

Методы и методология мониторинга линейных объектов в криолитозоне

Владислав Евгеньевич Пушкарев^{1,2}✉,
Кирилл Александрович Плесовских^{1,2},
Александр Александрович Лебедев²,
Александр Анатольевич Вакулин¹

¹ Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия;

² Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия;

Контакт для переписки: vladpuskr@mail.ru✉

Аннотация. На линейных объектах, расположенных в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, актуальным вопросом является разработка комплексного подхода к прогнозированию изменения технического состояния инженерных сооружений под влиянием опасных геокриологических экзогенных процессов. Развитие деформаций грунтового массива в основании инженерных сооружений может привести к переходу конструкций в ограниченно работоспособное или аварийное состояние, а также к полной или частичной потере несущей способности вплоть до разрушения. Для того чтобы избежать перечисленных последствий, необходимо выявить основные причины деформаций автомобильной дороги и разработать пути их устранения и недопущения возникновения. В настоящей статье представлены методы и методология, а также результаты мониторинговых работ на автомобильной дороге «Сургут – Салехард, участок Надым – Салехард», включающие в себя исследования водно-теплового режима земляного полотна, электротомографию грунтов основания и снегомерную съемку. На основе анализа результатов мониторинга разработаны дальнейшие планы по реализации и определению эффективности будущих конструктивных решений.

Ключевые слова: автомобильные дороги, многолетнемерзлые грунты, мониторинг, температура, грунты, водно-тепловой режим, электроразведка

Вклад авторов: Пушкарев В. Е. и Плесовских К. А. — сбор и обработка материала, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы (авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации); Лебедев А. А. и Вакулин А. А. — рецензирование, научное руководство.

Цитирование: Пушкарев В. Е., Плесовских К. А., Лебедев А. А., Вакулин А. А. 2025. Методы и методология мониторинга линейных объектов в криолитозоне // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 11. № 3 (43). С. 18–39. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-3-18-39>

Поступила 27.05.2025; одобрена 04.07.2025; принята 07.07.2025

Monitoring methods and methodology of linear objects in the cryolithozone

Vladislav E. Pushkarev^{1,2}✉, Kirill A. Plesovskikh^{1,2},
Alexander A. Lebedev², Alexander A. Vakulin¹

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Arctic Research Center, Salekhard, Russia

Corresponding author: vladpuskr@mail.ru✉

Abstract. At linear objects located in conditions of permafrost soil distribution, the development of a comprehensive approach to forecasting changes in the technical condition of engineering structures under the influence of hazardous geocryological exogenous processes is a pressing issue. The development of soil deformations at the base of engineering structures can lead to the transition of structures to a limited operational or emergency state, as well as to a complete or partial loss of bearing capacity up to destruction. In order to avoid the listed consequences, it is necessary to identify the main causes of road deformations and develop ways to eliminate them and prevent their occurrence. This article presents the methods and methodology, as well as the results of monitoring work on the Surgut – Salekhard, Nadym – Salekhard section road, including: studies of the water-thermal regime of the roadbed, electrical resistivity tomography of the foundation soils and snow survey. Based on the analysis of the monitoring results, further plans for the implementation and determination of the effectiveness of future design solutions have been developed.

Keywords: highways, permafrost soils, monitoring, temperature, soils, water-thermal regime, electrical exploration

Contribution of the authors: Vladislav E. Pushkarev and Kirill A. Plesovskikh — collection and processing of material, methodology development, writing the draft, final conclusions (the authors contributed equally to this article); Alexander A. Lebedev and Aleksander A. Vakulin — reviewing; scientific supervision.

Citation: Pushkarev, V. E., Plesovskikh, K. A., Lebedev, A. A., & Vakulin, A. A. (2025). Monitoring methods and methodology of linear objects in the cryolithozone. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 11(3), 18–39. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-3-18-39>

Received May 27, 2025; Reviewed Jul. 4, 2025; Accepted Jul. 7, 2025

Введение

Проблема обеспечения устойчивости земляного полотна на оттаивающем основании является актуальной как при проектировании линейных объектов транспортной инфраструктуры, так и для уже эксплуатируемых линейных объектов на многолетнемерзлых грунтах (далее — ММГ) в условиях меняющегося климата. Следовательно, точное выявление причин образования деформаций и разрушений в сложных природно-климатических условиях является первоочередной задачей [Вавринюк, Федоренко, 2015, с. 48–57].

Основания сооружений, представленные грунтами криогенной структуры с содержанием ледяных включений¹, при оттаивании просаживаются. В дальнейшем происходят растянутые во времени реологические процессы, при которых глинистые грунты переходят в текучее состояние [Дыдышко, 2012, с. 31–34]. Фильтрация грунтовых вод в основании земляного полотна, которая усиливается при протаивании, приводит к дополнительному ухудшению физико-механических свойств грунтов путем повышения влажности [Ашпиз, 2012, с. 18–21]. Описанные выше процессы провоцируют ненормативные деформации земляного полотна, которые напрямую влияют на состояние линейных объектов. Подобные случаи были рассмотрены в работах [Дроздов, Шабуров, 2015, с. 33–45; Исаков, Устьян, 2021, с. 177–180; Сыромятников и др., 2024, с. 5–13; Литовко, 2021, с. 9–15].

В последние годы такая ситуация со значительными деформациями наблюдается в том числе и на автомобильной дороге Надым – Салехард, что уже привело к снижению эксплуатационных характеристик дороги и увеличению расходов на содержание и ремонт. Поэтому участки данной автодороги были приняты к исследованию, **целью** которого является повышение эксплуатационной надежности участков автомобильной дороги «Надым – Салехард», в основании которых залегают деградирующие мерзлые грунты, за счет учета водно-теплового режима (далее — ВТР) при создании эффективных конструктивных решений.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Поиск актуальных разработок и методик мониторинга за состоянием грунтов автомобильных дорог, построенных на слабых и мерзлых грунтах.
2. Разработка и внедрение системы мониторинга за температурно-влажностным состоянием грунтов земляного полотна и полосы отвода.

¹ ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2020. 11 с.

3. Выявление причин многолетних деформаций дороги «Сургут – Салехард, участок Надым – Салехард» на основе результатов анализа годового цикла мониторинга и фактических инженерно-геологических условий.
4. Разработка механизмов оценки теплотехнической эффективности конструктивных решений.

Объект исследования

Участок «Надым – Салехард», автомобильной дороги «Сургут – Салехард», был официально введен в эксплуатацию в декабре 2020 г. Однако весной 2021 г. дорога была закрыта после образования большого количества ненормативных деформаций и разрушений, которые устраняются и по настоящее время. На данный момент автомобильная дорога полностью открыта для проезда транспортных средств, при этом порядка 100 км между Надымом и Салехардом не имеют твердого покрытия.

Автомобильная дорога пересекает территории с различными геолого-тектоническими, геоморфологическими и ландшафтно-климатическими условиями, что предопределяет сложность и значительную неоднородность инженерно-геокриологических условий трассы, осложняющих эксплуатацию стратегически важного для округа объекта.

Эксплуатация автомобильной дороги показывает, что основной научно-технической проблемой строительства и эксплуатации дорог в регионе в условиях распространения слабых и многолетнемерзлых грунтов было и остаётся обеспечение стабильности и устойчивости земляного полотна и искусственных сооружений. Разрушения происходят из-за воздействия природных криогенных и инженерно-геокриологических процессов и явлений, связанных со значительным изменением климата.

В связи с потребностью Ямало-Ненецкого автономного округа, на участке «Надым – Салехард, км 1000 – км 1060» с 2022 г. проводится научно-исследовательская работа по определению причин образования деформаций и разрушений.

Из-за достаточной протяженности дороги было принято решение исследовать отдельные самостоятельные участки. В данной статье авторы рассматривают 1 участок мониторинга: участок км 1004+674 – км 1004+774.

Мониторинг водно-теплового режима грунтового массива

В первую очередь был разработан алгоритм (последовательность) работы для выбора объектов исследования, методов мониторинга и обработки его результатов (см. рис. 1).

Программа мониторинга была составлена с учетом необходимости изучения ВТР земляного полотна, который напрямую влияет на эксплуатационное состояние автомобильной дороги. Таким образом, указанные методы геотехнического обследования и мониторинга были выбраны для того, чтобы определить причины образования деформаций земляного полотна.

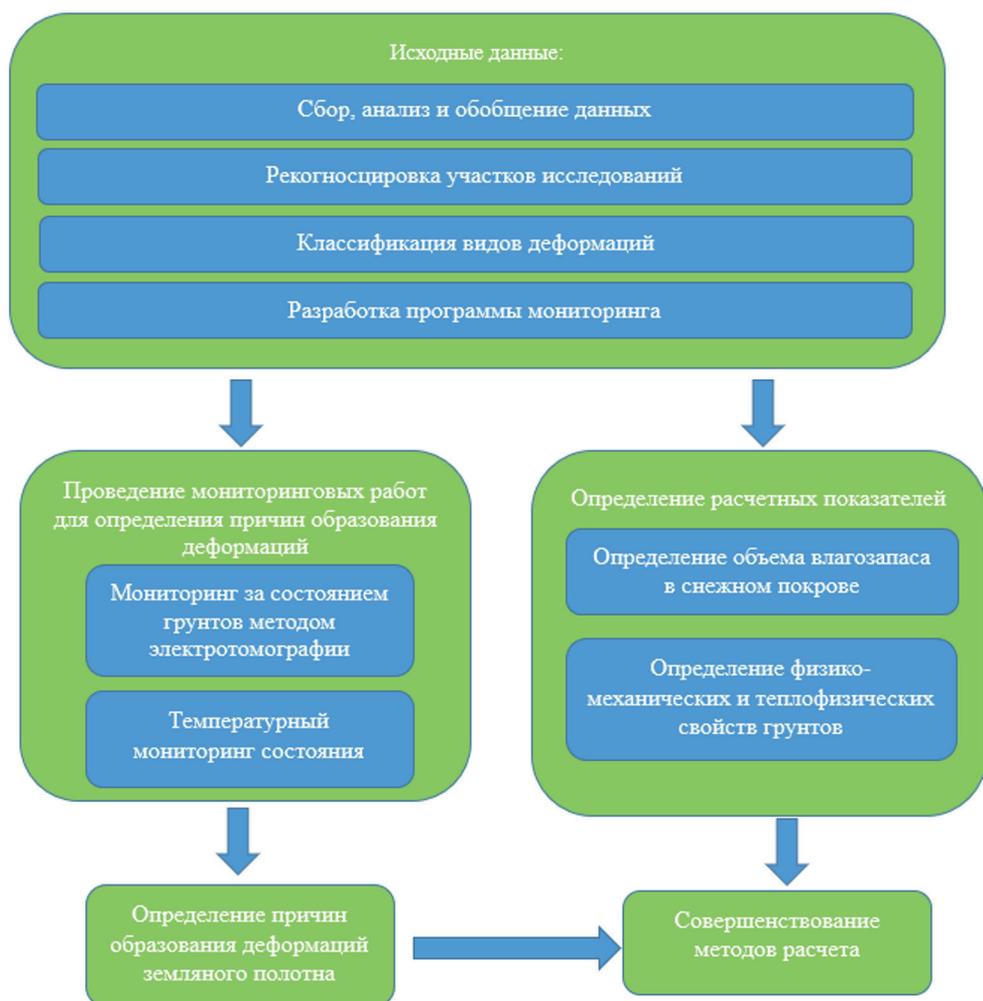


Рис. 1. Схема проведения работ

Fig. 1. Scheme of work

Сбор данных мониторинга ВТР земляного полотна и полосы отвода необходим для сравнения фактических условий в земляном полотне и расчетной модели для разработки устойчивых конструкций и мероприятий по их защите. В дальнейшем полученные данные помогут производить оценку возможной потери устойчивости земляного полотна и его элементов, а также обосновывать эффективные стабилизирующие конструктивные решения с соответствующими расчетами и прогнозами.

После поиска и анализа систем мониторинга ВТР [Трофимов и др., 2021, с. 95–97; Niu et al., 2015] была разработана схема обустройства системы мониторинга применительно к участку на км 1004+674 – км 1004+774, представленная на рис. 2.

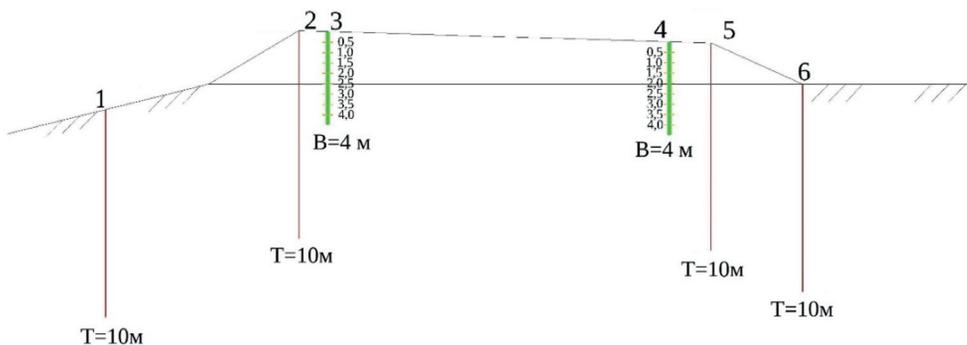


Рис. 2. Схема устройства системы мониторинга водно-теплового режима на участке км 1004+674 – км 1004+774, где Т — термометрическая скважина, глубиной 10 м; В — скважина с датчиками влажности, установленными с шагом 0,5 м, глубиной 4 м

Fig. 1. Scheme of the water-thermal regime monitoring system in the section “km 1004+674 – km 1004+774”, where T — thermometric borehole, 10 m deep; B — borehole with humidity sensors installed in 0.5 m increments, 4 m deep

Применяемое оборудование

В качестве оборудования при мониторинге температурного режима земляного полотна через термометрические скважины в комплексе используются:

- измеритель температуры многозонный версия 2 (ИТМ2) (термометрическая коса);
- логгер стационарный РГТ-ЛС (ЛС).

Мониторинг влажностного режима земляного полотна участков автомобильной дороги выполняется с применением следующего оборудования:

- датчики влажности и температуры почвы «СОКОЛ-ДВП» (Россия);
- беспроводной модуль выносных датчиков «СОКОЛ-БМВД» (Россия);
- станция автоматическая метеорологическая «СОКОЛ-М1» (Россия).

Обустройство системы температурно-влажностного мониторинга проводилось с ноября 2023 по октябрь 2024 г.

Построение температурных распределений по данным мониторинга

Известно, что температурные и влажностные данные позволяют выявить изменения показателей по наглядным изолиниям определенных значений [Сыромятников и др., 2023, 138–139]. Для этого были построены температурные распределения методом линейной интерполяции в программном комплексе Surfer. Предварительно обработанные значения показателей температур по скважинам усреднялись понедельно для более

эффективного отслеживания изменений колебаний в грунте. Также для отображения фактического рельефа поперечного профиля были заранее сняты высотные отметки устьев скважин при помощи GNSS-приемников.

Анализ мониторинга водно-теплового режима

На данном участке система мониторинга ВТР начала функционировать в апреле 2024 г. Температурные распределения построены за период 01.04.2024 – 30.06.2024.

На период 01.04.2024 – 07.04.2024 земляное полотно находится в мерзлом состоянии, как и грунты основания (рис. 3).

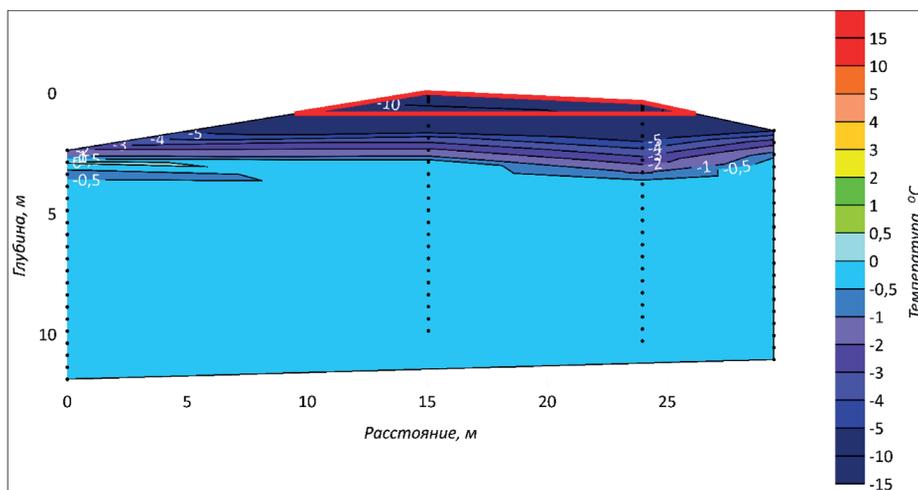


Рис. 3. Температурное распределение за период 01.04.2024 – 07.04.2024, где красной сплошной линией обозначен контур земляного полотна

Fig. 3. Temperature distribution for the period 04/01/2024 – 04/07/2024, where a solid red line marks the contour of the roadbed

В период с 13.05.2024 по 19.05.2024 температура насыпи стабильно повышается, плавно достигая отметки в 0°C (см. рис. 4).

С 13.05.2024 на правой полосе автомобильной дороги по ходу километров наблюдаем положительные температуры.

В период с 03.06.2024 по 09.06.2024 четко выражено ядро под насыпью с температурами от -1 до $-0,5^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 5).

В соответствии с результатами лабораторных анализов проб грунтов, температура перехода грунта в твердомерзлое состояние на данном участке составляет $-1,0^{\circ}\text{C}$. Исходя из этого, все грунты основания земляного полотна на данном участке находятся в пластичномерзлом состоянии. Помимо этого, грунты обладают высокими значениями показателя суммарной влажности в диапазоне от 0,2 до 0,5 д.е. Кроме того, согласно показателям температур (см. рис. 6) насыпь автомобильной дороги полностью оттаивает в летний период, а положительные температуры наблюдаются вплоть до естественных

подстилающих слоев, образуя «ледяную» поверхность скольжения внутри массива глинистого основания.

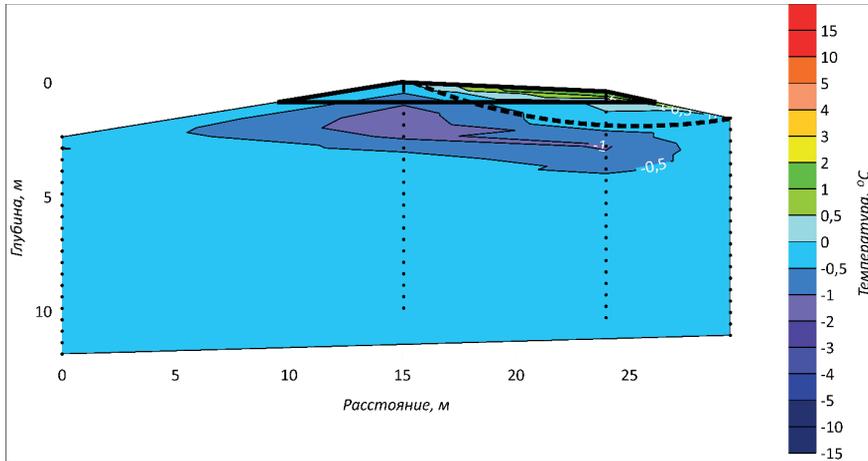


Рис. 4. Температурное распределение за период 13.05.2024 – 19.05.2024, где черной сплошной линией обозначен контур земляного полотна; черной пунктирной линией обозначена поверхность скольжения земляного полотна

Fig. 4. Temperature distribution for the period 05/13/2024 – 05/19/2024, where a solid black line indicates the contour of the roadbed; a black dotted line indicates the sliding surface of the roadbed

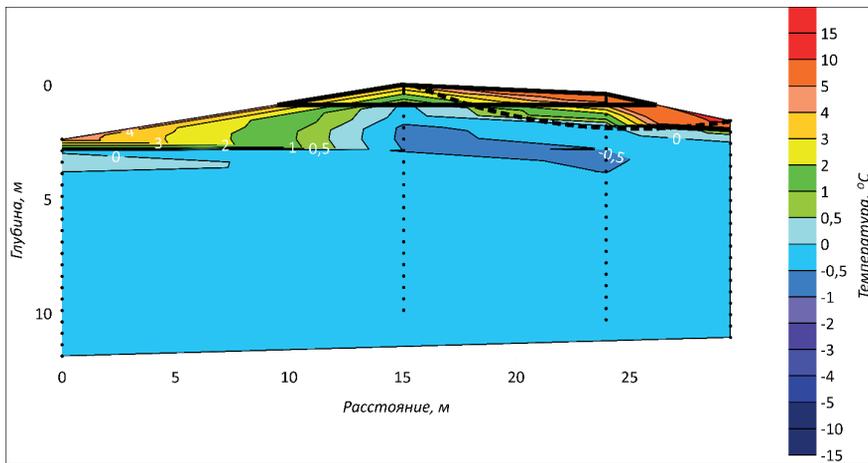


Рис. 5. Температурное распределение за период 03.06.2024 – 09.06.2024, где черной сплошной линией обозначен контур земляного полотна; черной пунктирной линией обозначена поверхность скольжения земляного полотна

Fig. 5. Temperature distribution for the period 06/03/2024 – 06/09/2024, where a solid black line indicates the contour of the roadbed; a black dotted line indicates the sliding surface of the roadbed

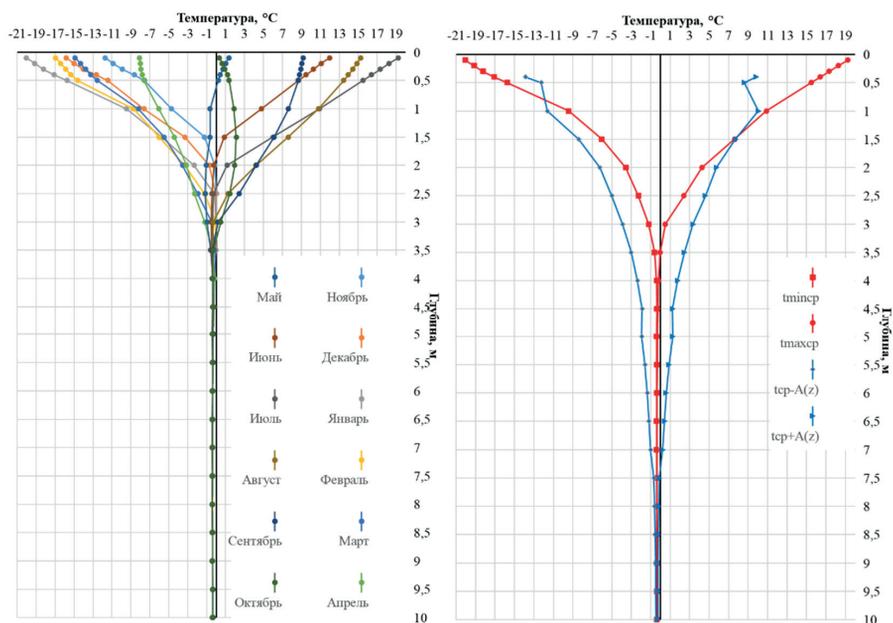


Рис. 6. Слева — график распределения температур грунтов земляного полотна и естественного основания автомобильной дороги на км 1004, скв 5; справа — график характера затухания температурных колебаний в породах с глубиной

Fig. 6. Left — a graph of the temperature distribution of the soil of the roadbed and the natural base of the highway at km 1004, well 5; right — a graph of the nature of the attenuation of temperature fluctuations in rocks with depth

Примечание: t_{mincp} — фактическая кривая, ограничивающая минимальные значения колебаний температуры грунта;
 t_{maxcp} — фактическая кривая, ограничивающая максимальные значения колебаний температуры грунта;
 t_{cp-A_z} — расчетная кривая, ограничивающая минимальные значения колебаний температуры грунта;
 t_{cp+A_z} — расчетная кривая, ограничивающая максимальные значения колебаний температуры грунта.

Note: t_{mincp} — the actual curve limiting the minimum values of ground temperature fluctuations;
 t_{maxcp} — the actual curve limiting the maximum values of ground temperature fluctuations;
 t_{cp-A_z} — the calculated curve limiting the minimum values of fluctuations in ground temperature;
 t_{cp+A_z} — the calculated curve limiting the maximum values of fluctuations in ground temperature.

Согласно первому закону Фурье (1), являющимся основополагающим для процесса распространения температурных волн в горных породах [Вакулин, 2021; Ершов, 2004], можно расчетным путем определить скорость затухания температурных колебаний в зависимости от глубины и свойств среды.

$$A(z) = A_0 e^{-z \sqrt{\frac{\pi C_{об}}{\lambda T}}}, \quad (1)$$

где z — мощность слоя, на поверхности которого амплитуда колебаний равна A_n , а на его подошве A_z ; A_0 — амплитуда колебаний температуры на поверхности почвы; $C_{об}$ — объемная теплоемкость грунтов; λ — коэффициент теплопроводности грунтов; T — период колебаний температуры ($T = 8760$ ч).

Другими словами, решение задачи Фурье в однородной среде показывает, что все возможные изменения температуры по глубине должны находиться в пределах от $t_{ср}^0 - A$ до $t_{ср}^0 + A$.

Данные, полученные расчетным методом, рассчитаны с глубины 0,4 м, так как для расчета не была учтена конструкция дорожной одежды ввиду техногенного характера. При анализе полученных расчетных и фактических кривых, ограничивающих на каждой конкретной глубине максимальные и минимальные значения колебаний температуры грунта, можно выявить, что расчетные значения стремятся к нулевой амплитуде на более глубоких горизонтах, в сравнении с фактическими данными. Одной из причин может служить конструкция автомобильной дороги. Насыпь земляного полотна подвержена тепловому воздействию при промерзании грунтового массива не только с поверхности земли, но и с горизонтальных направлений (откосов насыпи), что не учтено при расчете. Соответственно, данная формула неприменима при определении скорости затухания температурных колебаний в грунтовых насыпях автомобильных дорог.

Геофизический мониторинг

Мониторинг также производился при помощи геофизических методов, а именно электротомографии (далее — ЭТ). Применимость методов электроразведки для изучения состояния грунтов под линейными объектами широко изучается на протяжении 10–15 лет [Шестаков, Федорова, 2022, с. 51–66; Lalomov, Fertoing, 2017; Шувалов, 2011, с. 46–60]. Данная методика поперечных измерений применима преимущественно для дорог районов криолитозоны с малой интенсивностью.

ЭТ (метод сопротивлений) выполнялась многоэлектродной электроразведочной станцией «СКАЛА 64К15», ее основной целью было выявление наличия многолетне-мерзлых пород и определение кровли мерзлоты с динамикой изменения в течение года.

Методика геофизического мониторинга

Работы выполнялись в весенне-летне-осенний период (в поперечных направлениях, относительно автомобильной дороги) в связи с необходимостью заземления электродов в исследуемые грунты. На покрытии автомобильной дороги заземление проводили с помощью влажной ветоши, смоченной солевым раствором. Последовательность подключения электродов соответствовала установкам Шлюмберже и дипольно-осевой. Это выполнялось для верификации результатов, поскольку геоэлектрические модели, полученные разными типами установок, могут отличаться в деталях, но должны отражать общие закономерности. Дипольно-осевая установка характеризуется низким уровнем сигнала, хорошей чувствитель-

ностью к вертикальным границам, средней чувствительностью к горизонтальным границам и средним горизонтальным покрытием. Установка Шлюмберже обладает одинаковой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам и средним горизонтальным покрытием, но глубинность измерений значительно меньше, чем у дипольно-осевой установки [Шейн и др., 2018]. Межэлектродное расстояние составляло 3,5 м. Такой метраж был выбран в связи с необходимостью пропуска крупногабаритных транспортных средств. Обработка данных выполнялась с помощью программ Xeris и Res2Dinv.

Анализ результатов геофизического мониторинга

По анализу полученных геоэлектрических разрезов на профиле км 1004 в различные периоды года можно обнаружить, что в основании автомобильной дороги расположены ММГ на глубине с 4 м (рис. 7, 8). В придорожной полосе наблюдаются зоны пониженных удельных электрических сопротивлений (УЭС), которые позволяют судить о наличии таликов или грунтов в переувлажненном состоянии. В нашем случае зона с малыми сопротивлениями (по левой стороне движения в сторону г. Надым) отнесена к болоту (рис. 7, 8), и ее мощность составляет до 15 м.

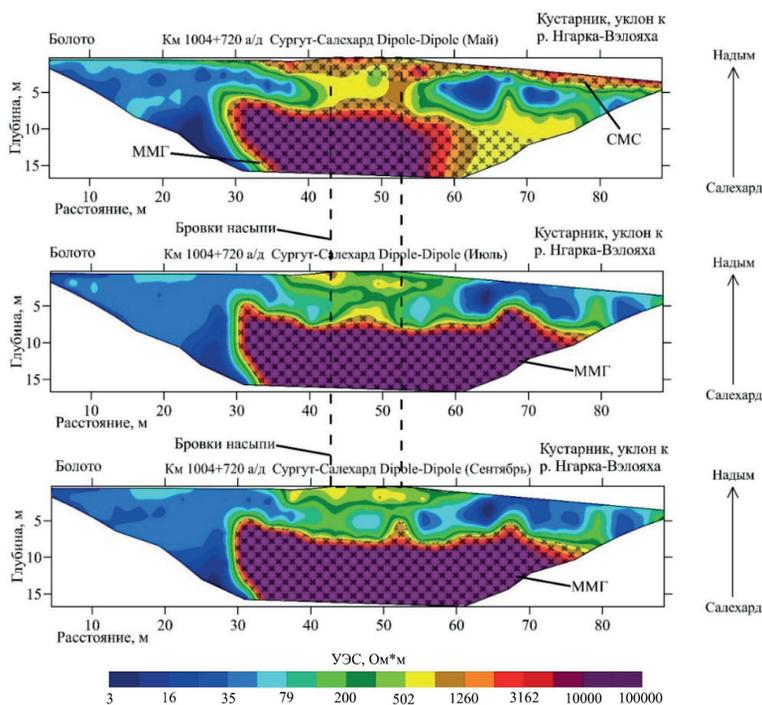


Рис. 7. Поперечный профиль удельных электрических сопротивлений на участке км 1004 в различные периоды года (май, июль, сентябрь). Установка дипольно-осевая

Fig. 7. The transverse profile of electrical resistivity on the km 1004 site in different periods of the year (May, July, September). The installation is dipole-axial

 — многолетнемерзлый грунт (ММГ) / сезонно-мерзлый слой (СМС)

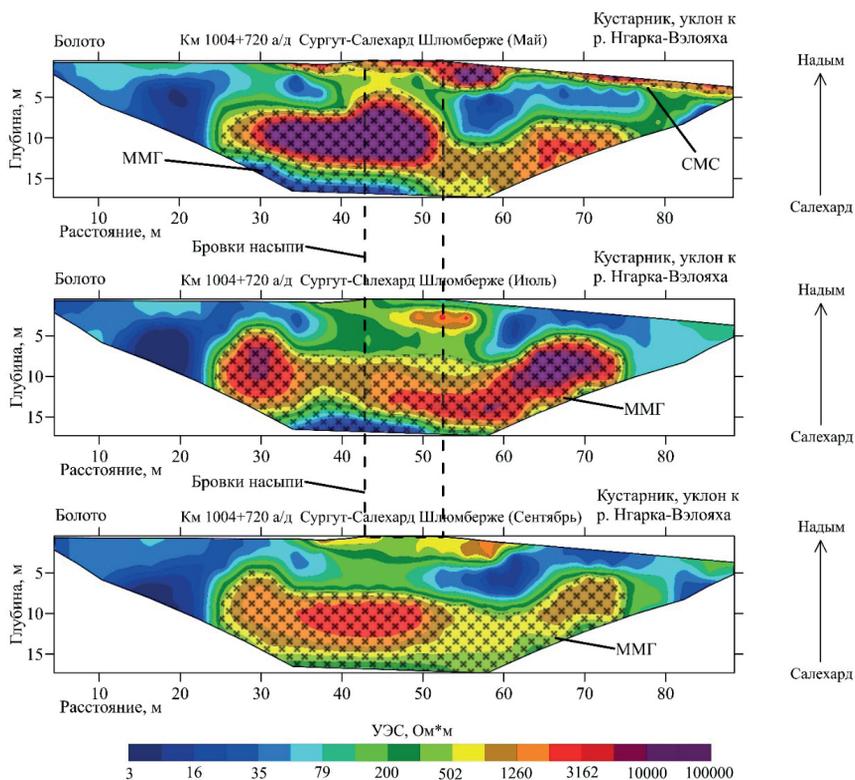


Рис. 8. Поперечный профиль удельных электрических сопротивлений на участке км 1004 в различные периоды года (май, июль, сентябрь). Установка Шлюмберже

Fig. 8. The transverse profile of electrical resistivity on the km 1004 site in different periods of the year (May, July, September). Installation of Schlumberger

— многолетнемерзлый грунт (ММГ) / сезонно-мерзлый слой (СМС)

При сравнении геоэлектрических разрезов по установкам Шлюмберже и дипольно-осевой мы видим повторяемость в результатах измерений, что говорит о верифицированности результатов.

Следует отметить, что на данном участке при выполнении инженерно-геологических изысканий для проектирования ММГ скважинами до 8 м не вскрыты (см. рис. 9).

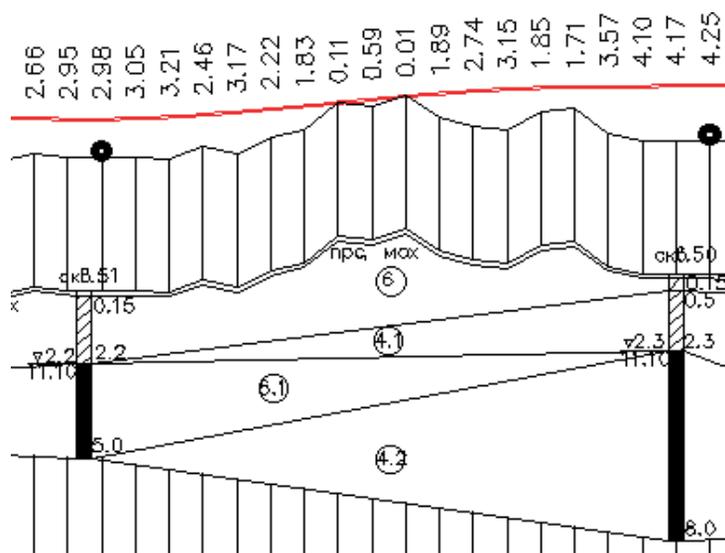


Рис. 9. Фрагмент продольного профиля на участке км 1004+674 – км 1004+774

Fig. 9. A fragment of the longitudinal profile in the section km 1004+674 – km 1004+774

Примечание: 4.1 — супесь пластичная с примесью органических веществ до 10%;

4.2 — супесь текучая с примесью органических веществ до 10%;

6.0 — песок мелкий средней степени водонасыщения, средней плотности;

6.1 — песок мелкий водонасыщенный водой, средней плотности с примесью органических веществ до 10%.

Note: 4.1 — sandy loam is plastic with an admixture of organic substances up to 10%;

4.2 — sandy loam is fluid with an admixture of organic substances up to 10%;

6.0 — fine sand of medium degree of water saturation, medium density;

6.1 — fine water-saturated sand of medium density with an admixture of organic substances up to 10%.

Снегомерная съемка

По результатам анализа данных за температурным и влажностным режимом грунтового массива, геофизических исследований, отчетов обследований научно-производственных организаций выявлено значительное влияние снежного покрова на состояние грунтов под откосными частями [Пушкарев и др., 2023, с. 19–31].

Исследования влияния снега на температурное поле мерзлого грунта имеет большое значение для мониторинга линейных объектов. Снежный покров служит хорошим теплоизолятором. Суточные колебания температуры затухают на глубине 30–40 см (у старого снега — на глубине 50 см). При таянии снегового покрова колебания температуры происходят только до глубины слоя пропитывания снега водой [Кузьмин, 1960, с. 162–168]. Помимо этого, снежный покров, обладая высоким альбедо, существенно снижает поступление коротковолновой радиации к поверхности земли.

Для определения мощности снегового покрова в марте 2024 г. была проведена воздушная лазерная съемка (ВЛС) с использованием беспилотного летательного аппарата.

По результатам обработки была разработана карта распределений снежного покрова (рис. 10).

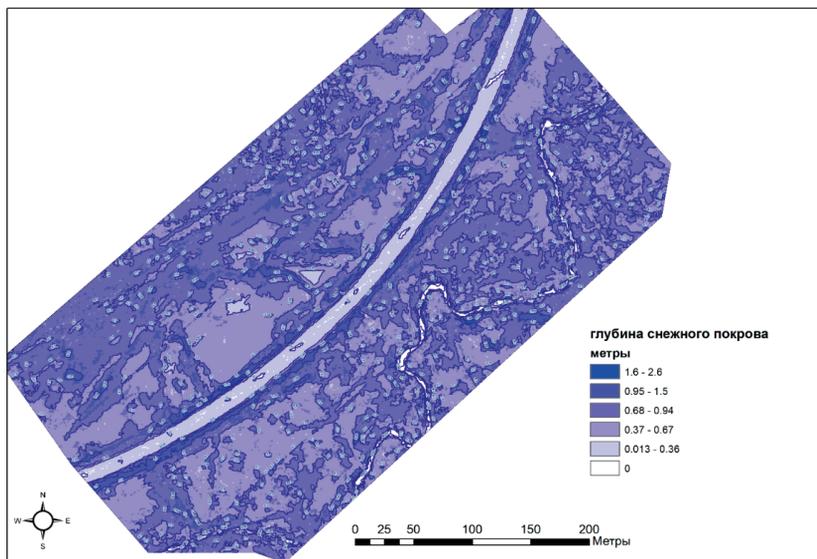


Рис. 10. Карта распределений снежного покрова на автомобильной дороге «Сургут – Салехард, участок Надым – Салехард км 1004» на конец зимнего периода 2024 г.

Fig. 10. Map of snow cover distribution on the highway “Surgut–Salekhard, Nadym – Salekhard km 1004 section” at the end of the winter period in 2024

Данный участок относится к подзоне северной тайги таежной зоны и находится в лесополосе, что способствует более интенсивному снегонакоплению.

По карте видно, что в среднем в естественных условиях толщина снега варьируется в диапазоне значений 0,5–1,0 м, однако вдоль дороги на откосной части и подошве земляного полотна толщина достигает максимальной отметки в 2,6 м, а в среднем варьируется около 1,5 м, что подтверждается выполненными инструментальными измерениями при помощи весового снегомера ВС-43 [Быков, Попов, 2011].

Таблица 1. Замеры снежного покрова в 2024 г.

Table 1. Snow cover measurements in 2024

	Направление*	Расстояние от оси, м								
		10	15	20	25	30	35	40	45	50
Высота снежного покрова, см	Пр.	150	85	97	84	82	95	105	94	82
	Лев.	140	113	103	83	97	80	110	103	90

* Направление указано относительно движения в Надым

* The direction is indicated relative to the movement towards Nadym

Результаты мониторинговых работ

По результатам выполненных работ можно сказать, что при исследовании автомобильных дорог в условиях криолитозоны для выявления таликовых зон и ММГ геофизическая электроразведка методом сопротивлений подтвердила свою применимость, поскольку она хорошо сопоставима с фактическими результатами инженерно-геологического обследования и полученными температурными распределениями.

По предварительным данным мониторинга ВТР выявлены следующие закономерности:

- полное промерзание насыпи в зимний период и ее протаивание в весенне-летний период;
- среднее значение суммарной влажности проб грунтов с горизонтов до 2,2 м составляет 0,05 д.е., а значения с более нижних горизонтов составляют от 0,21 д.е. и более [Лялюшко, Емельянович, 2018, с. 5–16];
- основной зоной оттаивания является откосная часть; данное положение подтверждено также при помощи теплотехнического моделирования в работах [Шестаков, Федорова, 2022, с. 51–66; Краев, Шанхоев, 2019; Гребенец, Исаков, 2016, с. 69–77].

По результатам снегомерной съемки (см. рис. 10) выявлено значительное количество снега, расположенного на откосных частях земляного полотна, что в весенний период является причиной интенсивной влагоотдачи, а на протяжении зимнего периода является тепловым барьером со средним показателем теплопроводности 0,32 Вт/(м*К) [Пушкарев и др., 2023, с. 19–31].

Таким образом, сформулированы основные причины деформаций земляного полотна на данном участке:

- потеря устойчивости правого откоса по ходу километров насыпи при деградации ММГ;
- «сползание» земляного полотна при сезонном оттаивании и деградации подстилающих глинистых грунтов земляного полотна по поверхности скольжения.

Согласно работе И. А. Золотаря, Н. А. Пузакова и В. М. Сиденко, степень уплотнения земляного полотна при строительстве оказывает решающее влияние на колебания влажности грунта [Золотарь и др., 1971]. Однако повышение влажности земляного полотна из-за влияния суровых природно-климатических условий существенно влияет на разуплотнение насыпи. Исходя из этого, схема образования деформаций земляного полотна в условиях автомобильной дороги «Салехард – Надым» выглядит следующим образом (см. рис. 11).

Следовательно, необходимо разработать такое конструктивное решение (или способ усиления), которое будет не допускать переувлажнения грунтов земляного полотна.



Рис. 11. Схема образования деформаций

Fig. 11. Scheme of deformation formation

Например, на отдельных участках автомобильной дороги «Сургут – Салехард» выполнено устройство полимерной шпунтовой стенки на откосной части¹. Расчет данной конструкции на устойчивость при совместной работе с грунтами земляного полотна был выполнен производителем методом конечных элементов, однако теплотехнические расчеты для определения границ применимости данного технического решения (способа усиления) не были выполнены. В связи с этим авторами выявлена необходимость совершенствования расчета данного конструктивного решения, обосновывающего его теплотехническую эффективность.

С учетом установленных причин возникновения деформаций был разработан алгоритм совершенствования расчета эффективности. Предварительная схема представлена на рис. 12.

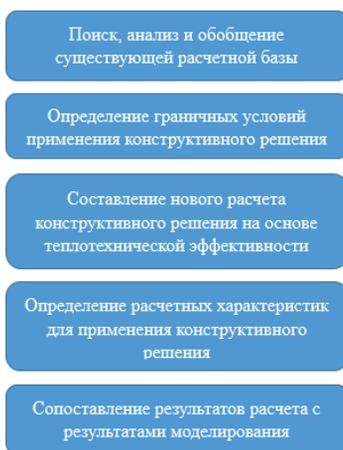


Рис. 12. Алгоритм совершенствования расчета эффективности применения конструктивного решения

Fig. 12. Algorithm for improving the calculation of the effectiveness of using a constructive solution

¹ ОДМ 218.2.092-2018. Рекомендации по применению шпунтовых свай из полимерных материалов в дорожном строительстве. Введ. 06.02.2019. М.: РОСАВТОДОР. 68 с.

Заключение

В ходе работ на автомобильной дороге «Сургут – Салехард, участок Надым – Салехард» разработана программа мониторинга за температурно-влажностным состоянием грунтов, соответствующая ОДМ 218.11.007–2023¹. Следует отметить, что программа разработана с учетом региональных особенностей и направлена на получение более детальных данных о состоянии грунтов земляного полотна. По анализу предварительных результатов мониторинга выявлены причины образования деформаций земляного полотна:

- потеря устойчивости правого откоса по ходу километров насыпи при деградации ММГ;
- «сползание» земляного полотна при сезонном оттаивании и деградации подстилающих глинистых грунтов земляного полотна по поверхности скольжения.

За время исследования удалось отметить, что метод ЭТ является хорошо соотносимым с фактическими температурными распределениями, а главное, он является предварительным «экспресс» методом оценки состояния основания земляного полотна (за счет простоты проведения работ и длительности исследований; в частности, средняя продолжительность измерений на профиле с предварительной подготовкой составляет от 2 до 4 часов). Установлена согласованность результатов данных мониторинга температур и ЭТ грунтов, следовательно интерполяционные картины распределения температур можно принимать как достоверные.

В результате проведенных исследований обнаружена недостаточность расчетной базы по определению теплотехнической эффективности и применимости конструктивных решений в условиях распространения ММГ. В связи с этим разработаны дальнейшие планы по реализации и определению эффективности будущих конструктивных решений.

Список источников

- Ашпиз Е. С. 2012. Проектирование земляного полотна железных дорог в зоне многолетне-мерзлых грунтов // Наука и транспорт. № 4. С. 18–21.
- Быков Н. И., Попов Е. С. 2011. Наблюдения за динамикой снежного покрова в ООПТ Алтае-Саянского экорегиона: метод. рук-во. Красноярск. 64 с.
- Вавринюк Т. С., Федоренко, Е. В. 2015. Совместный расчет теплового и механического взаимодействия земляного полотна с оттаивающими грунтами основания // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах: материалы симпозиума, Новосибирск, 24–26 сентября 2015 г. / под ред. А. Л. Исакова и Ц. К. Лю. Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения. С. 48–57.
- Вакулин А. А. 2011. Основы геокриологии: учебное пособие. 2-е изд. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета. 220 с.

¹ ОДМ 218.11.007–2023. Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических мониторинговых стационарных постов в полосе отвода автомобильных дорог в криолитозоне. Введ. 22.02.2023. М.: РОСАВТОДОР. 134 с.

- Гребенец В. И., Исаков В. А. 2016. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск–Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. Том 20. № 2. С. 69–77.
- Дроздов В. В., Шабуров С. С. 2015. Причины возникновения деформаций автомобильных дорог и мероприятия по снижению их интенсивности с высокотемпературным типом вечной мерзлоты в основаниях земляного полотна на примере строительства автомобильной дороги Амур «Чита – Хабаровск» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. № 2(13). С. 33–45.
- Дыдышко П. И. 2012. Стабилизация насыпей на вечной мерзлоте // Путь и путевое хозяйство. № 4. С. 31–34.
- Ершов Э. Д. (ред.) 2004. Методы геокриологических исследований: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ. 512 с.
- Золотарь И. А., Пузаков Н. А., Сиденко В. М. 1971. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. М.: Транспорт. 416 с.
- Исаков А. А., Устьян Н. А. 2021. Проблема деградации вечной мерзлоты в основании земляного полотна железных дорог и пути ее решения на базе теплотехнических расчетов // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике, Салехард, 3–12 ноября 2021 г. Салехард: [Б. и.]. С. 177–180. <https://doi.org/10.7868/9785604610848046>
- Краев А. Н., Шанхоев З. Ш. 2019. Моделирование деформированного состояния земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах // Транспортные сооружения. Том 6. № 1. С. 5. <https://doi.org/10.15862/05SATS119>.
- Кудрявцев С. А., Кажарский А. В., Швец Я. А., Медведев В. В. 2015. Исследование процессов промерзания и оттаивания земляного полотна железных дорог, реконструируемых участков второго пути Байкало-Амурской магистрали на вечномерзлых грунтах // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах: материалы симпозиума, Новосибирск, 24–26 сентября 2015 г. / под ред. А. Л. Исакова и Ц. К. Лю. Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения. С. 12–19.
- Кузьмин П. П. 1960. Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов. Ленинград: Гидрометеоиздат. С. 162–168.
- Литовко А. В. 2021. Комплексные инженерно-геокриологические исследования на автомобильной дороге «НАМ» // Вестник науки и образования Северо-Запада России. Том 7. № 4. С. 9–15.
- Лялюшко Е. С., Емельянович В. В. 2018. Анализ деформаций и назначение мероприятий по их устранению на автомобильной дороге «Амур» (на участках многолетнемерзлых грунтов) // Актуальные вопросы дорожного строительства в суровых условиях: сборник статей I Всероссийской научно-практической конференции дорожников, Чита, 6 декабря 2018 г. / отв. ред. В. В. Вишневыский. Чита: Забайкальский государственный университет. С. 5–16.
- Пушкарев В. Е., Плесовских К. А., Печкин А. С. 2023. Особенности снегонакопления вдоль автомобильной дороги Салехард – Надым // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. № 3(120). С. 19–31. <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2023.120.3.002>
- Сыромятников И. И., Литовко А. В., Кириллин А. Р. [и др.]. 2023. Геотехнический мониторинг на федеральных автомобильных дорогах в условиях Центральной Якутии // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических

- и субарктических территориях (Тэгуа-2023): сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РСФСР и ЯАССР, д.т.н., профессора Н. С. Иванова, Якутск, 6–9 декабря 2023 г. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова. С. 138–139.
- Сыромятников И. И., Литовко А. В., Кирилин А. Р. и др. 2024. Геотехнический мониторинг на федеральных автомобильных дорогах в области криолитозоны // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. № 3. С. 5–13. <https://doi.org/10.15593/24111678/2024.03.01>
- Трофимов А. Э., Чурилин В. С., Зголич И. А. 2021. Мониторинг водно-теплового режима грунтов земляного полотна автомобильной дороги с основанием из асфальтогранулобетона // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 7-ми томах, Томск, 27–30 апреля 2021 г. / под ред. И. А. Курзиной, Г. А. Вороновой. Том 6. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. С. 95–97.
- Шеин А. Н., Юдицких Е. Ю., Потапов В. В., Калганов А. С. 2018. Лабораторный практикум по электроразведке: учебное пособие. Чита: ЗабГУ. 125 с.
- Шестаков А. Ф., Федорова О. И. 2022. Изучение состояния грунтовой насыпи участка автодороги с применением кондуктивных электрических зондирований // Уральский геофизический вестник. № 4(50). С. 51–66. <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.4.6.51>
- Шувалов В. М. 2011. Комплексное применение методов геофизики на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений и коммуникаций // Вестник Пермского университета. Геология. № 4. С. 46–60.
- Lalomov D. A., Fertoing V. V. 2017. Highway state examination based on combined application of capacitive coupled electrical resistivity tomography and ground-penetrating radar // Engineering Geophysics 2017: Conference Proceedings, Kislovodsk, 24–28 April 2017. Kislovodsk: European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700423>
- Niu F. J., Liu M. H., Cheng G. D., et al. 2015. Long-term thermal regimes of the Qinghai-Tibet Railway embankments in plateau permafrost regions // Science China: Earth Sciences. Vol. 58. Pp. 1669–1676. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5063-0>

References

- Ashpiz, E. S. (2012). Design of railway subgrades in permafrost zones. *Science and Transport*, 4, 18–21. [In Russian]
- Bykov, N. I., & Popov, E. S. (2011). *Observations of the Dynamics of Snow Cover in the Protected Areas of the Altai-Sayan Ecoregion*. n.p. [In Russian]
- Vavrinyuk, T. S., & Fedorenko, E. V. (2015). Joint calculation of thermal and mechanical interaction of the subgrade with thawing foundation soils. In A. L. Isakov and C. K. Liu (Eds.), *Proceedings of the Second International Symposium on Roadbeds in Cold Regions* (September 24–26, Novosibirsk, Russia) (pp. 48–57). Siberian State University of Railway Engineering. [In Russian]

- Vakulin, A. A. (2011). *Fundamentals of Geocryology* (2nd ed.). Tyumen State University Publishing House. [In Russian]
- Grebenets, V. I., & Isakov, V. A. (2016). Deformations of roads and railways on the Norilsk–Talnakh section and methods of combating them. *Cryosphere of the Earth*, 20(2), 69–77. [In Russian]
- Drozdov, V. V., & Shaburov, S. S. (2015). Causes of deformations of highways and measures to reduce their intensity with high-temperature permafrost type in the subgrade foundations using the example of the construction of the Amur “Chita – Khabarovsk” highway. *Investment, Construction, and Real Estate Studies*, 2(13), 33–45. [In Russian]
- Dydyshko, P. I. (2012). Stabilization of embankments on permafrost. *Track and Track Facilities*, 4, 31–34. [In Russian]
- Ershov, E. D. (Ed.). (2004). *Methods of Geocryological Research*. Moscow State University Publishing House. [In Russian]
- Zolotar, I. A., Puzakov, N. A., & Sidenko, V. M. (1971). *Water-Heat Regime of Subgrades and Road Coatings*. Transport Publishing House. [In Russian]
- Isakov, A. L., & Ustyan, N. A. (2021). The problem of permafrost degradation in the base of the subgrade of railways and ways to solve it based on heat engineering calculations. In *Modern Studies of the Transformation of the Cryosphere and Issues of Geotechnical Safety of Structures in the Arctic*, (November 3–12, Salekhard, Russia) (pp. 177–180). n.p. <https://doi.org/10.7868/9785604610848046> [In Russian]
- Kraev, A. N., & Shankhoyev, Z. Sh. (2019). Modeling the deformed state of the roadbed on permafrost soils. *Transport Structures*, 6(1), 5. <https://doi.org/10.15862/05SATS119> [In Russian]
- Kudryavtsev, S. A., Kazharsky, A. V., Shvets, Ya. A., & Medvedev, V. V. (2015). Study of freezing and thawing processes of railway subgrades, reconstructed sections of the second track of the Baikal-Amur Mainline on permafrost soils. In A. L. Isakov and C. K. Lyu (Eds.), *Proceedings of the Second International Symposium on Subgrades in Cold Regions* (September 24–26, Novosibirsk, Russia) (pp. 12–19). Siberian State Transport University. [In Russian]
- Kuzmin, P. P. (1960). *Formation of Snow Cover and Methods for Determining Snow Reserves*. Gidrometeoizdat. Pp. 162–168. [In Russian]
- Litovko, A. V. (2021). Comprehensive engineering and geocryological studies on the “NAM” highway. *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*, 7(4), 9–15. [In Russian]
- Lyalyushko, E. S., & Emelyanovich, V. V. (2018). Analysis of deformations and the purpose of measures to eliminate them on the Amur highway (on sections of permafrost soils). In V. V. Vishnevsky (Ed.), *Current Issues of Road Construction in Harsh Conditions: Proceedings of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference of Road Workers* (December 6, Chita, Russia) (pp. 5–16). Trans-Baikal State University. [In Russian]
- Pushkarev, V. E., Plesovskikh, K. A., & Pechkin, A. S. (2023). Features of snow accumulation along the Salekhard–Nadym highway. *Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug*, 3(120), 19–31. <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2023.120.3.002> [In Russian]
- Syromyatnikov, I. I., Litovko, A. V., Kirillin, A. R., et al. (2023). Geotechnical monitoring on federal highways in the conditions of Central Yakutia. In *Current Issues of Thermophysics, Energy and Hydrogas Dynamics in the Arctic and Subarctic Territories (Tegua-2023): Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation*,

- dedicated to the 100th anniversary of the Honored Scientist of the RSFSR and the YASSR, Doctor of Technical Sciences, Professor N. S. Ivanova* (December 6–9, Yakutsk, Russia) (pp. 138–139). North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov. [In Russian]
- Syromyatnikov, I. I., Litovko, A. V., Kirillin, A. R., et al. (2024). Geotechnical monitoring on federal highways in the permafrost zone. *Transport. Transport Structures. Ecology*, 3, 5–13. <https://doi.org/10.15593/24111678/2024.03.01> [In Russian]
- Trofimov, A. E., Churilin, V. S., & Zgolich, I. A. (2021). Monitoring the water-thermal regime of soils of the roadbed with an asphalt granule concrete base. In I. A. Kurzina and G. A. Voronova (Eds.), *Prospects for the Development of Fundamental Sciences: Proceedings of the 18th International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. In 7 Volumes* (April 27–30, Tomsk, Russia) (pp. 95–97). Volume 6. National Research Tomsk Polytechnic University. [In Russian]
- Shein, A. N., Yuditskikh, E. Yu., Potapov, V. V., & Kalganov, A. S. (2018). *Laboratory Practical Training on Electrical Exploration*. Transbaikal State University. [In Russian]
- Shestakov, A. F., Fedorova, O. I. (2022). Study of the state of the soil embankment of a highway section using conductive electrical soundings. *Ural Geophysical Bulletin*, 4(50), 51–66. <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.4.6.51> [In Russian]
- Shuvalov, V. M. (2011). Integrated application of geophysical methods at the stages of design, construction and operation of engineering structures and communications. *Bulletin of Perm University. Geology*, 4, 46–60. [In Russian]
- Lalomov, D. A., & Fertoing, V. V. (2017). Highway state examination based on combined application of capacitive coupled electrical resistivity tomography and ground-penetrating radar. In *Engineering Geophysics 2017: Conference Proceedings* (April 24–28, Kislovodsk, Russia). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700423>
- Niu, F. J., Liu, M. H., Cheng, G. D, et al. (2015). Long-term thermal regimes of the Qinghai-Tibet Railway embankments in plateau permafrost regions. *Science China: Earth Sciences*, 58, 1669–1676. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5063-0>

Сведения об авторах

Владислав Евгеньевич Пушкарев, аспирант, кафедра прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; младший научный сотрудник, Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия vladpuskr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4713-209X>

Кирилл Александрович Плесовских, аспирант, кафедра прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; младший научный сотрудник, Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия plesovskih.ka@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0631-7656>

Александр Александрович Лебедев, кандидат технических наук, научный сотрудник, Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия a.a.lebedev_mt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5444-4665>

Александр Анатольевич Вакулин, доктор технических наук, профессор, почетный работник науки и высоких технологий РФ, профессор кафедры прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.a.vakulin@utmn.ru

Information about the authors

Vladislav E. Pushkarev, Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Junior Researcher, Arctic Research Center, Salekhard, Russia
vladpuskr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4713-209X>

Kirill A. Plesovskikh, Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Junior Researcher, Arctic Research Center, Salekhard, Russia
plesovskih.ka@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0631-7656>

Alexander A. Lebedev, Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Arctic Research Center, Salekhard, Russia
a.a.lebedev_mt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5444-4665>

Aleksandr A. Vakulin, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Professor of the Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia
a.a.vakulin@utmn.ru