

УДК 624.131

ОЦЕНКА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ТРАССЫ НЕФТЕПРОВОДА «ЧАЯНДА–ВСТО»

Нечаев Дмитрий Андреевич^{1,2},
nechaevdmitryrf@gmail.com, nechaev.da@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ООО «Газпром добыча Ноябрьск»,
Россия, 629806, г. Ноябрьск, ул. 40 лет Победы, 2.

Актуальность работы обусловлена необходимостью определения опасных участков нефте- и газопроводов, расположенных в малоосвоенных и малонаселенных территориях, в связи с развитием опасных геологических процессов.

Цель: оценка интенсивности и прогноз развития карстово-суффозионных процессов в пределах трассы трубопровода, расположенного в южной Якутии, и определение наиболее весомых факторов, активизирующих этот процесс.

Методы: обработка данных инженерно-геологических изысканий, оцифровка геологических карт и дешифрирование космоснимков для построения факторных карт, влияющих на активацию процесса карста: геологического строения трассы; кризисы, уклона, экспозиции поверхности; плотности дренажа поверхности и плотности общей тектонической трещиноватости; построение карты плотности карстопоявлений по трассе согласно маршрутному обследованию и данным инженерно-геологических изысканий при строительстве. В заключение составлена карта восприимчивости территории трассы к развитию карстово-суффозионных процессов на основе метода соотношения частностей (Frequency Ratio).

Результаты. Проведено описание инженерно-геологических условий трассы нефтепровода. Для оценки карстово-суффозионной опасности трассы трубопровода были произведены расчеты ожидаемых размеров провалов в основании сооружений по методике Г.М. Шахуняца. Используя метод соотношения частностей, получены корреляционные зависимости между факторами и очагами карстопоявлений по трассе трубопровода. Разработанная на основе этих результатов карта восприимчивости позволяет установить конкретные границы участков для определения решений по наблюдениям за развитием экзогенного процесса и оптимизации процессов эксплуатации нефтепровода. Предложенную методику можно применить и на других протяженных газо- и нефтепроводах, расположенных в сложных геологических условиях.

Ключевые слова:

Нефтепровод, инженерно-геологические процессы, геокриологические условия, карст, многолетнемерзлые грунты, метод соотношения частностей, карта восприимчивости.

Введение

Освоение новых нефтяных и газовых ресурсов Республики Саха (Якутия), которые расположены полностью в криолитозоне, невозможно представить без протяженных систем трубопроводов для сбора нефти и газа. На территории южной Якутии расположены стратегически важные объекты транспорта нефти и газа (к примеру, магистральный нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий океан» (далее ВСТО), магистральный газопровод «Сила Сибири» и др.). Необходимость изучения и последующего контроля взаимосвязей в системе «трубопровод–криолитозона» является одной из приоритетных задач в связи с постоянной деградацией многолетнемерзлых грунтов (ММГ), которая активизирует различные опасные экзогенные процессы (ЭГП) [1–7]. Наиболее распространенным из ЭГП в южной Якутии являются карстово-суффозионные процессы, встречающиеся повсеместно [5, 7–9].

Анализируя публикации, посвященные оценке опасности карстовых процессов, можно прийти к выводу, что, в принципе, предложено достаточно много решений и объяснений процесса, существуют некоторые классификации и методы по прогнозной оценке

опасности территорий к развитию карста. Однако стоит отметить, что на практике эти методы и подходы малоприменимы для оценки карстово-суффозионной опасности больших малонаселенных и слабоизученных в геологическом плане территорий (южная Якутия в том числе, прим. авт.). Учитывая суровые климатические условия, низкую логистику территории и отсутствие постоянного мониторинга, применение альтернативных и современных подходов к оценке и прогнозу развития ЭГП на таких территориях особенно актуально [10–17].

Принимая во внимание все вышеизложенное, авторами предлагается произвести оценку карстово-суффозионной опасности протяженного линейного объекта – нефтепровода «Чаянда–ВСТО», пролегающего в южной Якутии, с применением современных технологий ГИС-обработки и подходов к обработке региональных и зональных факторов [18–24].

Целью данной работы является оценка интенсивности и прогноз развития карстово-суффозионных процессов в пределах трассы трубопровода, и определение наиболее весомых факторов, активизирующих этот процесс.

Характеристика инженерно-геологических условий трассы трубопровода

Трасса трубопровода расположена на территории Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения (далее ЧНГКМ) Ленского улуса в южных районах Республики Саха (Якутия), берет начало в районе основной инфраструктуры установки подготовки газа и стабильного конденсата ЧНГКМ и далее направляется в юго-восточном направлении к магистральному нефтепроводу Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО) [26, 27].

Климат района исследования резко-континентальный, с большими годовыми амплитудами температуры (средняя месячная температура зимой минус 30,3 °С, средняя месячная в летний период 16,9 °С) и неравномерным распределением осадков по территории трассы нефтепровода. Однозначно, климат определяется географическим положением: открытость территории в сторону Северного Ледовитого океана обуславливает прозрачность атмосферы и малое количество водяного пара, что в конечном итоге и приводит к достаточно высоким амплитудам температур [25–27].

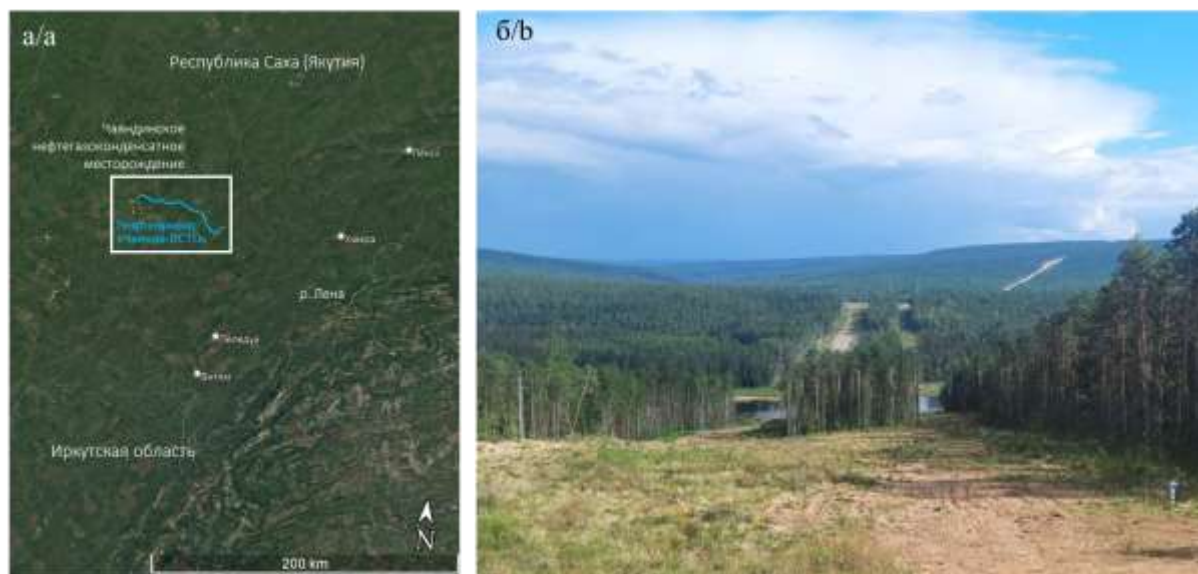


Рис. 1. Месторасположение объекта исследования (а), трасса трубопровода в районе подводного перехода через р. Нюя (б)

Fig. 1. Location of the object of study (a), the route of the pipeline in the area of the underwater crossing under the river Nyuya (b)

Говоря о *тектонике территории*, стоит отметить ее принадлежность к восточной части Непского свода Непско-Ботуобинской антеклизы. Формирование Непско-Ботуобинской антеклизы связано с развитием Ангаро-Ленского прогиба, который в конце силура был охвачен интенсивной складчатостью. Трасса нефтепровода пересекает следующие основные тектонические зоны: Верхнечаяндинскую зону пологих дислокаций, Пеледуй-Олдонскую антиклинальную зону, Нюйскую синклиналичную зону, Средненюйскую антиклинальную зону. Олдонская зона разломов соседствует с границей Пеледуйского поднятия и представлена большим количеством взбросов и сбросов, ориентированных в субмеридиональном направлении. Трасса трубопровода проходит также и через Чаяндинский сброс, приуроченный к Нюйской синклиналичной зоне. Далее трасса нефтепровода пересекает асимметричную Нюйскую впадину, строение крыльев которой резко различается, а центральная зона, простирающаяся в юго-восточном направлении к Уринскому антиклинорию, достаточно широкая и имеет ярко выраженные границы. Общий грядовой рельеф, расчленённость рельефа, наличие разрывных нарушений позволяют говорить о достаточно сложной структурно-

тектонической обстановке территории, которая способствует активации множества опасных геологических процессов, в том числе и карста [25–28].

В *гидрологическом* отношении трасса трубопровода расположена в пределах бассейна реки Нюи – одного из основных притоков реки Лены, с общей длиной 798 км и площадью водосбора в 38100 км². В пределах трассы также стоит выделить реки Сюльдюкээр, Керемнике, ручьи Кубалах и Чуонда, которые пересекаются трубопроводами. В основном гидрологическая сеть достаточно развита, врезана в рельеф, имеет как постоянные, так и временные водотоки. Если говорить о подземных водах, то их характер определяется распространением по всей трассе ММГ, которые активизируют такие опасные экзогенные процессы, как наледи и несквозные талики [26].

В *геоморфологическом* отношении изучаемая территория находится в границах пластового структурно-денудационного Приленского закарстованного плато, на юге – Среднесибирского плоскогорья. Территория характеризуется наличием ярко-выраженных линейных складок, что в общем образует грядовой рельеф, обусловленный густой речной сетью. Приленское плато – возвышенная равнина с перепадами

высот от 245 м на урезах воды (р. Нюя) до 550–560 м на водоразделах.

В *геологическом* строении территории принимают участие формации коренных пород карбонатных нижнекембрийских (доломиты с прослоями известняка), терригенно-карбонатных средне-верхнекембрийских (красноцветные доломиты и алевролиты), нижнеордовикских и средневерхнеордовикских (пески, алевролиты, глины в пределах структурно-денудационной плоской равнины) и терригенных нижнеюрских (пески и супеси в пределах территорий рек) отложений. Четверичные отложения на исследуемой территории распределены неравномерно по мощности. В основном это элювиально-делювиальные, делювиально-коллювиальные, коллювиальные, аллювиальные и озерно-болотные отложения. Наиболее распространены по трассе щебенисто-песчано-глинистые отложения, мощность которых по трассе изменяется от 0,5 до 7 м. Карстующимися на изучаемой территории являются в основном карбонатные породы (известняки и доломиты), которые в монолитном состоянии водонепроницаемы и карстованию подвергаются только в присутствии трещиноватости [4, 8, 9, 25–28].

Инженерно-геологические особенности проявления карста на территории

По результатам изысканий [26] карст на территории исследований карбонатный, неглубокий (отмечаются участки с глубиной залегания карстующихся пород до 2 м). Растворимость карбонатных пород изменяется в пределах 0,01...1,0 г/л и зависит от температуры воды и прямо пропорциональна содержанию в воде свободной углекислоты. Характерной особенностью карбонатного карста является то, что вследствие малой скорости растворения пород карстовые формы (полости, понижения кровли пород и др.), непосредственно связанные с растворением пород в естественных условиях, развиваются медленно [25, 29].

Отдельные трещины в карстующихся породах не представляют опасности для сооружений, несмотря на то, что при развитии карста они могут расширяться. В процессе своего развития многие трещины кольматируются, т. е. заполняются окружающими породами, затем опять промываются. Однако следует иметь в виду, что все подземные формы в карстующихся породах образовались именно вследствие расширения трещин, а в местах их пересечения образуются пустоты растворения, развивающиеся в дальнейшем до более крупных размеров (карстовые полости), но данный процесс длительный и не соизмерим со сроком службы сооружений. Поэтому при изучении карста в карбонатных породах главное внимание обращается на *существующие карстовые формы* и возможность выноса фильтрационным потоком заполняющего глинистого материала из трещин и каверн, что ведёт к расширению последних [30]. Для карстующихся (растворимых) пород их закарстованность в первую очередь определяется водоупорными свойствами покровной толщи и трещиноватостью пород тектонического и неотектонического плана. В карбонатном массиве отмечаются трещины и тре-

щинно-карстовые воды, приуроченные к сквозным таликам. Основным источником питания трещинно-карстовых вод являются атмосферные осадки, поверхностный склоновый сток с участков водосбора, а также восходящий приток по зонам разломов, в том числе из смежных водоносных горизонтов.

Стоит отметить, что строительство и эксплуатация объекта на сегодняшний день избирательно усиливают естественное (природное) оттаивание на локальных участках многолетнемерзлых пород, которые в свою очередь имеют самое прямое воздействие на активацию карста по территории [1–7, 10, 11, 13–15]. Принимая во внимание, что прогнозная оценка естественной динамики геокриологической обстановки подразумевает плавное опускание кровли многолетнемерзлых пород при тренде изменения температуры воздуха $+0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ [13, 14, 26], оттаивание значительных объемов воды высвобождается в пористые и обломочные разности известняков, и особенно в древние трещинно-межполостные карстовые пустоты [29, 30]. В этих случаях изменяется устойчивость массива к гравитационным деформациям и возникает вероятность провалообразования [3, 4, 7–9]. Наличие редких зон развития погребенных карстовых воронок и полостей в их бортах мощностью до 3 м, осложненных с поверхности более молодыми слабовыраженными в рельефе просадками, реже воронками сложного генезиса, позволяет сделать следующие выводы:

- карбонатный карст древний, преимущественно открытый; активный карст развивался в неоген средненеоплейстоценовое время;
- карстовые формы способствовали развитию карстово-эрозионных форм, а в дальнейшем их заполнению комплексом покровных образований (элювий, коллювий, делювий, аллювий);
- при развитии мерзлотных процессов на ослабленных карстом участках в условиях обводненности разреза формировалась наибольшая льдистость [1, 9, 26]. Оттаивание массива привело как к образованию неравномерных термокарстовых просадок, так и к появлению воронок и локальных оседаний, сформировавшихся в результате карстово-провальных и карстово-суффозионных процессов, которые связаны с провалообразованием и оседанием грунта над подземными полостями, утратившими сдерживающий деформации лёд;
- процесс развития деформаций, связанных с обрушением существующих полостей на малых глубинах (до 20 м), не завершен и может активизироваться при техногенной нагрузке.

В результате обследования трассы нефтепровода, выполненного в рамках инженерно-геологических изысканий [27] в полосе шириной 2 км (2×1000 м), зафиксированы поверхностные деформации, квалифицированные как карстово-суффозионные [29, 30]. Несколько карстовых деформаций (с известными параметрами) пересекают ось трассы нефтепровода и сопутствующих линейных сооружений или находятся в полосе отвода сооружений (табл. 1).

Таблица 1. Перечень идентифицированных поверхностных карстовых форм на участке нефтепровода «Чаянда–ВСТО»

Table 1. List of identified surface karst forms in the section of the Chayanda–ESPO oil pipeline

Номер пикета трассы трубопровода Picket number of the pipeline route	Расстояние от оси сооружения Distance from the axis of the structure	Размер в плане Size in plan	Глубина Depth
	м/м		
1316+00	173	7,0	1,5
1320+00	266	9,0	2,5
1326+00	72,51	25	1,0
1327+00	4,68	20	0,5

Методика выполнения работ

Для определения закономерностей распространения карстово-суффозионных процессов наиболее актуален в настоящее время методологический подход в построении карт восприимчивости (*susceptibility zoning map*) к развитию того или иного опасного ЭГП, который зарекомендовал себя в научном сообществе при прогнозировании различных ЭГП: эрозии, оползней, суффозии, подтопления и других [31–36].

На первоначальном этапе для построения карты восприимчивости разрабатываются тематические карты факторов, которые в той или иной степени воздействуют на развитие ЭГП. Учитывая, что воздействие каждого фактора на активацию исследуемого ЭГП различается в зависимости от региональных, климатических, геологических и техногенных условий, необходимо определить степень воздействия для каждого из факторов, используя различные статистические и детерминированные методы. В нашем случае из всего разнообразия двумерных статистических методов выбран метод соотношения частностей (*Frequency Ratio, FR*), позволяющий выявить количественную связь факторов активации процесса и проявление самого ЭГП в пределах пространственных границ факторов [37–43]. Значение веса *FR* указывает на степень взаимосвязи фактора и рассматриваемого ЭГП: значение *FR* ниже единицы указывает на слабую взаимосвязь, а значение большее единицы относится к сильным связям. В результате применения методики каждому из факторов присваивается «вес» – количественная характеристика степени воздействия среди всей совокупности факторов на развитие исследуемого ЭГП.

Для получения общей карты восприимчивости все факторные карты с учетом присвоенных численных значений веса суммируются средствами наложения в выбранном программном комплексе ГИС (в работе применяются инструменты программы «ArcGIS»). Далее производится классификация карты восприимчивости (в основном от 3 до 5 классов) и определяются цветовые решения и координатная привязка для идентификации участков в натуре.

Валидацию и проверку точности построения карт восприимчивости предлагается провести путем сравнения границ участков, наиболее подверженных развитию ЭГП, с участками новейших, выявленных в процессе эксплуатации, образований карстовых и суффозионных провалов.

Подготовка тематических карт

Для проведения оценки исследуемой территории к проявлению карстово-суффозионных процессов определены основные факторы, которые в той или иной мере влияют на активацию карстовых процессов. Исходя из анализа публикаций [44–49] и опыта исследований по оценке и прогнозу экзогенных геологических процессов [8, 9, 20, 39–45], определены следующие факторы: экспозиция склонов (*aspect*), кривизна склонов (*plan curvature*), абсолютные отметки поверхности (рельеф), уклон поверхности (*slope*), плотность тектонической трещиноватости, стратиграфо-генетические комплексы пород, плотность дренажа поверхности (*drainage density*). Для верификации модели используются ранее идентифицированные очаги активации карстово-суффозионных процессов.

Для определения взаимосвязей вышеперечисленных факторов подготовлены тематические карты на основе цифровых моделей рельефа и материалов инженерно-геологических изысканий, а также геологических карт [26, 27]. Для построения экспозиции и кривизны склонов, абсолютных отметок и уклонов поверхности, а также плотности дренажа поверхности были использованы снимки SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) для исследуемой территории, полученные из открытых ресурсов сервиса USGS *Earthexplorer* [6, 9, 43–46]. Для выделения основных элементов тектонической трещиноватости применялись данные, полученные посредством дешифрования снимков космического термоэмиссионно-отражающего радиометра ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), отраженные в GDEM (*Global Digital Elevation Model*) – глобальной цифровой модели рельефа, представленной на сервисе «NASA Earthdata Search». Картографический материал инженерно-геологических изысканий и карты четвертичных образований листов Р-48,49 из фондов Всероссийского научно-исследовательского геологического института имени А.П. Карпинского [28] позволили определить и уточнить расположение речной сети, тектонических разломов, стратиграфо-генетических комплексов пород и месторасположение проявлений карста по трассе нефтепровода. Дешифрование космических снимков, перевод данных в цифровой формат, координатная привязка трассы трубопровода и построение факторных карт производилось в среде «ArcGIS Desktop» с использованием внутренних инструментов программы.

Результаты

Описание факторов

Стратиграфо-генетические комплексы пород – наиболее важный в рассмотрении фактор, влияющий на локацию очагов распространения и активации опасных экзогенных процессов, так как различные типы грунтов определяют предрасположенность территории к развитию карста. Факторная карта получена путем оцифровки карты четвертичных образований листов Р-48,49 масштаба 1:1000000 (рис. 2).

Кривизна поверхности (рис. 3) характеризует морфологию склонов и откосов. Кривизна непосредственно влияет на накопление воды (осадки, сток и др.) в почвенном покрове – вогнутая поверхность может содержать больше влаги, чем выпуклая. Профильная кривизна влияет на ускорение или замедление потока и, следовательно, на эрозию и депонирование осадков, а плановая кривизна (кривизна в плоскости) влияет на конвергенцию и дивергенцию потока. С помощью инструмента «Spatial Analyst – Curvature» программы «ArcGIS» получены области положительных значений кривизны (выпуклая поверхность), отрицательных значений (вогнутая поверхность), а также области с нулевыми значениями (плоская местность).

Уклон поверхности (рис. 4) является одним из основных параметров при оценке карстовых процессов. Важность данного параметра обоснована влиянием градиента уклона на изменение скорости движения как поверхностного стока, так и подземного стока вод. Также от степени уклона зависит содержание влаги в грунтах и напряжение сдвига поверхностного слоя почвы. В нашем случае карта уклона поверхности получена посредством обработки растрового изображения цифровой модели рельефа SRTM при помощи инструмента «Spatial Analyst – Slope» программы «ArcGIS» с разделением всех значений уклонов на пять классов: менее 2°, от 2° до 6°, от 6° до 12°, от 12° до 45°, более 45°.

Плотность общей тектонической трещиноватости (рис. 5) представлена результатами аэрокосмогеологических исследований, учитывающих глубинные разломы, полученные как геолого-геофизическими методами, так и идентифицированными линейными элементами с детализацией в районе трассы нефтепровода «Чаянда–ВСТО», построенными при помощи модуля программы «ArcGIS» с использованием возможностей пространственного анализа дан-

ных «Spatial Analyst» (при помощи инструмента «Line Density») и дополнительным дешифрированием снимков ASTER GDEM в программном комплексе PCI Geomatica для обнаружения линейментов.

Плотность дренажа – это величина, используемая для описания физических параметров дренажного бассейна. Впервые описанная Р.Э. Хортоном, плотность дренажа определяется как общая длина канала в дренажном бассейне, деленная на общую площадь. Непроницаемый грунт или обнаженные коренные породы приведут к увеличению поверхностного стока и, следовательно, к более частым потокам. Пересеченные районы или районы с высоким рельефом также будут иметь более высокую плотность дренажа, чем другие дренажные бассейны, если другие характеристики бассейна одинаковы. С помощью инструмента «Hydrology» программы «ArcGIS» для участка трассы нефтепровода получена плотность дренажа поверхности (рис. 6).

Экспозиция склона (рис. 7) является также важным фактором для определения предрасположенности территории к карстово-суффозионным процессам в связи с изменением степени воздействия солнечного света, осушающих ветров, количества осадков (степень насыщения) и неоднородности растительного покрова. Ориентация элементарных склонов поверхности по отношению к сторонам света (в нашем случае выделено девять категорий) получена посредством обработки растрового изображения цифровой модели рельефа SRTM при помощи инструмента «Spatial Analyst – Aspect» программы «ArcGIS».

Карта проявлений карста (рис. 9) – в основе этой факторной карты использовались данные оценки карстоопасности территории трассы, дополненные данными маршрутного обследования трассы трубопровода, выполненного автором (Нечаев Д.А.) в августе 2022 г.

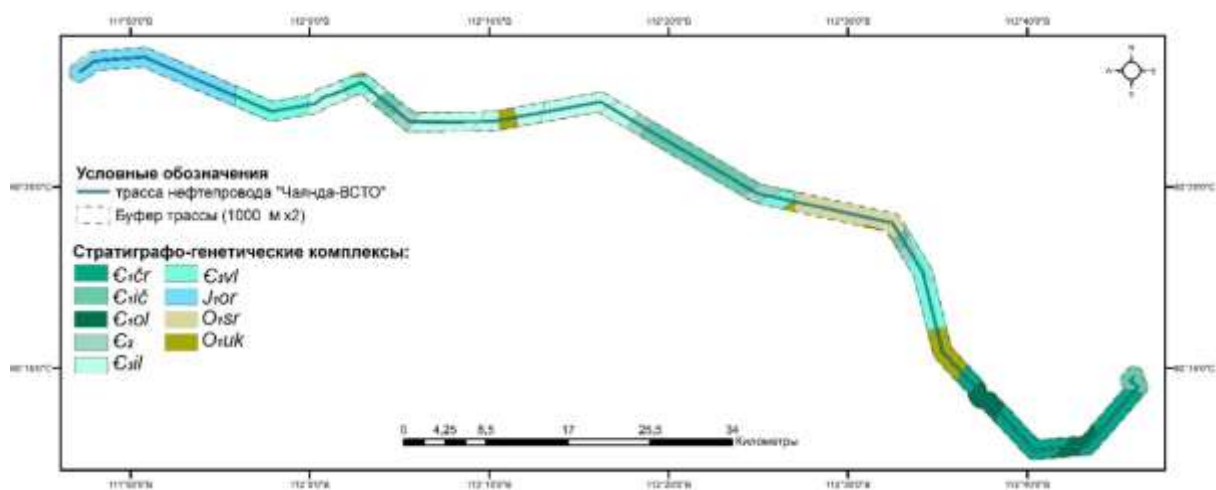


Рис. 2. Факторная карта стратиграфо-генетических комплексов пород в пределах трассы трубопровода

Fig. 2. Factor map of stratigraphic-genetic rock complexes within the pipeline route

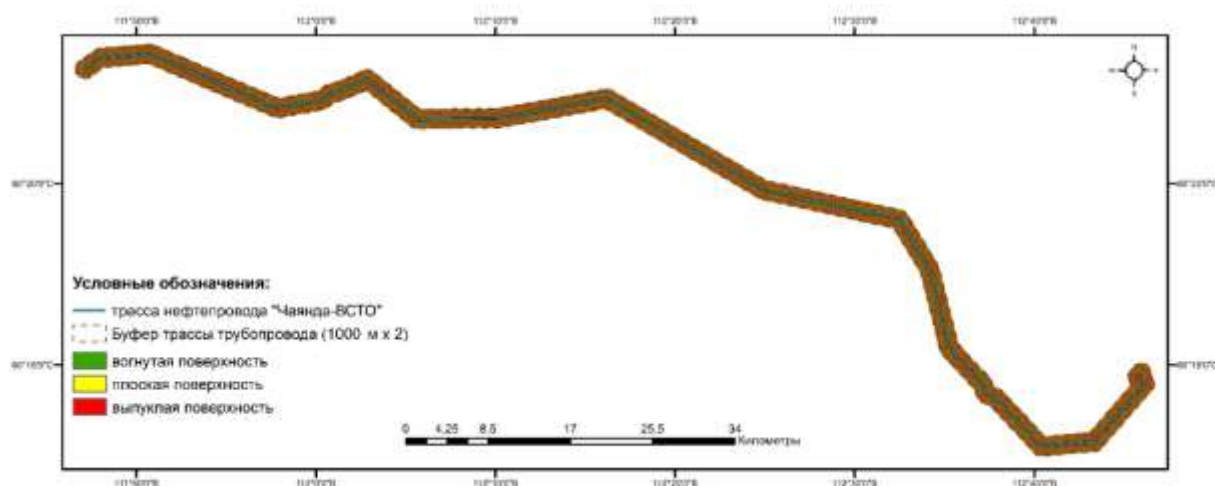


Рис. 3. Факторная карта кривизны поверхности

Fig. 3. Factor map of surface curvature

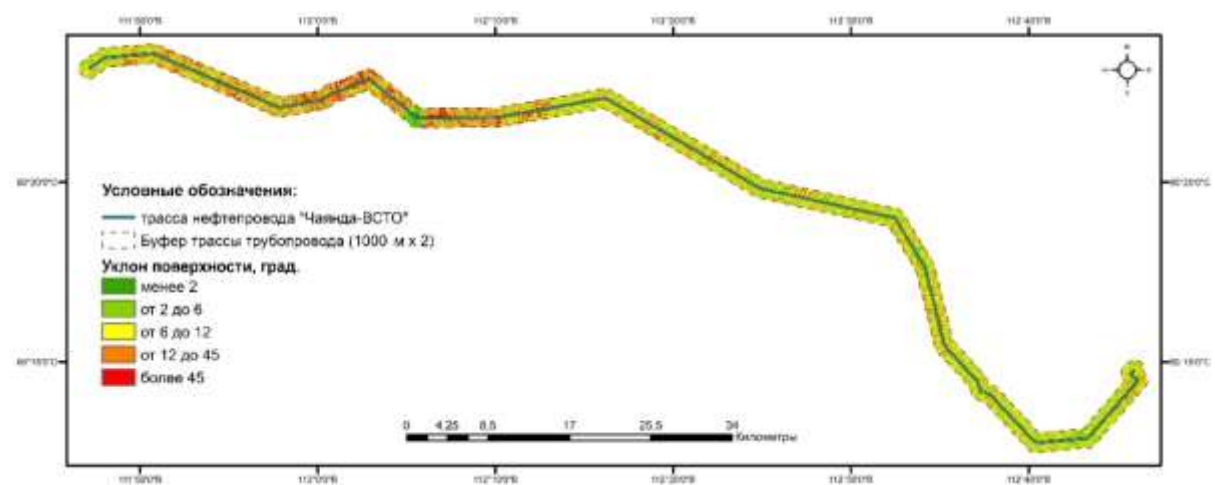


Рис. 4. Факторная карта уклона поверхности

Fig. 4. Factor map of the slope of the surface

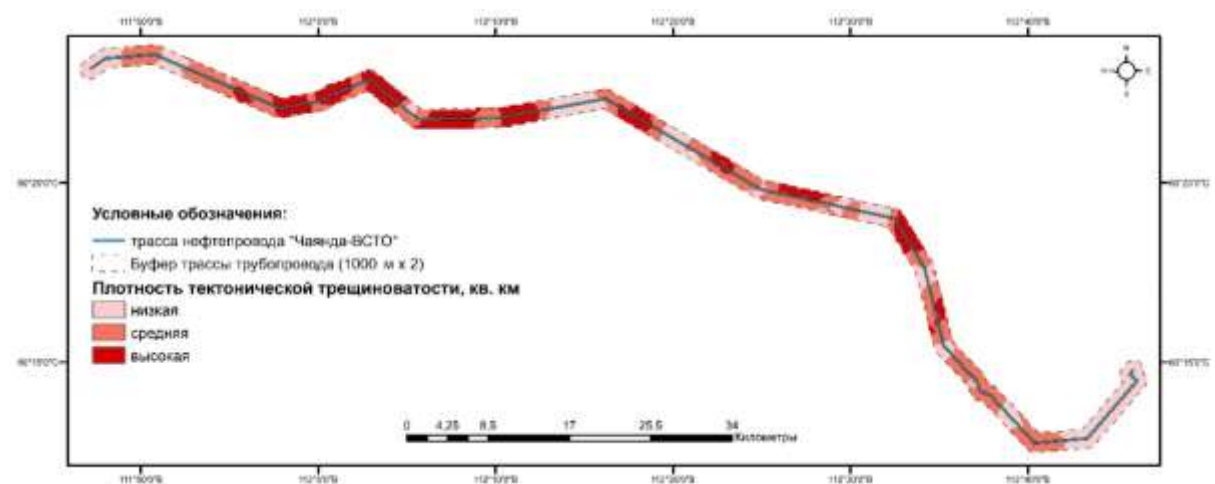


Рис. 5. Факторная карта плотности общей тектонической трещиноватости

Fig. 5. Factor map of density of general tectonic jointing

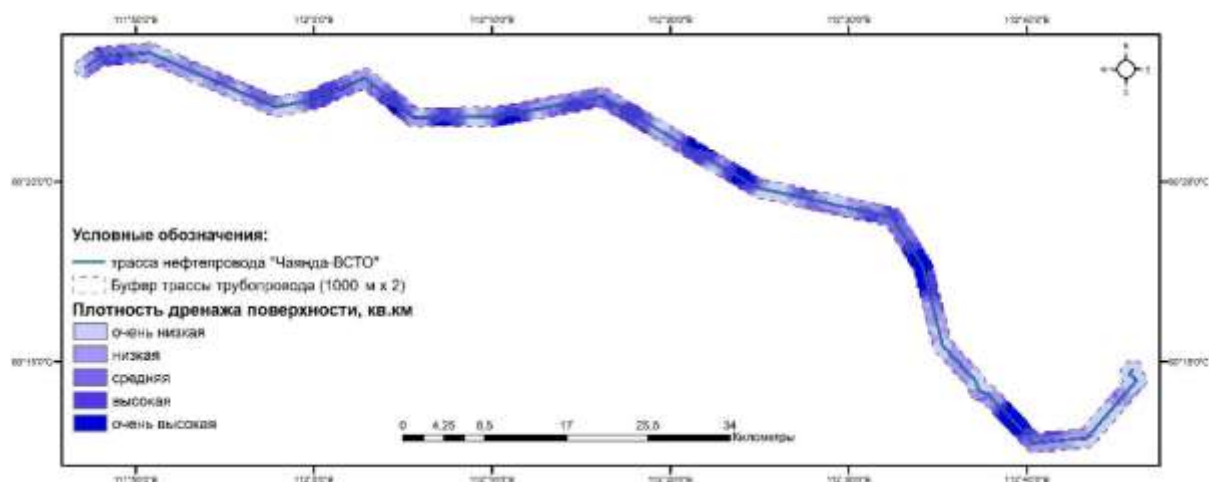


Рис. 6. Факторная карта плотности дренажа поверхности

Fig. 6. Factor map of the surface drainage density

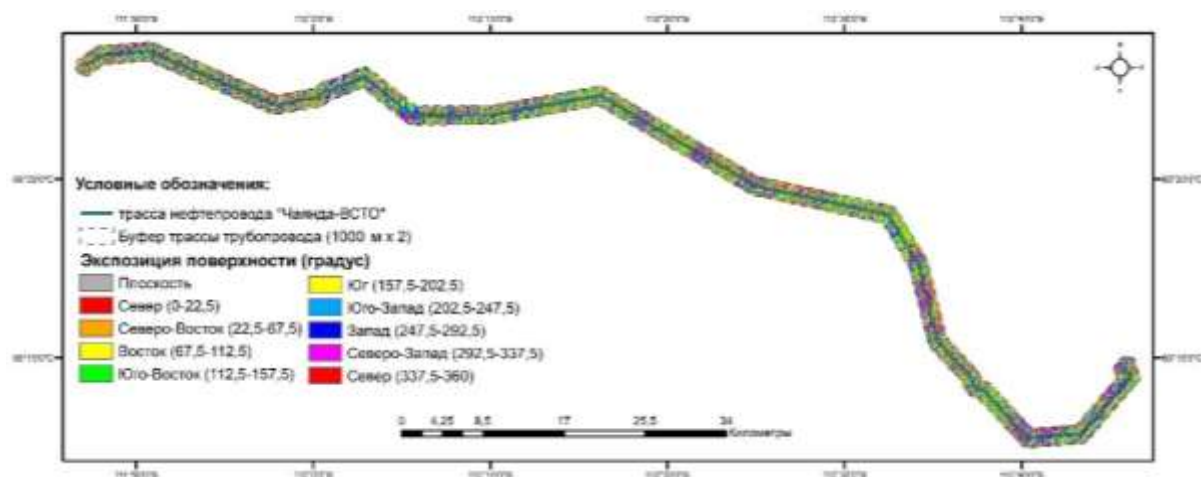


Рис. 7. Факторная карта экспозиции склонов поверхности

Fig. 7. Factor map of surface slope exposure

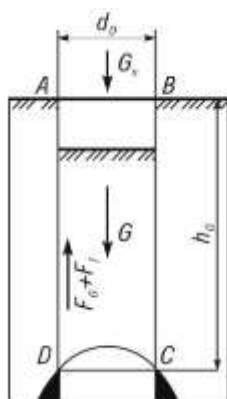


Рис. 8. Схема образования круглоцилиндрического провала [31], где G_p – нагрузка, давящая с поверхности на цилиндр грунта ABCD весом G ; F_c и F_f – силы сцепления и трения, возникающие по боковой поверхности цилиндра грунта

Fig. 8. Scheme of the formation of a round-cylindrical failure [31], where G_p is the load pressing from the surface onto the cylinder of the soil ABCD with a weight of G ; F_c and F_f are the forces of cohesion and friction arising along the lateral surface of the cylinder of the soil

Оценка карстоопасности на территории трассы

Для оценки карстово-суффозионной опасности трассы трубопровода были произведены расчеты ожидаемых размеров провалов в основании сооружений на базе детерминированных моделей согласно нормативным документам: СП 11-105-97 ч. II (п. 5.2.12), СП 50-101-2004 (п. 6.11.2), СП 22.13330.2016 (п.п. 6.11.8, 6.11.9). Данные методы расчета учитывают инженерно-геологические условия непосредственно на изучаемом участке трассы трубопровода. Расчет производился по методике Г.М. Шахунянца [31], согласно которой вес столба грунта (цилиндрической формы), находящийся над карстовой полостью, уравновешен по значению силе трения на боковые поверхности столба (рис. 8).

Исходными данными для расчетов являются: глубина залегания карстующихся пород, мощность и физико-механические характеристики перекрывающих их грунтов. По модели Г.М. Шахунянца возможный диаметр провала d_0 в момент его образования определяется по формуле:

$$d_0 = 2 \cdot \frac{2c + \gamma h N}{\gamma},$$

$$d_0 = 2 \cdot \frac{2c + \gamma h N \tan \varphi - 2cM \tan \varphi}{\gamma},$$

где c (кгс/см²), γ (кгс/см³), φ (градус) – средневзвешенные по глубине h соответственно удельное сцепление, удельный вес грунта и угол внутреннего трения; h – глубина до кровли карбонатных пород; N и M – расчетные коэффициенты, определяемые по формулам:

$$N = \frac{1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}}{1 - \tan^2 \varphi + 2 \tan \beta \tan \varphi},$$

$$M = \frac{2 \tan \beta + \frac{1}{\tan \beta} - \tan \varphi}{1 - \tan^2 \varphi + 2 \tan \beta \tan \varphi},$$

$$\tan \beta = \tan \varphi + \left(\frac{1 + \tan^2 \varphi}{2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Величины c , γ , φ , входящие в формулы, и результаты расчетов возможного диаметра провала d_0 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения прогнозируемого диаметра провала на участке нефтепровода «Чаянда–ВСТО» по методике проф. Г.М. Шахунянца

Table 2. Results of determining the predicted dip diameter at the Chayanda–ESPO oil pipeline section according to the method of professor G.M. Shakhunyants

№ скважины Borehole number	Вид дисперсных пород Kind of soil	Мощность слоя h_0 , м Thickness, m	Удельный вес (γ), г/см ³ Unit weight g/cm ³	Удельное сцепление (c), кПа Cohesion, kPa	Угол внутреннего трения (φ), градус Internal friction angle, degree	Расчетный (средний) диаметр провала d_0 , м Estimated (average) diameter of the failure, m
13э158	Глина твердая Hard clay	1,3	1,94	61	20	5,4
13э157	Глина мягко-пластичная Soft-plastic clay	3,6	1,87	33	10	5,2
13к067	Супесь пластичная Silty clay plastic	1,2	1,9	12	22	2,8
	Суглинок полутвердый Semi-solid loam	2,5	1,93	29	24	
13у150	Суглинок мягкопластичный Lean clay plastic	0,8	1,88	16	16	10,0
	Суглинок тугопластичный Lean clay firm-stiff	2,4	1,99	47	21	
	Суглинок мерзлый, нельдистый, незасоленный Frozen lean clay, not icy, unsalted	6,6	2,1	110	18	

Расчетные (средние) диаметры карстовых провалов на изучаемом участке близки к часто встречаемому интервалу значений [31]. Таким образом, согласно СП 11-105-97 часть II, территория трассы нефтепровода характеризуется категорией В ($d_{cp}=3-10$ м) по средним диаметрам карстовых провалов, определенных по детерминированной модели.

На основании инженерно-геологических изысканий по обустройству нефтяной оторочки ботубобинской залежи Чаядинского НГКМ, проводимых в 2014 г. [27], ввиду отсутствия данных о ранее образовавшихся провалах и возрасте зафиксированных карстовых воронок в пределах трассы трубопровода, а также отсутствия участков-аналогов, в качестве расчетных радиусов при построении изолиний удаленности от проявлений карста, соответствующих граничным значениям между категориями устойчивости территории, были приняты рекомендуемые СП 11-105-97 часть II следующие значения радиусов удаленности:

- граница между II и III категориями, соответствующая интенсивности провалообразования $\lambda=0,1$ пров/км² в год, на расстоянии 50 м от поверхностной деформации;
- граница между III и IV категориями ($\lambda=0,05$ пров/км² в год) на расстоянии 100 м;
- граница между IV и V категориями ($\lambda=0,01$ пров/км² в год) на расстоянии 200 м.

Учитывая зонирование трассы, согласно проведенным расчетам при инженерно-геологических изысканиях, а также расчетные диаметры провалообразования, основываясь на использовании «метода удаленности от ближайшего соседнего проявления карста», были выделены основные зоны возможного распространения карстовых провалов с помощью инструментов графического представления данных «Spatial Analyst» в программе «ArcGIS», выполнена их пространственная привязка к трассе нефтепровода и рассчитана плотность проявления карста (рис. 9).

Определение веса факторов

Для присвоения каждому из рассматриваемых факторов значения веса согласно методике соотношения частотностей (frequency ratio, FR) определены площади каждого класса рассматриваемых факторов и их доля от общей площади буферной зоны трассы трубопровода (2×1000 м). В пределах каждого класса определена площадь проявления карста (в км² и %), характеризующаяся площадью плотности карстово-суффозионных процессов. Вес класса определяем исходя из соотношения площади проявления ЭГП в пределах класса к площадке самого класса. Вес каждого фактора и их классов приведен в табл. 3.

Обсуждение результатов исследования

Анализируя данные табл. 3, можно подтвердить, что наибольшее влияние на развитие карста имеют стратиграфо-генетические комплексы кембрийской системы, а именно площади расположения олёкминской свиты E_{1ol} (вес FR – 8,38) и чарской свиты E_{1cr} (вес FR – 1,99) представленные известняками, извест-

няками водорослевыми, доломитами, доломитами глинистыми и карбонатными брекчиями. Также стоит отметить, что наибольшая степень закарстованности

наблюдается на территориях с показателями плотности дренажа поверхности в пределах 0,48–0,86 км/км² (вес FR – 2,11).

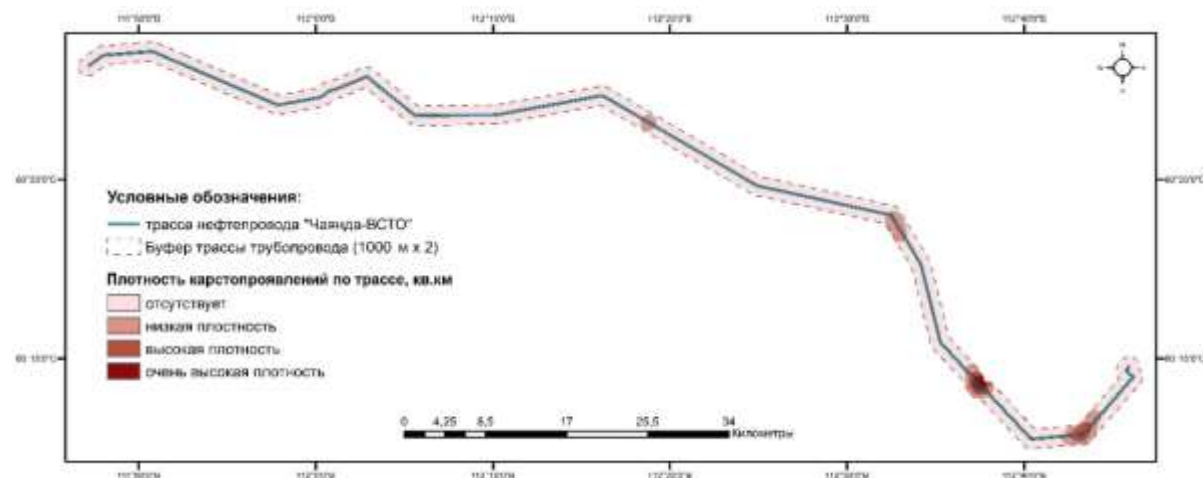


Рис. 9. Плотность распространения карстопоявлений по трассе трубопровода

Fig. 9. Karst distribution density along the pipeline route

Таблица 3. Результаты определения веса факторов развития карстово-суффозионной опасности по методу соотношения частностей (FR)

Table 3. Results of determining the weight of factors for the development of karst-suffusion hazard using the method of frequency ratio (FR)

Слои данных/Data layers	Классы/Class	% класса % of class	% карстовых участков % of karst area	FR
Уклон, градус Slope angle (degree)	<2	32,38	41,71	1,29
	2–6	36,15	39,45	1,09
	6–12	20,99	15,94	0,76
	12–25	8,36	2,83	0,34
	25–40	2,11	0,07	0,03
Плотность общей трещиноватости (тектоника и линейменты) Density of general fracture (tectonics and lineaments)	Низкая/Low	30,87	39,01	1,26
	Средняя/Medium	43,92	38,95	0,89
	Высокая/High	25,21	22,05	0,87
Плотность дренажа поверхности Drainage density	Очень низкая/Very low	19,30	40,82	2,11
	Низкая/Low	31,69	28,85	0,91
	Нормальная/Normal	23,44	25,85	1,10
	Высокая/High	17,73	4,48	0,25
	Очень высокая/Very high	7,84	0,00	0,00
Кривизна поверхности Plan curvature	вогнутые/concave	18,06	13,93	0,77
	плоские/flat	59,46	67,43	1,13
	выпуклые/convex	22,48	18,64	0,83
Стратиграфо-генетические комплексы (СТК) Genetic types and age	J _{1or}	13,07	0,00	0,00
	O _{1uk}	4,68	0,95	0,20
	O _{1sr}	8,32	11,09	1,33
	Є _{3vl}	15,77	0,10	0,01
	Є _{3il}	21,47	0,00	0,00
	Є ₂	5,29	6,45	1,22
	Є _{1ol}	4,97	41,65	8,38
	Є _{1ic}	13,67	14,43	1,06
Экспозиция склонов, градус Slope aspect (degree)	Є _{1cr}	12,76	25,33	1,99
	плоские/flat	1,73	1,38	0,80
	С (0–22,5)	3,21	2,49	0,78
	СВ (22,5–67,5)	10,96	8,86	0,81
	В (67,5–112,5)	14,20	11,94	0,84
	ЮВ (112,5–157,5)	13,96	15,00	1,07
	Ю (157,5–202,2)	13,99	17,11	1,22
	ЮЗ (202,5–247,5)	13,38	15,09	1,13
	З (247,5–292,5)	14,49	14,69	1,01
	СЗ (292,5–337,5)	11,06	10,68	0,97
	С (337,5–360)	3,02	2,76	0,91

На исследуемой территории преобладают уклоны с крутизной от 2° до 6° , при этом наиболее подвержены карсто-суффозионной опасности склоны с наименьшим градусом уклона – менее 2° (вес FR – 1,29). Если говорить о тектонической трещиноватости, то результаты неоднозначные. Исследуемая территория имеет достаточно активные геодинамические зоны, результаты проведенных исследований также показывают высокие процентные соотношения площадей тектонической трещиноватости в пределах буфера трассы. Однако наибольший вес (вес FR – 1,26) приурочен к минимальной плотности тектонической трещиноватости. Возможно, необходимо рассмотреть по отдельности элементы тектонических разломов и распределение элементов по трассе трубопровода для выявления первопричин активации карста.

Показатели кривизны поверхности подтверждают наличие карсто-суффозионных процессов на плоских участках поверхности (вес FR – 1,13). Если говорить об экспозиции склонов, то явно прослеживается доминирование южных склонов поверхности, выявленных по трассе (направления Ю, Ю-В, Ю-З, З), что связано и с количеством выпадаемых осадков, направлением ветра, инсоляцией и т. д.

Качественная оценка применения методики соотношения частных показателей показывает достаточно высокие результаты в применении к изучению карстовых процессов, однако необходимо рассмотреть дополнительные факторы (климатические особенности, метеорологическую обстановку территории, антропогенное воздействие и т. д.) и проработку существующих факторов.

Для демонстрации областей и определения границ участков, предрасположенных к развитию карста в пределах территории трассы трубопровода, факторные карты интегрированы в единую карту степени восприимчивости территории к развитию карсто-суффозионных процессов с соответствующим весом каждого класса. Все участки классифицированы на пять категорий: очень низкая, низкая, средняя, повышенная и высокая. Стоит отметить, что участки, полученные с применением метода FR, полностью совпадают с картами закарстованности территории (сравнивая визуально карту плотности карстопроявлений на рис. 9 и карту восприимчивости территории на рис. 10), полученными при инженерных изысканиях, а также имеют дополнительные области, которые подтверждают возможное развитие и распространение процесса в период эксплуатации.

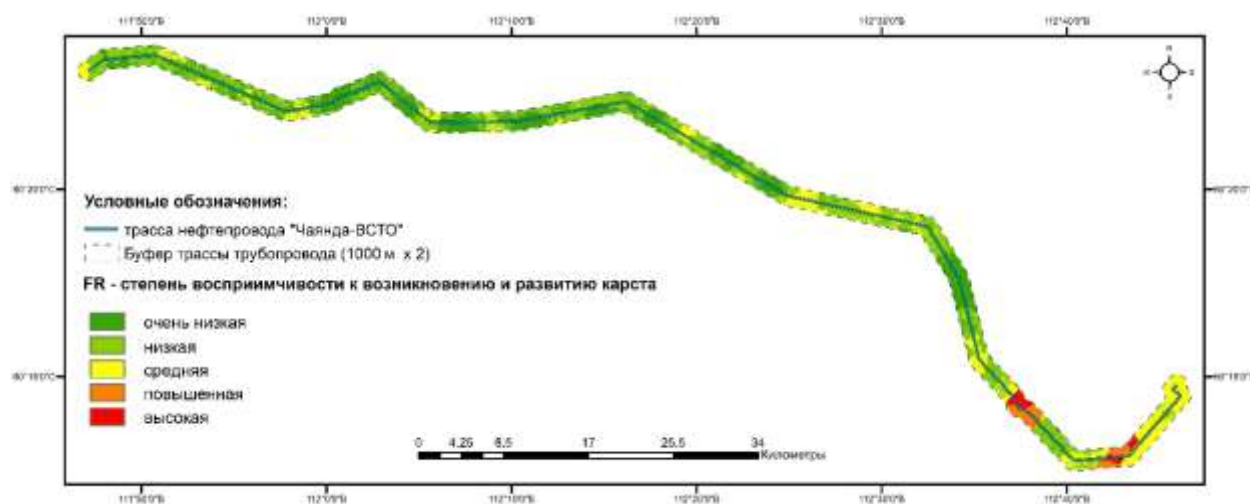


Рис. 10. Карта восприимчивости территории к карсто-суффозионным процессам с использованием FR метода

Fig. 10. Map of the susceptibility of the territory to karst-suffosion processes using the FR method

Выводы

1. В ходе данного исследования доказано влияние выбранных факторов на активацию карстовых процессов путем применения методики соотношения частных показателей, которые подтверждаются участками ранее выявленных карстопроявлений в пределах трассы в период инженерно-геологических изысканий при проектировании трубопровода.
2. Однозначно стоит отметить высокую взаимосвязь карстопроявлений и типов стратиграфо-генетических комплексов с плотностью дренажа поверхности. В дальнейших исследованиях необ-

ходимо рассмотреть дополнительные факторы для консолидации и уточнения областей, предрасположенных к развитию карста.

3. Полученная карта восприимчивости позволяет идентифицировать конкретные границы участков для определения решений по наблюдениям за развитием того или иного ЭГП и оптимизации эксплуатации нефтепровода. Поэтому предложенный в данной работе методологический подход к оценке и прогнозу развития ЭГП можно использовать и на других протяженных газо- и нефтепроводах, расположенных в сложных геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li X., Wu Q., Jin H. New methods for predicting strain demand of Arctic gas pipelines across permafrost under frost heave displacement // *Geofluids*. – 2022. – V. 2022 (first online). URL: <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/2022/9094890/> (дата обращения 30.12.2022).
2. Li X., Wu Q., Jin X. Mitigation strategies and measures for frost heave hazards of chilled gas pipeline in permafrost regions: a review // *Transportation Geotechnics*. – 2022. – P. 100786.
3. Strokov L.A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement. Scientific and technical challenges in the well drilling progress // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2015. – V. 24. Article number 012030. – 6 p. URL: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012030> (дата обращения 30.12.2022).
4. Strokov L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. – V. 43. – 6 p. URL: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/43/1/012051> (дата обращения 30.12.2022).
5. Варламов С., Скрыбин П. Инженерно-геокриологическое состояние коридоров трасс трубопроводов центральной Якутии // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием* / отв. ред. В.Ю. Фридовский. – Якутск, 8–10 апреля 2020. – Якутск: ИД СВФУ, 2020. – С. 430–433.
6. Казанцева Л.А., Воробьева С.В. Мониторинг геокриологических условий природных ландшафтов на трассе газопровода Надым-Пунга // *Транспорт и машиностроение Западной Сибири*. – 2020. – № 1. – С. 29–35.
7. Трифонов О.В., Силкин В.М., Черный В.П. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода «Сила Сибири» на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей // *Вести газовой науки*. – 2020. – № 2 (44). – С. 34–50.
8. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
9. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia) / L.A. Strokov, E.M. Dutova, A.V. Ermolaeva, I.N. Alimova, A.B. Strelnikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27. – 012032. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012032> (дата обращения 10.12.2022).
10. Hoopes O., Croft P., Wutting F. Embankment fill slope movement on thaw sensitive permafrost: combining creep testing and thermal simulations to develop mitigation options at lost creek along the Trans-Alaska pipeline system; Lost Creek. P. 2 // *Permafrost 2021: Merging Permafrost Science and Cold Regions Engineering*. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021. – P. 360–373.
11. Changes in near-surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model / S. Huang, Q. Ding, K. Chen, Z. Hu, Y. Liu, X. Zhang, L. Ding // *Cold Regions Science and Technology*. – 2023. – V. 206. – P. 103709.
12. Investigation of permafrost engineering geological environment with electrical resistivity tomography: a case study along the China-Russia crude oil pipelines / X. Li, X. Jin, X. Wang, H. Jin, L. Tang, X. Li, R. He, Y. Li, C. Huang, S. Zhang // *Engineering Geology*. – 2021. – V. 291. – № 106237 URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106237> (дата обращения 01.06.2022).
13. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure / V.P. Melnikov, V.I. Osipov, A.V. Brouchkov, S.V. Badina, M.R. Sadurtdinov, D.S. Drozdov, R.Y. Fedorov // *Energies*. – 2022. – V. 15. – № 9. – P. 3190.
14. Monitoring the permafrost conditions along pipeline routes in Central Yakutia, Russia / S. Varlamov, P. Skryabin, A. Zhirkov, Z. Wen // *Land*. – 2022. – V. 11. – № 12. – P. 2331.
15. Assessment of permafrost disturbances caused by two parallel buried warm-oil pipelines: a case study at a high-latitude wetland site in Northeast China / F. Wang, G. Li, W. Ma, D. Chen, G. Wu, Y. Cao, F. Che // *Cold Regions Science and Technology*. – 2022. – P. 103753.
16. Мележ Т.А. Типологическое районирование трасс магистральных трубопроводов по возможности проявления инженерно-геологических процессов (на примере трассы магистрального трубопровода «Дружба 2» в пределах Республики Беларусь) // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле*. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 10–16.
17. Трифонов О.В., Морин И.Ю., Володин П.А. Принципы классификации участков по прогнозируемой опасности для магистральных газопроводов, расположенных в зонах развития опасных инженерно-геокриологических процессов // *Наука и техника в газовой промышленности*. – 2021. – № 2. – С. 82–98.
18. Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran) / S. Sharafi, H. Kamangir, S.A. King, R. Safaierad // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – № 12. – P. 1–11.
19. Strokov L.A. Numerical model of surface subsidence during subway tunneling *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2009. – V. 46 (3). – P. 117–119.
20. Strokov L. Recognition of geological processes in permafrost conditions // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78 (8). – P. 5517–5530.
21. Vladova A.Y. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline // *Mathematics*. – 2022. – V. 10. – № 11. – P. 1813.
22. Thermal and mechanical analysis of the China-Russia crude oil pipeline suffering settlement disaster in permafrost regions / J. Zhou, Z. Liang, L. Zhang, T. Zheng, J. Zheng // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2022. – V. 199. – P. 104729.
23. Елизаров А.С., Курчатова А.Н. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем // *Вестник СГУиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. – 2020. – Т. 25. – № 1. – С. 28–42.
24. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 27–41.
25. Реутских Н.В., Бережной М.А., Дуденко И.А. Геотехнический мониторинг для магистральных трубопроводов в различных типах многолетнемерзлых пород // *Научный журнал Российского газового общества*. – 2016. – № 2. – С. 22–26.
26. Строкова Л.А., Нечаев Д.А. Роль опасных геологических процессов при эксплуатации нефтепровода «Чаянда–ВСТО» // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 125–134.
27. Технический отчет по инженерным изысканиям. Обустройство нефтяной оторочки ботубинской залежи Чаяндинского НГКМ с выделением этапа опытно-промышленных работ. Этап 3. Строительство нефтепровода Чаянда–ВСТО. В 5 т. Т. 2 (часть 2). – Саратов: ОАО «ВНИПИгаздобыча», 2014. – 412 с.
28. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000 (сост. Ю.А. Дукардт), лист Р-49-XXXV, серия Верхне-Вилуйская. – М.: Недра, 1973.
29. Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (северной Евразии). – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 448 с.
30. Кутепов В.М. Карта «Опасность карста». Научное издание «Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации» / под общ. ред. С.К. Шойгу. – М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2010. – 696 с.
31. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. – М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.
32. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping / T. Gudiyangada Nachappa, S. Kienberger, S.R. Meena, D. Hölbling, T. Blaschke // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 572–600.

33. Gebreegziabher T., Suryabagavan K.V., Kumar Raghuvanshi T. WebGIS-based decision support system for soil erosion assessment in Legedadi watershed, Oromia Region, Ethiopia // *Geology, Ecology, and Landscapes*. – 2021. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (дата обращения 11.06.2022).
34. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742.
35. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field / Z. Li, W. Shi, P. Lu, Q. Wang, Z. Miao // *Journal Remote Sensing of Environment*. – 2016. – V. 187. – P. 76–90.
36. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askaoun watershed, southern Morocco / A. Tairi, A. Elmouden, L. Bouchaou, M. Aboulouafa // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – № 9. – P. 1–22.
37. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas», (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // *Geosciences*. – 2013. – V. 1. – P. 46–62.
38. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures / N. Grendas, V. Marinos, G. Papathanassiou, A. Ganas, S. Valkaniotis // *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – V. 77. – № 12. – P. 425. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7598-9> (дата обращения 01.06.2022).
39. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil // *Engineering Geology*. – 2018. – V. 246. – P. 107–122.
40. Hassanpour J., Firouzei Y., Hajipour G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – № 1. – P. 267–280.
41. Ivanova E. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): comparative study of two areas in Bulgaria // *Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards: Proceedings of the International Conference*. – Padua, Italy, 18–19 November, 2014. – P. AP23-1–AP23-9. URL: <https://www.researchgate.net/publication/318589814> (дата обращения 01.06.2022).
42. Rasyid A.R., Bhandary N.P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia // *Geoenvironmental Disasters*. – 2016. – V. 3. – Article number 19. URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0053-x> (дата обращения 01.06.2022).
43. Fuzzy comprehensive safety evaluation of pipeline disaster in China–Russia crude oil permafrost region based on improved analytic hierarchy process-entropy weight method / Y. Shen, D. Chen, M. Zhang, T. Zuo // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2022. – V. 2022. (first online). URL: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2022/3157793/> (дата обращения 01.06.2022).
44. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: a case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China / Y.X. Zhang, H.X. Lan, L.P. Li, Yu.M. Wu, J.H. Chen, N.M. Tian // *Journal of Mountain Science*. – 2020. – V. 17. – P. 340–357. URL: <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5702-6> (дата обращения 01.06.2022).
45. Moses A.N. GIS-RUSLE interphase modelling of soil erosion hazard and estimation of sediment yield for river Nzoia basin in Kenya // *J Remote Sens GIS*. – 2017. – V. 6. – № 3. – P. 1–13.
46. Pambudi A.S., Moersidik S.S., Karuniasa M. Analysis of recent erosion hazard levels and conservation policy recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed // *Jurnal Perencanaan Pembangunan: the Indonesian Journal of Development Planning*. – 2021. – V. 5. – № 1. – P. 71–93.
47. Soil erosion modelling using GIS and revised universal soil loss equation approach: a case study of Guna-Tana landscape, Northern Ethiopia / A. Teshome, A. Halefom, M. Teshome, I. Ahmad, Y. Taddele, M. Dananto, P. Szucs // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2021. – V. 7. – № 1. – P. 125–134.
48. Баборыкин М.Ю. Сходимость результатов дистанционного метода дешифрирования с полевыми работами на линейном объекте. На примере оползневого участка // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 161–175.
49. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности из-за извлечения подземных вод // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.

Поступила 30.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 15.02.2023 г.

Информация об авторах

Нечаев Д.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; ведущий инженер Линейно-эксплуатационной службы Чаяндинского нефтегазопромыслового управления ООО «Газпром добыча Ноябрьск».

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

ASSESSMENT OF KARST-SUFFUSION HAZARD OF THE CHAYANDA–ESPO OIL PIPELINE IN YAKUTIA

Dmitry A. Nechaev^{1,2},
nechaevdmitryrf@gmail.com

Lyudmila A. Strokovaya¹,
sla@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Linear Operational Service of the Chayandinsky Oil and Gas Field Management of Gazprom Dobycha Noyabrsk LLC,
2, 40 let Pobedy street, Noyabrsk, 629806, Russia.

The study is relevant due to the need to identify dangerous sections of oil and gas pipelines located in underdeveloped and sparsely populated areas, due to the development of dangerous geological processes.

This study aims to assess the intensity and forecast the development of karst-suffusion processes within the pipeline route located in southern Yakutia, and to determine the most significant factors that activate this process.

Methods: processing engineering and geological survey data, digitization of geological maps and decoding satellite images to build factor maps that affect the activation of the karst process: geological structure of the route; curvature, slope, surface exposure; map of surface drainage density and density of total tectonic fracturing. We created a map of the density of karst occurrences along the route according to the route survey and data from engineering and geological surveys during construction. We compiled a map of the susceptibility of the route territory to the development of karst-suffusion processes based on the Frequency Ratio method.

Results. We carried out a description of the engineering and geological conditions of the pipeline route. To assess the karst-suffusion hazard of the pipeline route, calculations were made of the expected sizes of sinkholes in the base of structures using the method of G.M. Shakhunyan. Using the method of the ratio of particulars, the correlations between factors and foci of karst occurrences along the pipeline route were obtained. The susceptibility map developed on the basis of these results makes it possible to determine specific site boundaries for determining solutions for monitoring the development of the exogenous process and optimizing the pipeline operation processes. Therefore, such methodology can be applied to other extended gas and oil pipelines located in difficult geological conditions.

Key words:

Oil pipeline, engineering-geological processes, geocryological conditions, karst, permafrost soils, method of correlation of particulars, susceptibility map.

The research was carried out at National Research Tomsk Polytechnic University within the program of National Research Tomsk Polytechnic University competitiveness enhancement (VIU funds).

REFERENCES

- Li X., Wu Q., Jin H. New methods for predicting strain demand of Arctic gas pipelines across permafrost under frost heave displacement. *Geofluids*, 2022, vol. 2022. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/2022/9094890/> (accessed 30 December 2022).
- Li X., Wu Q., Jin X. Mitigation strategies and measures for frost heave hazards of chilled gas pipeline in permafrost regions: a review. *Transportation Geotechnics*, 2022, no. 100786.
- Strokovaya L.A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement. Scientific and technical challenges in the well drilling progress. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, no. 012030, 6 p. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012030> (accessed 30 December 2022).
- Strokovaya L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, Article number 012051, 6 p. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/43/1/012051> (accessed 30 December 2022).
- Varlamov S., Scriabin P. Inzhenerno-geokriologicheskoe sostoyaniye koridorov trass truboprovodov tsentralnoy Yakutii [Engineering-geocryological state of corridors of pipelines of Central Yakutia]. *X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. Geologiya i mineralno-syrovyye resursy Severo-Vostoka Rossii* [Geology and mineral resources of the North-East of Russia. X All-Russian Scientific conference with international participation]. Yakutsk, 8–10 April 2020. Yakutsk, SVFU Publ., 2020. pp. 430–433.
- Kazantseva L.A., Vorobieva S.V. Monitoring of geocryological conditions of natural landscapes on the route of the Nadym-Punga gas pipeline. *Transport and mechanical engineering of Western Siberia*, 2020, no. 1, pp. 29–35.
- Trifonov O.V., Silkin V.M., Cherniy V.P. Forecasting the stress-strain state of the main gas pipeline «Power of Siberia» in the areas of development of dangerous engineering and geocryological processes based on mathematical models. *Vesti gazovoy nauki*, 2020, no. 2 (44), pp. 34–50. In Rus.
- Strokovaya L.A., Dmitrieva S.A., Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
- Strokovaya L. A., Dutova E.M., Ermolaeva A.V., Alimova I.N., Strelnikova A.B. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 012032. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012032> (accessed 10 December 2022).
- Hoopes O., Croft P., Wutting F. Embankment fill slope movement on thaw sensitive permafrost: combining creep testing and thermal simulations to develop mitigation options at lost creek along the Trans-Alaska pipeline system; Lost Creek. P. 2. *Permafrost 2021: Merging Permafrost Science and Cold Regions Engineering*. Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 2021. pp. 360–373.

11. Huang S., Ding Q., Chen K., Hu Z., Liu Y., Zhang X., Ding L. Changes in near-surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, vol. 206, pp. 103709.
12. Li X., Jin X., Wang X. Jin H., Tang L., Li X., He R., Li Y., Huang C., Zhang S. Investigation of permafrost engineering geological environment with electrical resistivity tomography: a case study along the China-Russia crude oil pipelines. *Engineering Geology*, 2021, vol. 291, no. 106237.
13. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Badina S.V., Sadurtdinov M.R., Drozdov D.S., Fedorov R.Y. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 9, pp. 3190.
14. Varlamov S., Skryabin P., Zhirkov A., Wen Z. Monitoring the permafrost conditions along pipeline routes in Central Yakutia, Russia. *Land*, 2022, vol. 11, no. 12, pp. 2331.
15. Wang F., Li G., Ma W., Chen D., Wu G., Cao Y., Che F. Assessment of permafrost disturbances caused by two parallel buried warm-oil pipelines: a case study at a high-latitude wetland site in Northeast China. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, pp. 103753.
16. Melezh T.A. Typological zoning of trunk pipeline routes according to the possibilities of engineering-geological processes (on the example of the trunk pipeline «Druzhba 2» within the Limits of the Republic of Belarus). *Izv. Saratov Univ. (N. s.), Ser. Earth Sciences*, 2020, vol. 20, Iss. 1, pp. 10–16. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-1-10-16>
17. Trifonov O.V., Morin I.Yu., Volodin P.A. Printsipy klassifikatsii uchastkov po prognozirovomoy opasnosti dlya magistralnykh gazoprovodov, raspolozhennykh v zonakh razvitiya opasnykh inzhenerno-geokriologicheskikh protsessov [Principles of classification of sites according to the predicted danger for main gas pipelines located in areas of development of hazardous engineering and geocryological processes]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 2021, no. 2, pp. 82–98. In Rus.
18. Sharafi S., Kamangir H., King S.A., Safaierad R. Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 12, pp. 1–11.
19. Strokova L.A. Numerical model of surface subsidence during subway tunneling. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2009, vol. 46 (3), pp. 117–119.
20. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 8, pp. 5517–5530.
21. Vladova A.Y. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline. *Mathematics*, 2022, vol. 10 (11), 1813.
22. Zhou J., Liang Z., Zhang L., Zheng T., Zheng J. Thermal and mechanical analysis of the China–Russia Crude Oil Pipeline suffering settlement disaster in permafrost regions. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, vol. 199, 104729.
23. Elizarov A.S., Kurchatova A.N. Monitoring nadzemnykh truboprovodov s pomoshchyu globalnykh navigatsionnykh sputnikovyykh sistem [Monitoring of elevated pipelines using global navigation satellite systems]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii)*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 28–42.
24. Epifanova E.A., Strokova L.A. Evaluation of deformations of a historical building in Tomsk using an integrated approach based on a combination of ground-based laser scanning and finite element modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 27–41. In Rus.
25. Reutskikh N.V., Berezhnoy M.A., Dudenko I.A. Geotekhnichesky monitoring dlya magistralnykh truboprovodov v razlichnykh tipakh mnogoletnemerykh porod [Geotechnical monitoring for trunk pipelines in various types of permafrost]. *Nauchny zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva*, 2016, no. 2, pp. 22–26.
26. Strokova L.A., Nechaev D.A. The role of hazardous geological processes in the operation of the Chayanda-ESPO oil pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 125–134. In Rus.
27. Tekhnicheskiy otchet po inzhenernym izyskaniyam. Obustroystvo nefyanoy otorochki botuobinskoy zalezhi Chayandinskogo NGKM s vydeleniem etapa opytno-promyshlennykh robot. Etap 3. Stroitelstvo nefteprovoda Chayanda–VSTO. V 5 t. T. 2. (chast 2) [Technical report on engineering surveys. Arrangement of the oil rim of the Botuobinskoe deposit of the Chayandinskoe oil and gas condensate field with the allocation of the stage of pilot work. Stage 3. Construction of the Chayanda-ESPO oil pipeline. In 5 vols. T. 2.1 (part 2)]. Saratov, VNIPIgazdobyicha Publ., 2014. 412 p.
28. *Geologicheskaya karta SSSR mashtaba 1:200000 (sost. Yu.A. Dukardt), list P-49-XXXV, seriya Verkhne-Vilyuyskaya* [Geological map of the USSR at a scale of 1:200000 (compiled by Yu.A. Dukardt), sheet P-49-XXXV, Verkhne-Vilyuyskaya series]. Moscow, Nedra, 1973. 1 p.
29. Milanovsky E.E. *Geologiya Rossii i blizhnego zarubezhya (severnoy Evrazii)* [Geology of Russia and neighboring countries (northern Eurasia)]. Moscow, Moscow State University Publ., 1996. 448 p.
30. Kutepov V.M. *Karta «Opasnost karsta». Nauchnoe izdanie «Atlas prirodnikh i tehnogennykh opasnostey i riskov chrezvychaynykh situatsiy v Rossiyskoy Federatsii»* [Map «Danger of Karst» Scientific publication «Atlas natural and man-made hazards and risks of emergency situations in the Russian Federation»]. Ed. by S.K. Shoygu. Moscow, Design. Information. Cartography Publ., 2010. 696 p.
31. Tolmachev V.V., Troitsky G.M., Khomenko V.P. *Inzhenerno-stroitelnoe osvoenie zakarstovannykh territoriy* [Engineering and construction development of karst territories]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 176 p.
32. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S.R., Hölbling D., Blaschke T. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 572–600.
33. Gebreegziabher T., Suryabagavan K.V., Kumar Raghuvanshi T. WebGIS-based decision support system for soil erosion assessment in Legedadi watershed, Oromia Region, Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2021, pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (accessed 11 November 2022).
34. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 723–742.
35. Li Z., Shi W., Lu P., Wang Q., Miao Z. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field. *Journal Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 187, pp. 76–90.
36. Tairi A., Elmouden A., Bouchaou L., Aboulouafa M. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askaoun watershed, southern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 1–22.
37. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas», (Central Spanish System, Salamanca, Spain). *Geosciences*, 2013, vol. 1, pp. 46–62.
38. Grendas N., Marinos V., Papathanassiou G., Ganas A., Valkaniotis S. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, no. 12, p. 425. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7598-9> (accessed 1 June 2022).
39. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. *Engineering Geology*, 2018, vol. 246, pp. 107–122.
40. Hassanpour J., Firouzei Y., Hajipour G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 1, pp. 267–280.
41. Ivanova E. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and Analytic Hierarchy Process (AHP): Comparative study of two areas in Bulgaria. *Analysis and Management of Changing Risk for Natural Hazards. Proceedings of the International Conference*. Padua, Italy, 18–19 November, 2014. pp. AP23-1–AP23-9. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/318589814> (accessed 1 June 2022).
42. Rasyid A.R., Bhandary N.P., Yatabe R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia.

- Geoenvironmental Disasters*, 2016, vol. 3. Article number 19. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0053-x> (accessed 1 June 2022).
43. Shen Y., Chen D., Zhang M., Zuo T. Fuzzy Comprehensive safety evaluation of pipeline disaster in China–Russia crude oil permafrost region based on improved analytic hierarchy process-entropy weight method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, vol. 2022. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2022/3157793/> (accessed 1 June 2022).
 44. Zhang Y.X., Lan H.X., Li L.P., Wu Yu.M., Chen J.H., Tian N.M. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: a case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China. *Journal of Mountain Science*, 2020, vol. 17, pp. 340–357. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5702-6> (accessed 1 June 2022).
 45. Moses A.N. GIS-RUSLE interphase modelling of soil erosion hazard and estimation of sediment yield for river Nzoia basin in Kenya. *J Remote Sens GIS*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 1–13.
 46. Pambudi A.S., Moersidik S.S., Karuniasta M. Analysis of recent erosion hazard levels and conservation policy recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed. *Journal Perencanaan Pembangunan: the Indonesian Journal of Development Planning*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 71–93.
 47. Teshome A., Halefom A., Teshome M., Ahmad I., Taddele Y., Dananto M., Szucs P. Soil erosion modeling using GIS and revised universal soil loss equation approach: a case study of Guna-Tana landscape, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 125–134.
 48. Baborykin M.Yu. Convergence of the results of interpretation remote method with field work on a linear object. On the example of landslide plot. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 161–175. In Rus.
 49. Phi H. T., Strokova L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.

Received: 30 January 2023.

Reviewed: 15 February 2023.

Information about the authors

Dmitry A. Nechaev, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; leading engineer, Linear Operational Service of the Chayandinsky Oil and Gas Field Management of Gazprom Dobycha Noyabrsk LLC.

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.