Д.А. Нечаев, Л.А. Строкова // Разведка и охрана недр. – 2023. – № 3. – С. 53-59. – DOI 10.53085/0034-026X_2023_03_53. – EDN KLJKDW.

3. Нечаев, Д.А. Применение линеаментно-геодинамического анализа для оценки карстоопасности на примере трассы нефтепровода Чаянда-ВСТО / Д.А. Нечаев // Известия Уральского государственного горного университета. – 2023. – № 1(69). – С. 57-66. – DOI 10.21440/2307-2091-2023-1-57-66. – EDN SUMDPS.

4. Строкова, Л.А. Роль опасных геологических процессов при эксплуатации нефтепровода "Чаянда-ВСТО" / Л.А. Строкова, Д.А. Нечаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 9. – С. 86-98. – DOI 10.18799/24131830/2022/9/3752. – EDN EWMHFW.

В материалах конференций:

5. Нечаев, Д.А. Методы прогнозирования активации карстовых процессов на территории трасс линейных трубопроводов // Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология. Выпуск 25. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (28-29 марта 2024 г.). Москва: Издательство «Геоинфо», – С.423-425.

6. Нечаев, Д.А. Методологические подходы определения опасных участков трубопроводов, расположенных в сложных геологических условиях / Д. А. Нечаев // Бурение и нефть. – 2023. – № S2. – С. 123-124. – EDN XNWIEG.

7. Нечаев Д.А., Строкова Л.А. Методологические основы определение опасных участков трубопроводов, расположенных в сложных геологических условиях распространения криолитозоны // Geological international student summit 2023. Геологический международный студенческий саммит 2023: Материалы конференции (6-10 апреля 2023 года, Санкт-Петербург). - Санкт-Петербург: Свое издательство, 2023. – С. 173-175.

8. Нечаев, Д.А. Идентификация опасных участков трассы трубопроводов, расположенных в сложных геологических условиях, с использованием геоинформационных систем // Новые технологии в газовой промышленности: газ, нефть, энергетика : XIV Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов : тезисы докладов, Москва, 14–18 ноября 2022 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2022. – С.200-201.

9. Нечаев, Д.А. Разработка комплексной оценки идентификации угроз участков магистральных трубопроводов с коррозионными дефектами в сложных геологических условиях //Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума имени академика МА Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горногеологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 5-9 апреля 2021 г. Т. 2.—Томск, 2021. – 2021. – Т. 2. – С. 417-419.

