



УДК 504.06+528.9(571)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.3>

Сравнительная геоэкологическая оценка развития опасных экзогенных процессов на магистральных трубопроводах РФ

В. В. Жаркова, О. С. Сизов*

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, Россия

Аннотация. Изучаются опасные экзогенные процессы как один из основных факторов возникновения аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах. В качестве модельных участков выбраны территории Западного Ямала (магистральный газопровод Бованенково – Ухта), Южной Якутии (магистральный нефтепровод Восточная Сибирь – Тихий океан) и остров Сахалин (магистральный нефтегазопровод «Сахалин-2»). В качестве исходных данных используются космические снимки высокого разрешения WorldView-2/3 и цифровые модели рельефа AW3D30 и ArcticDEM. Применяются все доступные методы дешифрирования, включая искусственные нейронные сети (глубокое обучение). Выявляются опасные процессы на каждом участке: термокарст на участке магистрального нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан, термокарст и ветровая эрозия на магистральном газопроводе Бованенково – Ухта, оползневые процессы и участки, подверженные склоновым процессам и линейной эрозии, на магистральном нефтегазопроводе «Сахалин-2». Построены карты-схемы выявленных процессов на каждом из участков пролегания трассы магистральных трубопроводов. Предложенный подход позволяет проводить объективный сравнительный анализ участков магистральных трубопроводов в различных природных условиях в выявлении общих актуальных закономерностей развития опасных экзогенных процессов, которые не учитываются в типовой нормативной документации.

Ключевые слова: экзогенные процессы, магистральный трубопровод, термокарст, дефляция, оползни, аварийные ситуации, дистанционное зондирование Земли.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках реализации научной темы РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина.

Для цитирования: Жаркова В. В., Сизов О. С. Сравнительная геоэкологическая оценка развития опасных экзогенных процессов на магистральных трубопроводах РФ // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 51. С. 3–18. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.3>

Original article

Comparative Geoecological Assessment of the Development of Dangerous Exogenous Processes on the Main Pipelines of the Russian Federation

V. V. Zharkova, O. S. Sizov*

Gubkin University, Moscow, Russian Federation

© Жаркова В. В., Сизов О. С., 2025

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

Abstract. In this paper, the subject of study is dangerous exogenous processes as one of the main factors of emergency situations on main pipelines. The territories of Western Yamal (Bovanenkovo – Ukhta main gas pipeline), Southern Yakutia (East Siberia – Pacific Ocean main oil pipeline), and Sakhalin Island (Sakhalin-2 main oil and gas pipelines) were selected as model sites. High-resolution satellite images WorldView-2/3 and digital terrain models AW3D30 and ArcticDEM are used as source data. All available decryption methods were used in the work, including the use of artificial neural networks (deep learning). According to the results of the work, dangerous processes were identified at each site: thermokarst at the section of the East Siberia – Pacific Ocean main oil pipeline, thermokarst and wind erosion at the Bovanenkovo – Ukhta main gas pipeline, landslide processes and areas subject to slope processes and linear erosion at the Sakhalin-2 main oil and gas pipelines, and maps were built-diagrams of the identified processes at each of the sections of the main pipeline route. The proposed approach allows for an objective comparative analysis of sections of main pipelines in various natural conditions in order to identify common relevant patterns of development of dangerous exogenous processes that are not taken into account in standard regulatory documentation.

Keywords: exogenous processes, main pipeline, thermokarst, deflation, landslides, emergencies, remote sensing of the Earth.

For citation: Zharkova V.V., Sizov O.S. Comparative Geoeological Assessment of the Development of Dangerous Exogenous Processes on the Main Pipelines of the Russian Federation. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 51, pp. 3-18. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.3> (in Russian)

Введение

Трубопроводный транспорт является наиболее распространенным видом перевозки нефти, газа и продуктов переработки. Общая протяженность магистральных трубопроводов (МТ) в Российской Федерации достигает 231,1 тыс. км¹. Они расположены в самых разнообразных природных условиях, что существенно затрудняет разработку инженерно-технических решений как при строительстве, так и при эксплуатации [Бородавкин, 1982].

Одной из основных экологических проблем, возникающих в процессе эксплуатации МТ, являются аварийные утечки транспортируемого продукта, которые происходят в силу различных причин природного и техногенного характера [Oil and Gas ... , 2024]. По данным² в Российской Федерации в среднем происходит 7 аварийных ситуаций в год, а в мире (учитывались усредненные данные по Канаде, США и ЕС) – около 70³. Специальные исследования показывают, что среди природных причин возникновения аварий на МТ наиболее опасными являются экзогенные геологические процессы (ЭГП) (оползни, сели, водная эрозия, дефляция, термокарст и т. д.) [Struchkova, Kapitonova, Efremov, 2021; Мониторинг экзогенных геологических ... , 2011; Марахтанов, 2019; Lebedeva, Kazakov, Ershov, 2021].

¹ Ежегодные отчеты о деятельности за 2012–2022 годы // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/?ysclid=lt8mpbrmsw141387125 (дата обращения: 20.02.2024).

² Там же.

³ Incident Statistics // Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/hazmat-program-management-data-and-statistics/data-operations/incident-statistics> (date of access: 20.02.2024); Pipeline transportation occurrences in 2022 // Transportation Safety Board of Canada. URL: <https://www.bst-tsb.gc.ca/eng/stats/pipeline/2022/ssep-sspo-2022.html> (date of access: 20.02.2024); Statistical summary of reported spillages in 2017 and since 1971 // Concaewe. URL: <https://www.concaewe.eu/wp-content/uploads/Performance-of-European-cross-country-oil-pipelines-Statistical-summary-of-reported-spillages-in-2017-and-since-1971.pdf> (date of access: 20.02.2024).

Изучению различных аспектов негативного воздействия ЭГП на МТ посвящены, в частности, работы [Struchkova, Kapitonova, Efremov, 2021; Мониторинг экзогенных геологических ... , 2011; Маратханов, 2019; Lebedeva, Kazakov, Ershov, 2021; Баранов, Унаниян, 2013; Губарьков, 2011; Влияние антропогенной деятельности, 2022; Geotechnical Monitoring ... , 2018; A comprehensive review, 2014; Li, Wu, Jin, 2022; Denizman, Parrish, 2017], которые носят преимущественно региональный характер. Так, на территории Южной Якутии в качестве основной опасности рассматривается термокарст [Struchkova, Kapitonova, Efremov, 2021; Geotechnical Monitoring ... , 2018], а в Западной Сибири – морозное пучение, термокарст, оползни-сплывы и заболачивание [Маратханов, 2019; Баранов, Унаниян, 2013; Губарьков, 2011].

Целью данной работы является сравнительный анализ развития преобладающих видов ЭГП на МТ в различных природных зонах Российской Федерации на основе высокодетальных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Материалы и методы

Модельные участки, выбранные для сравнительного анализа, отображены на рис. 1 и в табл. 1.

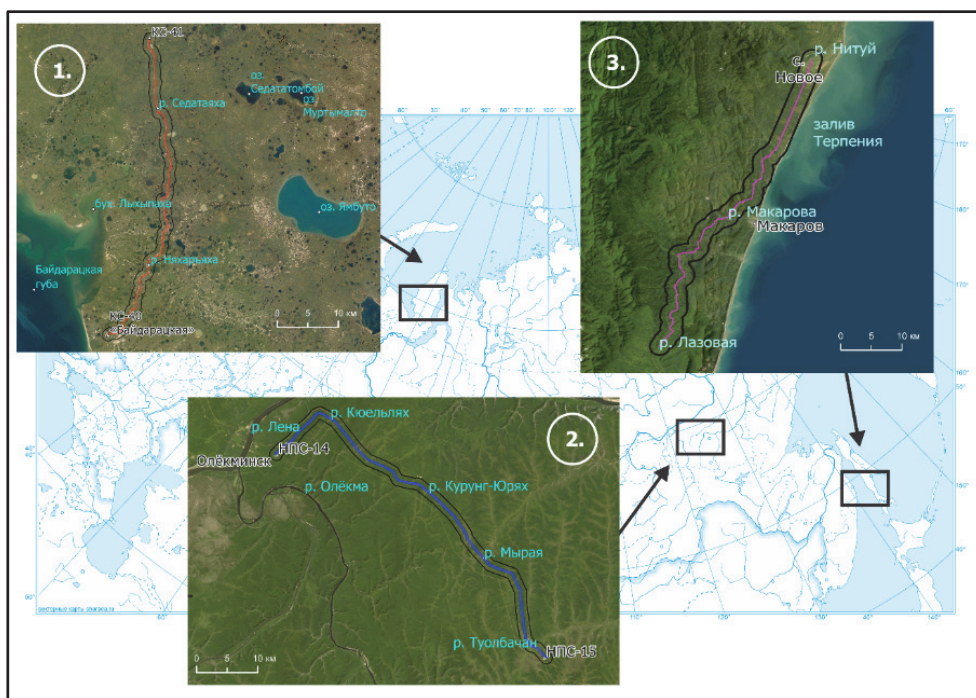


Рис. 1. Карта-схема выбранных для исследования участков МТ. Космические снимки WorldView-2/3©ESRI, Maxar

Таблица 1

Технические характеристики рассматриваемых участков МТ⁴
[Синицкий, 2016; Ивакин, 2007; Анализ недропользования ... , 2019]

Технические характеристики	МГ Бованенково – Ухта	МН Восточная Сибирь – Тихий океан	МНГП «Сахалин-2»
Год введения в эксплуатацию	2012	2009	2009
Диаметр труб, мм	1420	1220	508*/610**/1220***
Ежегодная пропускная способность, млн т (м ³)	115	66	0,03 для нефтепровода (15,1 для газопровода)
Протяженность участка исследования, км	62	102	62

Примечание: * – с Пильтун-Астохского месторождения до берегового технологического комплекса; ** – для нефтепровода; *** – для газопровода от берегового технологического комплекса до завода по производству сжиженного природного газа; МГ – магистральный газопровод; МН – магистральный нефтепровод; МНГП – магистральный нефтегазопровод.

Участок 1 – МГ Бованенково – Ухта (от КС-40 «Байдарацкая» до КС-41). Территориально относится к Западному Ямалу, перепады абсолютных высот составляют от 0 до 70 м. Участок находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП) с льдистостью пород 0,15–0,35, мерзлота преимущественно сливающегося типа [Губарьков, 2011].

Участок 2 – МН Восточная Сибирь – Тихий Океан (от НПС-14 до НПС-15). Территориально относится к Южной Якутии, перепады абсолютных высот составляют от 500 до 1000 м, на участке распространены ММП редкоостровного, островного и массивно-островного типа с преобладанием таликов. В южной части встречаются единичные проявления многолетней мерзлоты – температура почвы на глубине 10–15 м выше –1,5 °С [Shatz, Cherepanova, 2019].

Участок 3 – МНГП «Сахалин-2» (между переходами через р. Нитуй и р. Лазовую). Участок расположен на о. Сахалин в пределах Макаровского р-на, перепады абсолютных высот составляют от 0 до 700 м, крутизна склонов достигает 35–50° [Баранов, Унанян, 2013]. Кроме того, территория отличается высокой сейсмичностью: возможны землетрясения магнитудой до 9–10 баллов по шкале MSK-64.

Выявление негативных ЭГП на каждом участке проводилось в буферной зоне шириной 1,5 км от осевой линии МТ.

Методические вопросы применения данных ДЗЗ для оценки негативного воздействия ЭГП неоднократно рассматривались различными авторами [Баранов, Унанян, 2013; Мележ, 2013]. В данной работе в качестве основы для дешифрирования использовалась мозаика высокодетальных космических снимков WorldView-2/3, а также цифровые модели рельефа (ЦМР) AW3D30 и ArcticDEM (табл. 2).

⁴ Трубопроводы Сахалина // ЦДУ ТЭК. URL: https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2021/11/965/ (дата обращения: 15.07.2024).

Таблица 2

Характеристики исходных дистанционных данных

Тип данных	Участок	Пространственное разрешение, м	Точность привязки (СЕ90), м	Формат файла
Мозаика WorldView-2/3 ⁵	МГ Бованенково – Ухта; МН Восточная Сибирь – Тихий Океан; МНГП «Сахалин-2»	Мультиспектр: 1,84 (WV2); 1,24 (WV3) Панхром: 0,46(WV2); 0,31 (WV3)	6,5 (WV2) 3,5 (WV3)	GeoTIFF
ЦМР ArcticDEM ⁶	МГ Бованенково – Ухта	2	4	GeoTIFF
ЦМР ALOS World 3D 30 m (AW3D30) ⁷	МН Восточная Сибирь – Тихий Океан; МНГП «Сахалин-2»	30	7	GeoTIFF

В качестве дополнительных исходных данных использовались:

- данные метеонаблюдений (осадки, температура)⁸;
- данные моделирования ветровой активности (плотность энергии ветра и скорость ветра на разных высотах с детальностью 250 м)⁹;
- данные о сейсмических событиях с 2003 по 2021 г.¹⁰;
- материалы инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий.

Дистанционная индикация ЭГП осуществлялась несколькими методами:

- визуальное дешифрирование на основе известных индикационных признаков¹¹ [Господинов, 1961] (табл. 3);
- визуальное дешифрирование на основе эталонов, полученных по результатам полевых изысканий;
- автоматическая классификация с обучением (алгоритм «Максимальное подобие»);
- автоматическая классификация с помощью искусственных нейронных сетей;
- пороговое выделение на основе углов наклона.

⁵ World Imagery // ESRI. URL: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08feb2a9> (date of access: 08.05.2024).

⁶ PGC DEM Products – ArcticDEM, REMA, and EarthDEM // University of Minnesota. URL: <https://www.pgc.umn.edu/guides/stereo-derived-elevation-models/pgc-dem-products-arcticdem-rema-and-earthdem/> (date of access: 29.07.2024).

⁷ High-resolution digital 3D map covering the entire global land area // AW3D. URL: <https://www.aw3d.jp/en/products/standard/> (date of access: 29.07.2024).

⁸ АИСОРИ. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/result.xhtml> (дата обращения: 04.03.2024).




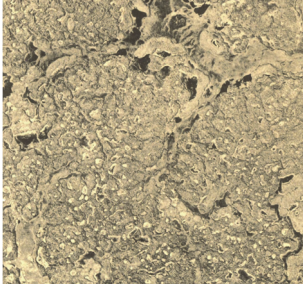

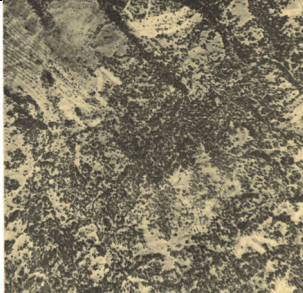


⁹ Global Wind Atlas. URL: <https://globalwindatlas.info/ru> (date of access: 04.03.2024).

¹⁰ ФГБУН ФИЦ Единая геофизическая служба РАН. URL: http://www.gsras.ru/new/ssd_news.htm (дата обращения: 04.03.2024).


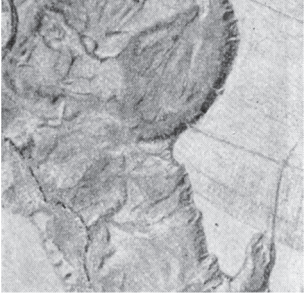
¹¹ Альбом образцов изображения рельефа на топографических картах. Вып. 184. М., 1968. 61 с.

Таблица 3

Примеры изображений с экзогенными процессами на основе учебной литературы.
Космические снимки WorldView-2/3©ESRI, Maxar

Тип экзогенного процесса	Фрагмент из исследования	Фрагмент из литературы [Альбом образцов изображений ... , 1968; Господинов, 1961]
Термокарст (линейный)		
Термокарст (площадной)		
Дефляция		
Линейная эрозия		

Окончание табл. 3

Тип экзогенного процесса	Фрагмент из исследования	Фрагмент из литературы [Альбом образцов изображений ... , 1968; Господинов, 1961]
Оползни		

Верификация результатов классификации с обучением проводилась путем расчета матрицы ошибок с помощью инструмента Confusion Matrix (Матрица Ошибок/Несоответствий) в ПО SAGA GIS 9.3.1. Данный инструмент сравнивает слой классификации с контрольной выборкой исходных классов и создает матрицу со значениями несоответствий (доля площади по каждой паре классов).

В части глубокого обучения искусственных нейронных сетей использовалась сверточная нейронная сеть (CNN) с архитектурой U-Net, которая позволяет более точно выделять множество различных небольших объектов. Для применения модели глубокого обучения проводилось ее обучение на подготовленной разметке тестовых объектов [Convolutional Neural Network ... , 2023]. Для проверки полученных результатов были задействованы основные метрики глубокого обучения – precision (точность предсказания), recall (полнота). Они показывают, насколько точно модель выделяет интересующие объекты интереса [Там же].

Расчет углов наклона выполнялся с помощью инструмента «Уклон» модуля 3D Analyst в ПО ArcGIS Pro 3.0.1, который определяет крутизну в каждой ячейке растровой поверхности планарным методом. В качестве показателя активного развития склоновых процессов, согласно методическим указаниям ПО ArcGIS Pro 3.0.1, использовалось пороговое значение 25°.

Дешифрирование, морфометрический анализ и составление тематических карт выполнялось в ПО ArcGIS Pro 3.0.1.

Результаты исследования

Участок 1 – МГ Бованенково – Ухта. На данном участке в качестве ЭГП доминируют термокарст и дефляция. Общая площадь выявленных участков термокарста составила 23,67 га; участков ветровой эрозии – 73,92 га. Точность (precision) классификации составила 70 %.

Неоднородность распространения ЭГП можно показать на примере различных районов, выделенных на основе характера рельефа: 1 – морская терраса; 2 – речная долина; 3 – морская терраса; 4 – склон южной экспозиции; 5 – водораздел; 6 – северной экспозиции (рис. 2).

Термокарст встречается в наибольшей степени в пределах района 1 – 90 % от общей площади, далее 14 и 12 % – в пределах районов 4 и 5 соответственно, а в наименьшей – в пределах районов 2, 3 и 6 (7, 3 и 1 % соответственно). Участки ветровой эрозии в наибольшей степени выявлены в пределах района 3 – 48 % от общей площади, далее в районах 1 и 2 (23 и 30 % соответственно), в наименьшей степени – в районах 4, 5 и 6 (5, 5 и 11 % соответственно).

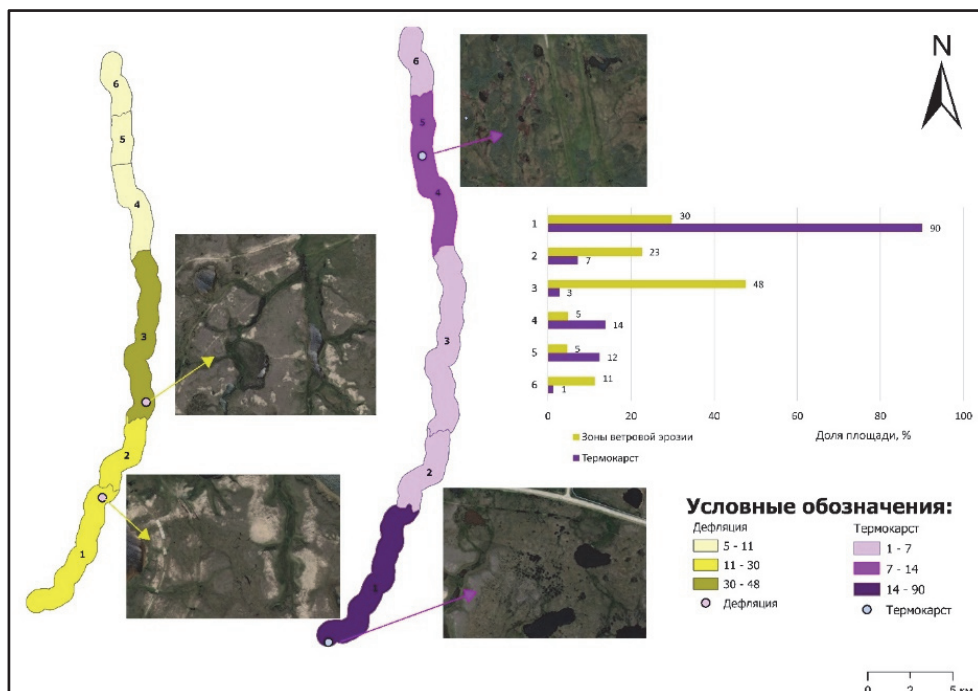


Рис. 2. Карта-схема выявленных ЭГП на участке МГ Бованенково – Ухта. Космические снимки WorldView-2/3©ESRI, Maxar

Можно отметить, что широкому развитию термокарста в пределах районов 1 и 3 способствует наличие озерно-ледниковых, озерно-аллювиальных и озерно-болотных отложений (песков и алевритов) с промывным водным режимом¹².

На развитие дефляции значительное влияние оказывает скорость ветра. Расчеты показали, что среднегодовые значения здесь составляют 5,45 м/с (табл. 4), что близко к пороговым значениям развития ветровой эрозии на участках с отложениями песков и алевритов (6–8 м/с на высоте от 10 до 12 м) [Гаель, Смирнова, 1999].

¹² Карта четвертичных отложений масштаба 1:2 500 000 Российской Федерации, составлена: ФГБУ «ВСЕ-ГЕИ», ФГУП «ВНИИОкеангеология», 2014 г. / ред.-сост.: А. С. Застрожнов, Е. А. Минина, В. К. Шкатова, В. Д. Тарноградский, О. Н. Снежко, В. М. Рыжкова, В. И. Астахов, Е. А. Гусев.

Таблица 4

Основные параметры развития ветровой эрозии

Район	Скорость ветра ¹³ , м/с	Доля дефляции, %	Средняя высота, м над у. м.
1	4,9	30	24
2	5	23	12
3	4,6	48	30
4	4,2	5	50
5	4,9	5	72
6	4,7	11	40

Участок 2 – МН Восточная Сибирь – Тихий океан. Ведущим типом ЭГП на участке является термокарст. Всего здесь выявлено 189 объектов с проявлениями термокарста, общей площадью 18,33 га. Термокарстовые формы рельефа приурочены к долинному комплексу (руслам, поймам, террасам и старицам рек), ложбинам стока, заболоченным участкам. По степени развития термокарста участок можно разделить на 6 районов, различающихся характером рельефа: 1 – осевая часть гряды вдоль р. Лены; 2 – поверхность выравнивания; 3 – приводораздельный склон; 4 – водораздел северной экспозиции; 5 – водораздел южной экспозиции; 6 – склон (рис. 3).

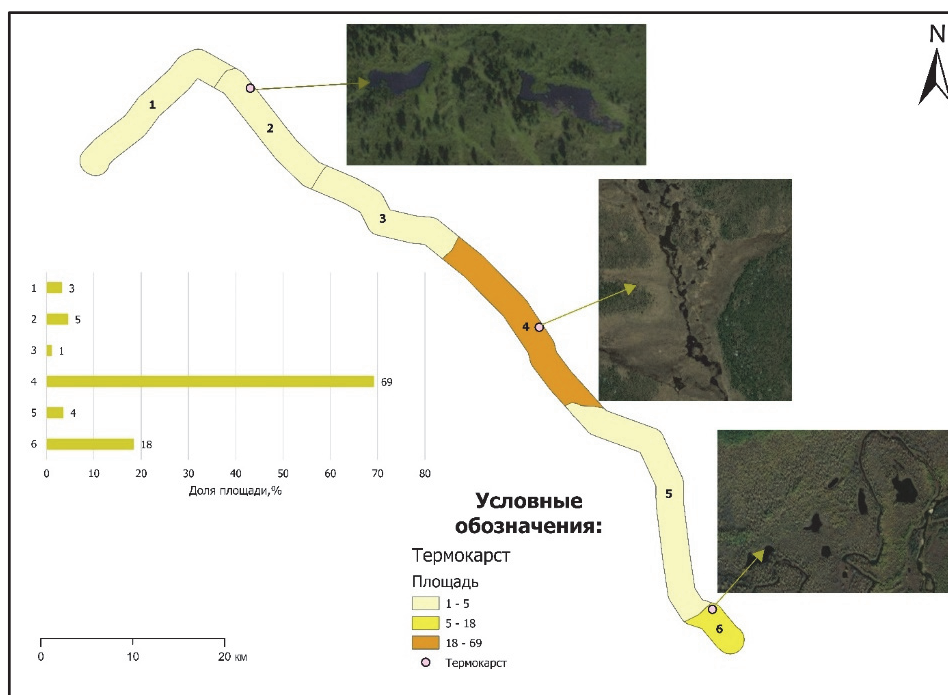


Рис. 3. Карта-схема проявлений термокарста на участке МН Восточная Сибирь – Тихий океан. Космические снимки WorldView-2/3©ESRI, Maxar

¹³ Global Wind Atlas. URL: <https://globalwindatlas.info/ru> (date of access: 04.03.2024)

Наиболее подвержен воздействию термокарста район 4 – 69 % от общей площади, далее следует район 6 – 18 % и наименее подверженные термокарсту районы 1, 2, 3 и 5 – 3, 5, 1 и 4 % соответственно.

Повышению площади термокарста на водоразделах может способствовать накопление рыхлых толщ четвертичных отложений делювиального, элювиального и делювиального генезиса¹⁴.

Участок 3 – МНГП «Сахалин-2». В результате анализа в качестве наиболее опасных ЭГП здесь были выявлены склоновые процессы, оползневые процессы и линейная эрозия. Всего выделено 5 неукрепленных и 24 укрепленных участка оползневых процессов с общей площадью 43,71 га, общая площадь участков, подверженных линейной эрозии, составила 78,4 га, а общая площадь участков, подверженных склоновым процессам, – 725,81 га.

По характеру рельефа буферная зона на участке МНГП «Сахалин-2» разделена на несколько районов: 1 – низкогорье; 2 – речная долина; 3 – среднегорье; 4 – высокогорье; 5 – среднегорье (рис. 4).

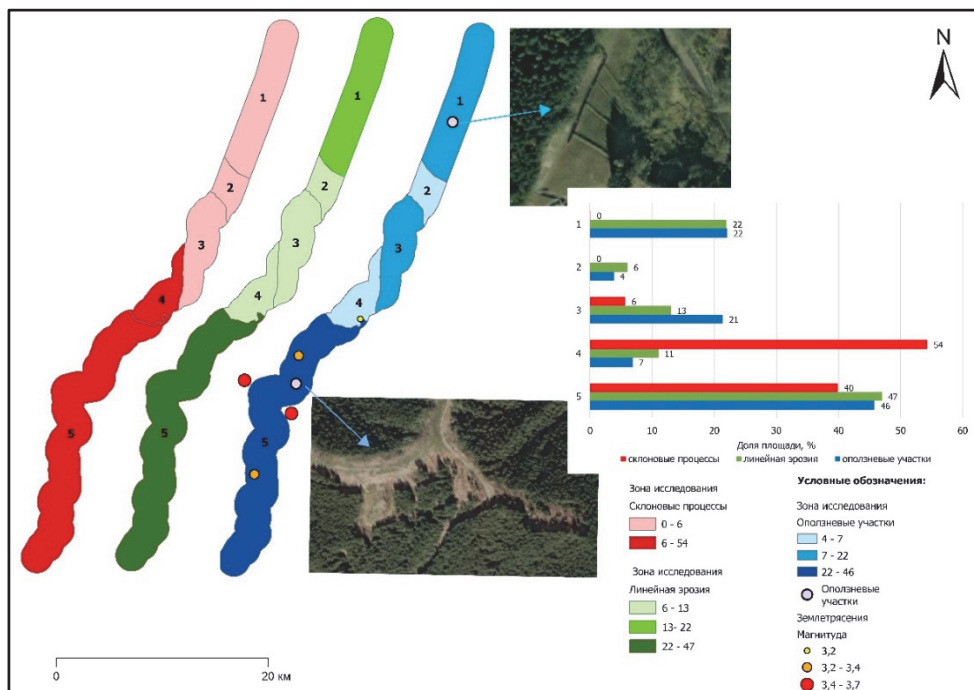


Рис. 4. Карта-схема выявленных ЭГП на участке МНГП «Сахалин-2». Космические снимки WorldView-2/3©ESRI, Maxar

Наиболее подвержен воздействию оползневых процессов район 5 – доля оползней от общей площади здесь составляет 46 %, далее идут районы 1 и 3 – 22 и 21 % соответственно и районы 2 и 4 – 4 и 7 % соответственно.

¹⁴ Карта четвертичных отложений масштаба 1:2 500 000 Российской Федерации ...

Район 5 в наибольшей степени подвержен линейной эрозии (47 % протяженности всех тальвегов в пределах участка), далее следуют районы 1, 3 и 4 (22, 13 и 11 % соответственно).

Склоновые процессы в большей степени распространены в пределах районов 4 и 5 – доля площади здесь составляет 54 и 40 % от общей площади данного экзогенного процесса соответственно.

Развитию оползней и гравитационному перемещению грунтов при значительной глубине расчленения рельефа (от 0 до 700 м) способствует то, что большая часть территории сложена легко размокаемыми и слабосцементированными алевролитами. Непосредственным триггером активизации оползневых и склоновых процессов может выступать сейсмическая активность [Lebedeva, Kazakov, Ershov, 2021]. Всего в буферной зоне 5 км с 2003 по 2009 г. зафиксировано четыре сейсмопроявления, а с 2009 по 2021 г. – одно с максимальной магнитудой до 3,7 (см. рис. 4).

Обсуждение результатов

Сравнительный анализ (табл. 5) показывает, что сходства и различия участков по характеру проявления ЭГП определяются характером рельефа, температурным режимом, наличием ММП, а также степенью антропогенного воздействия.

Таблица 5

Проявления ЭГП на выбранных участках МГ по результатам дешифрирования, с учетом данных [Маратханов, 2019; Lebedeva, Kazakov, Ershov, 2021; Губарьков, 2011; Влияние антропогенной деятельности, 2022; Geotechnical Monitoring ... , 2018]

Опасные экзогенные геологические процессы	Участок МН Восточная Сибирь – Тихий океан	Участок МНГП «Сахалин-2»	Участок МГ Бованенково – Ухта
Оползни, осыпи	–	+	+
Лавины	–	+	–
Сели	–	+	–
Термоэрозия и эрозия	+	+	+
Суффозия	+	–	–
Подтопление, затопление и заболачивание	–	+	+
Термокарст и карст	+	–	+
Сезонное и многолетнее пучение грунтов	+	–	+
Наледи	+	+	+
Солифлюкция	–	–	+

Развитие термокарста может быть обусловлено повышением температуры и увеличением количества осадков (рис. 5). Так, по данным метеостанции Марресалея (Моррасале) рост температуры за период с 1940 по 2024 г. произошёл в среднем на 3 °С, а по данным метеостанции Олекминск за период с 1922 по 2024 г. среднегодовые температуры увеличились почти на 2 °С.

Среднее изменение количества осадков за период с 1966 по 2024 г. по данным метеостанции Марресалея (Моррасале) равно 90 мм, по данным метеостанции Олекминск за период с 1967 по 2024 г. – 55 мм в год.

В целом по итогам дешифрирования можно предположить несколько общих закономерностей:

- активность термокарстовых процессов прямо зависит от увеличения среднегодовой температуры и суммы осадков [Горохов, Федоров, 2018];
- развитие дефляции определяют сила и скорость ветра;
- сейсмическая активность является важным дополнительным стимулом для активизации склоновых процессов [Lebedeva, Kazakov, Ershov, 2021].

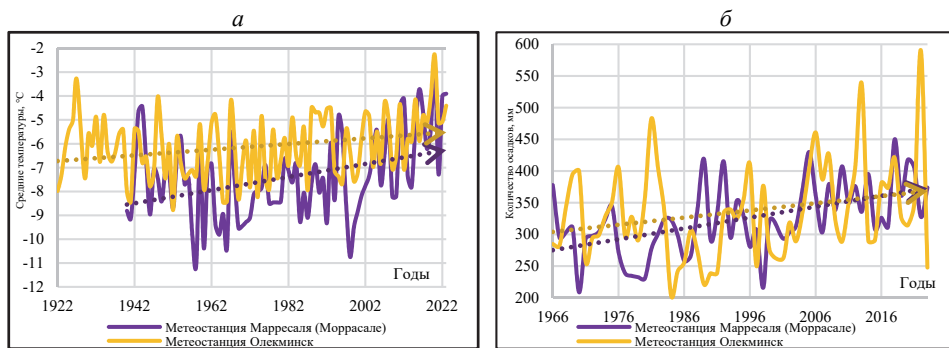


Рис. 5. График изменения средних температур на метеостанции Маррессаля (Моррассале) с 1940 по 2024 г. и на метеостанции Олекминск с 1922 по 2024 г. (а); график изменения количества осадков на метеостанции Маррессаля (Моррассале) с 1966 по 2024 г. и на метеостанции Олекминск с 1966 по 2024 г. (б)

Развитие термокарста и дефляции вдоль МГ Бованенково – Ухта уже отмечалось ранее, однако их активизация связывалась преимущественно с антропогенной деятельностью [Маратханов, 2019; Губарьков, 2011]. При этом в работах прямо указано, что развитие ЭГП может в значительной степени оказывать разрушительное воздействие на МТ [Там же].

На протяжении всей трассы МН Восточная Сибирь – Тихий океан зоны активизации термокарста могут быть приурочены к ослабленным трещиноватым зонам на выровненных поверхностях карбонатных гряд, а также зонам наибольшей мощности ММП, подверженных температурным колебаниям [Struchkova, Kapitonova, Efremov, 2021].

На целостность МНГП «Сахалин-2» большое влияние оказывают: движение взбросов/сбросов, разжижение грунта, оползни и русловые процессы, распространение сейсмических волн и сотрясение грунта, снежные лавины [Lebedeva, Kazakov, Ershov, 2021; Влияние антропогенной деятельности, 2022], что в полной мере подтверждается результатами данного исследования.

Для мониторинга состояния трассы МН Восточная Сибирь – Тихий океан неоднократно предлагалось использование аэровизуальных обследований, которые позволяют обнаружить опасные геологические процессы на основе сравнения нарушенных и ненарушенных ландшафтов [Geotechnical Monitoring ... , 2018]. Кроме этого, эффективным инструментом для анализа ЭГП на территории МТ является комплексное применение наземных (режимные измерения и наблюдения, а также маршрутные исследования) и дистанционных

(дешифрирование средне- и крупномасштабных космо- и аэрофотоснимков) методов сбора информации об ЭГП [Маратханов, 2019; Баранов, Унанян, 2013].

Предложенный в данной работе подход по выделению ЭГП отличается использованием специально обученных искусственных нейронных сетей, что существенно сокращает трудозатраты и дает возможность проведения сравнительного анализа МТ в разных природно-климатических регионах. Это позволяет оценить интенсивность долгосрочных изменений, которые проявляются в ходе глобальных климатических колебаний, в целях акцентирования работ по экологическому мониторингу и корректирования применяемых типовых проектных решений.

Выводы

В результате проведенного анализа на модельных участках МТ выявлены:

– МГ Бованенково – Ухта – зоны развития термокарста общей площадью 23,67 га и дефляции общей площадью 73,92 га;

– МН Восточная Сибирь – Тихий океан – преимущественное развитие термокарста: 189 проявлений общей площадью 18,33 га;

– на участке МНГП «Сахалин-2» – оползневые зоны, зоны линейной эрозии, а также зоны развития склоновых процессов (угол наклона более 25°): всего выделено 5 неукрепленных и 24 укрепленных участка общей площадью 43,7137 га, общая площадь участков линейной эрозии составила 78,4 га, а общая площадь участков склоновых процессов – 725,81 га.

Установлено, что для выявления ЭГП наряду с визуальным дешифрированием могут использоваться обученные искусственные нейронные сети, воспроизводящие логику работы специалиста-картографа. Автоматизация на основе глубокого обучения позволяет расширить границы мониторинга и сравнить большие по площади территории, расположенные в различных природных условиях. Необходимость проведения объективных сравнительных оценок обусловлена неоднородностью развития опасных ЭГП в условиях глобальных климатических изменений, а также важностью выделения азональных экзогенных проявлений, которые не рассматриваются в нормативных документах по проектированию. Предложенный подход можно использовать для повышения эффективности экологического мониторинга в целях снижения риска возникновения аварийных ситуаций на линейной части МТ.

Список литературы

Анализ недропользования вдоль трассы нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» / И. В. Филимонова, И. В. Проворная, В. Ю. Немов, М. В. Мишенин // Недропользование XXI век. 2019. № 5(81). С. 152–165.

Баранов А. В., Унанян К. Л. Оценка и предупреждение опасных проявлений эрозийных процессов при обустройстве и эксплуатации объектов добычи и транспорта газа на полуострове Ямал // Вести газовой науки. 2013. № 2(13). С. 100–106.

Влияние антропогенной деятельности на опасные склоновые экзогенные процессы (на примере острова Сахалин, Россия) / Д. А. Боброва, Е. Н. Казакова, С. В. Рыбальченко, А. И. Кашдан // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4, № 4. С. 327–345. <https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.4.327>

- Бородавкин П. П.* Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). М. : Недра, 1982. 384 с.
- Гаель А. Г., Смирнова Л. Ф.* Пески и песчаные почвы. М. : Наука, 1999. 460 с.
- Горохов А. Н., Федоров А. Н.* Современные тенденции изменения климата в Якутии // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 111–119. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2\(111-119\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(111-119))
- Господинов Г. В.* Дешифрирование аэроснимков. М. : МГУ, 1961, 188 с.
- Губарьков А. А.* Экзогенные геологические процессы в зоне проектируемого газопровода Бованенково – Ухта на полуострове Ямал // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2011. № 4(88). С. 30–35.
- Ивакин А. В.* Нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий океан» (ВСТО) – уникальный объект трубопроводного транспорта нефти // Территория Нефтегаз. 2007. № 5. С. 52–57.
- Марахтанов В. П.* Воздействие опасных инженерно-геологических процессов на газопроводы в области криолитозоны Западной Сибири // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2019. № 9-2(34). С. 25–33.
- Мележ А. А.* Применение космоаэроматериалов для выявления участков магистральных трубопроводов, подверженных опасным инженерно-геологическим процессам // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2013. № 2-1 (11). С. 127–129.
- Мониторинг экзогенных геологических процессов на магистральном газопроводе «Запоярное – Новый Уренгой» / А. А. Губарьков, Г. А. Алешин, И. Р. Идрисов, А. В. Кириллов // Известия высших учебных заведений // Нефть и газ. 2011. № 3(87). С. 7–13.
- Синицкий А. И.* Эколого-геокриологическое обследование магистрального газопровода «Бованенково – Ухта» на Ямальском полуострове // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2016. № 2(91). С. 9–21.
- A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications / M. Parsi, K. Najmi, F. Najafifard [et al.] // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2014. Vol. 21. P. 850–873.
- Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Approach for Automatic Flood Mapping Using NovaSAR-1 and Sentinel-1 Data / O. Andrew, A. Apan, D. R. Paudya, K. Perera // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2023. Vol. 12, N 5. P. 194.
- Denizman C., Parrish E.* Assessment of a pipeline route in a karst terrain, Florida, USA // Journal of Remote Sensing & GIS. 2017. Vol. 6, N 3.
- Geotechnical Monitoring of Pipelines Located in Difficult Climatic Conditions / E. M. Makarycheva, V. I. Surikov, T. I. Kuznetsov, D. V. Dolgoplov // 13 Pipeline Technology Conference. Berlin, 2018. P. 14–20.
- Lebedeva E. V., Kazakov N. A., Ershov V. V.* Endogenic and Exogenic Hazardous Relief-Forming Processes on Sakhalin Island // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021. Vol. 666, N 4. P. 042050.
- 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. N 1.
- Oil and Gas Pipelines Leakage Detection Approaches: A Systematic Review of Literature / S. S. Aljameel, D. A. Alabbad, D. Alomari [et al.] // International Journal of Safety & Security Engineering. 2024. Vol. 14, N 3.
- Shatz M. M., Cherepanova A. M.* Modern permafrost dynamics in environmental management in the North of Siberia // Climate&Nature. 2019. N 1 (6). P. 25–39.
- Struchkova G., Kapitonova T., Efremov P.* Geotechnical monitoring of pipeline systems operating under conditions of permafrost (Yakutia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666, N 3. P. 032088.

References

Filimonova I.V., Provornaya I.V., Nemov V.Yu. et al. Analiz nedropolzovaniya vdol trassy nefteprovoda “Vostochnaya Sibir – Tihij okean” [Analysis of subsurface use along the route of the Eastern Siberia - Pacific Ocean oil pipeline]. *Nedropolzovanie XXI vek* [Subsurface use 21st century], 2019, no. 5(81), pp. 152-165. (in Russian)

Baranov A.V., Unanyan K.L. Ocenka i preduprezhdenie opasnyh proyavlenij erozionnyh processov pri obustrojstve i ekspluatácii ob"ektov dobychi i transporta gaza na poluostrove Yamal [Assessment and prevention of dangerous manifestations of erosion processes in the construction and operation of gas production and transportation facilities on the Yamal Peninsula]. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Vesti gazovoj nauki* [Scientific and technical collection of the News of gas science]. 2013, no. 2(13), pp. 100-106. (in Russian)

Bobrova D.A., Kazakova E.N., Rybalchenko S.V., Kashdan A.I. Vliyanie antropogennoj deyatel'nosti na opasnye sklonovyh ekzogennye processy (na primere ostrova Sahalin, Rossiya) [The influence of anthropogenic activity on dangerous slope exogenous processes (on the example of Sakhalin Island, Russia)]. *Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya* [The hydrosphere. Dangerous processes and phenomena], 2022, vol. 4, no. 4, pp. 327-345. <https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.4.327>. (in Russian)

Borodavkin P.P. *Podzemnye magistralnye truboprovody (proektirovanie i stroitelstvo)* [Underground main pipelines (design and construction)]. Moscow, Nedra, 1982, 384 p. (in Russian)

Gael A.G., Smirnova L.F. *Peski i peschanye pochvy* [Sands and sandy soils]. Moscow, Nauka Publ., 1999, 460 p. (in Russian)

Gorohov A.N., Fedorov A.N. Sovremennye tendencii izmeneniya klimata v Yakutii [Current trends in climate change in Yakutia]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2018, no. 2, pp. 111-119. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2\(111-119\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(111-119)). (in Russian)

Gospodinov G.V. *Deshifirovanie aerosnimkov* [Decryption of aerial photographs]. Moscow, MSU Publ., 1961, 188 p. (in Russian)

Gubarkov A.A. Ekzogennye geologicheskie processy v zone proektiruемого gazoprovoda Bovanenkovo – Uhta na poluostrove Yamal [Exogenous geological processes in the area of the projected Bovanenkovo- Ukhta gas pipeline on the Yamal Peninsula]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Neft i gaz* [News of higher educational institutions. Oil and gas], 2011, no. 4 (88), pp. 30-35. (in Russian)

Ivakin A.V. Nefteprovod “Vostochnaya Sibir – Tihij okean” (VSTO) – unikalnyj ob"ekt truboprovodnogo transporta nefi [The Eastern Siberia – Pacific Ocean (ESPO) oil pipeline is a unique oil pipeline transportation facility]. *Territoriya Neftegaz* [The territory of Neftegaz], 2007, no. 5, pp. 52-57. (in Russian)

Marahtanov V.P. Vozdejstvie opasnyh inzhenerno-geologicheskikh processov na gazoprovody v oblasti kriolitozony Zapadnoj Sibiri [The impact of hazardous engineering and geological processes on gas pipelines in the cryolithozone region of Western Siberia]. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2019, no. 9-2(34), pp. 25-33. (in Russian)

Melezh A.A. Primenenie kosmoaeromaterialov dlya vyavleniya uchastkov magistralnyh truboprovodov, podverzhennyh opasnym inzhenerno-geologicheskim processam [The use of cosmo aero materials to identify sections of main pipelines subject to dangerous engineering and geological processes]. *Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, parvo* [Information technologies and systems: management, economics, transport, law], 2013, no. 2-1 (11), pp. 127-129. (in Russian)

Gubarkov A.A., Aleshin G.A., Idrisov I.R., Kirillov A.V. Monitoring ekzogennyh geologicheskikh processov na magistralnom gazoprovode “Zapolyarnoe – Novyj-Urengoj” [Monitoring of exogenous geological processes on the Zapolyarnoye – Novy-Urengoy main gas pipeline]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Neft i gaz* [News of higher educational institutions. Oil and gas], 2011, no. 3(87), pp. 7-13. (in Russian)

Sinickij A.I. Ekologo-geokriologicheskoe obsledovanie magistralnogo gazoprovoda “Bovanenkovo-Uhta” na Yamalskom poluostrove [Ecological and geocryological survey of the Bovanenkovo-Ukhta main gas pipeline on the Yamal Peninsula]. *Nauchnyj vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug], 2016, no. 2(91), pp. 9-21. (in Russian)

Parsi M., Najmi K., Najafifard F. et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, vol. 21, pp. 850-873.

Andrew O. Apan A., Paudyal D.R., Perera K. Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Approach for Automatic Flood Mapping Using NovaSAR-1 and Sentinel-1 Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2023, vol. 12, no. 5, pp. 194.

Denizman C., Parrish E. Assessment of a pipeline route in a karst terrain, Florida, USA. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 2017, vol. 6, no. 3.

Makarycheva E.M., Surikov V.I., Kuznetsov T.I., Dolgopolov D.V. Geotechnical Monitoring Of Pipelines Located In Difficult Climatic Conditions. *13 Pipeline Technology Conference*. Berlin, 2018, pp. 14-20.

Lebedeva E.V., Kazakov N.A., Ershov V.V. Endogenic and Exogenic Hazardous Relief-Forming Processes on Sakhalin Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021, vol. 666, no. 4, pp. 042050.

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, no. 1.

Aljameel S.S., Alabbad D.A., Alomari D. et al. Oil and Gas Pipelines Leakage Detection Approaches: A Systematic Review of Literature. *International Journal of Safety & Security Engineering*, 2024, vol. 14, no. 3.

Shatz M.M., Cherepanova A.M. Modern permafrost dynamics in environmental management in the North of Siberia. *Climate & Nature*, 2019, no. 1(6), pp. 25-39.

Struchkova G., Kapitonova T., Efremov P. Geotechnical monitoring of pipeline systems operating under conditions of permafrost (Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 666, no. 3. pp. 032088.

Сведения об авторах

Жаркова Владислава Владимировна
аспирант, кафедра геоэкологии
Российский государственный университет
нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский
просп., 65
e-mail: zharkova.v@gubkin.ru

Сизов Олег Сергеевич
кандидат географических наук, доцент
кафедры геоэкологии
Российский государственный университет
нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский
просп., 65
e-mail: kabanin@yandex.ru

Information about the authors

Zharkova Vladislava Vladimirovna
Postgraduate, Department of Geoecology
Gubkin University
65, Leninsky ave., Moscow, 119991,
Russian Federation
e-mail: zharkova.v@gubkin.ru

Sizov Oleg Sergeevich
Candidate of Sciences (Geography), Associate
Professor of the Department of Geoecology
Gubkin University
65, Leninsky ave., Moscow, 119991,
Russian Federation
e-mail: kabanin@yandex.ru

Код научной специальности: **1.6.21, 1.6.14**

Статья поступила в редакцию **21.11.2024**; одобрена после рецензирования **17.02.2025**; принята к публикации **11.03.2025**

The article was submitted **November, 21, 2024**; approved after reviewing **February, 17, 2025**; accepted for publication **March, 11, 2025**