

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 4 / 2025, Vol. 12, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS425.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS425 (<https://doi.org/10.15862/12SATS425>)

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Воронцов, В. В. Совместная работа геосинтетиков и термостабилизаторов при действии длительностоящих поверхностных вод на неоднородное многолетнемерзлое основание автомобильной дороги / Воронцов В. В., Игошин М. Е. // Транспортные сооружения. — 2025. — Т. 12. — № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/12SATS425.pdf>. DOI: 10.15862/12SATS425.

For citation:

Vorontsov V.V., Igoshin M.E. The combined use of geosynthetics and thermal stabilizers under the influence of long-standing surface water on a heterogeneous permafrost road base. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2025;12(4): 12SATS425. Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS425.pdf>. DOI: 10.15862/12SATS425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.13/625.731

Воронцов Вячеслав Викторович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Доцент кафедры «Строительные конструкции»,
исполняющий обязанности заведующего базовой кафедрой ПАО «Газпром нефть»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: variog08@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0141-7452>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=546740

Игошин Михаил Евгеньевич

ООО «МСК Проект», Москва, Россия
Ведущий инженер-геотехник
E-mail: m.e.igoshin@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3622-2234>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=761903

Совместная работа геосинтетиков и термостабилизаторов при действии длительностоящих поверхностных вод на неоднородное многолетнемерзлое основание автомобильной дороги

Аннотация. Указами президента Российской Федерации определена сухопутная территория Арктической зоны РФ, объединяющая 10 регионов нашего государства. Утверждены основы государственной политики и стратегия развития указанной территории ввиду колоссальной значимости как стратегической ресурсной базы нашей страны. Арктическая зона характеризуется суровыми климатическими условиями, а также повсеместным распространением многолетнемерзлых грунтов, что определяет специфику проектирования инженерных сооружений. Динамичное развитие государства во многом зависит от наличия транспортной инфраструктуры, в том числе сети качественных автомобильных дорог. Это определяет актуальность и практическую значимость разработки и внедрения новых конструктивно-технологических решений для строительства, ремонта и реконструкции дорожной сети. В

статье рассмотрено конструктивное решение с использованием геосинтетических материалов и сезонно-охлаждающих устройств для стабилизации циклических деформаций основания, земляного полотна и дорожной одежды автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах. Спецификой задачи является неоднородное в поперечном разрезе основание, представленное пластичномерзлым льдистым торфом и пластичномерзлой супесью с одной стороны от продольной оси дорожной конструкции и водонасыщенным песком мелкой и средней крупности с другой. В непосредственной близости к насыпи земляного полотна автомобильной дороги наблюдаются длительностоящие поверхностные воды, растепляющие пластичномерзлый грунт основания. Изложены результаты расчетов устойчивости дорожной конструкции в программном комплексе Plaxis, а также прогноз температурных полей в основании грунтового массива в Termoground. Авторами выполнено сопоставление результатов численного моделирования и геотехнического мониторинга натурального объекта после внедрения предложенного решения.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты; автомобильная дорога; основание; геосинтетические материалы; термостабилизация; геотехнический мониторинг

Введение

Комплексное развитие Арктической зоны Российской Федерации является ключевым направлением, обеспечивающим рост экономики нашей страны на многие годы вперед. В первую очередь, это обосновывается тем, что основной объем добычи природных полезных ископаемых уже сместился в регионы Крайнего Севера. При этом надо отметить наличие разведанных колоссальных запасов, исчисляемых десятками и сотнями миллионов тонн твердых полезных ископаемых: бурого угля, черных и цветных металлов (железная и хромовая руда, цинк, свинец, кварц, никель, олово, марганец, платина, медь, золото, серебро, титан и другие), а также огромных запасов, миллиарды баррелей, нефти и природного газа. Перспективные месторождения природных богатств Арктики по разным оценкам составляют от 25 % до 40 % мировых запасов, в отношении нашей страны это составляет около 80 % всех российских полезных ископаемых. Данные регионы богаты ценными биоресурсами, прежде всего это рыба и морепродукты. Во вторую очередь, необходимо сказать о геополитических аспектах — усиление активности, в том числе военной, приарктических государств. А это предопределяет необходимость защиты национальных интересов нашей Родины. В рамках данной статьи сконцентрируем внимание на создании необходимой инфраструктуры для успешной реализации проектов и основных рисках, препятствующих достижению поставленных целей.

В соответствии с Указом Президента № 296 от 2 мая 2014 года определены сухопутные территории Арктической зоны Российской Федерации, с учетом изменений, внесенных в 2019, 2020, 2024 годах в Арктическую зону РФ включены 10 регионов нашей страны, кроме того земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане. При этом 4 региона входят полностью, а остальные субъекты частью своих территорий. Это составляет почти 5 млн км², порядка 28 % территории нашей страны, с повсеместным распространением многолетнемерзлых грунтов, а численностью жителей не многим более 2 с половиной млн человек.

Указы Президента Российской Федерации № 164 от 05.03.2020 и № 645 от 26.10.2020, определяют основы государственной политики и стратегию развития Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 996-р от 15.04.2021 сводит в единый план мероприятий действия всех субъектов. В обозначенных документах выделены основные угрозы реализации задуманного. Наряду с другими обозначены низкий уровень развития социальной, транспортной и информационно-коммуникационной инфраструктуры, климатические и техногенные воздействия, приводящие к деградации многолетней мерзлоты.

В работе [1] подчеркивается необходимость масштабного строительства железных и автомобильных дорог, приведены серьезные аргументы, среди которых, конечно, колоссальные территории нашей страны, ориентированность экономического развития на страны Востока и Китай, ускорение реализации проектов по развитию северного широтного хода. Важным фактором является прохождение дорог по многолетнемерзлым грунтам, для которых свойственна потеря несущей способности при растеплении. На это безусловно влияют климатические характеристики, в первую очередь, температура воздуха, авторы отмечают тренды повышения среднегодовой температуры более 2 градусов за последние 50 лет, что негативно повлияет на грунты оснований зданий и сооружений и как следствие — повышение аварийности объектов в криолитозоне. Для обеспечения безопасности и нормативных требований по деформативности сооружений, высоких скоростей движения транспорта предлагается использовать эстакадные пути, в случае необходимости в комбинации с сезонно-охлаждающими устройствами.

Для обеспечения долговременной эксплуатационной надежности транспортных сооружений на многолетнемерзлых грунтах, на примере участков Дальневосточной железной дороги, рассматривается взаимодействие сезонно-охлаждающих устройств (термостабилизаторов) и теплоизолирующих материалов [2]. Проведенные исследования, в частности численное теплофизическое моделирование в расчетном комплексе FROST 3D, показывают положительный эффект, выражающийся в повышении прочностных характеристик насыпи и грунтов основания.

Конструктивно-технологическое решение для регулирования температурно-влажностного режима и соответственно напряженно-деформированного состояния автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах на подтопляемых участках предполагает применение теплоизолирующих материалов и вертикально расположенного в основании водонепроницаемого геотекстиля [3]. Результаты численного моделирования для метеорологических условий г. Надым в программном комплексе QFROST показывают повышение устойчивости системы «насыпь — многолетнемерзлое основание», рост технико-эксплуатационных показателей.

Значительная роль в реализации масштабных проектов нашего государства отведена Ямало-Ненецкому автономному округу, который полностью входит в Арктическую зону Российской Федерации. Оценивая региональную транспортную сеть округа следует отметить, ее интенсивное развитие во время освоения нефтяных и газовых месторождений региона. При длительной эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне характерны следующие проблемы: образование колеи, волн, провалов, продольных и поперечных трещин на покрытии дорожной конструкции, обрушение откосов земляного полотна, особенно проявляющихся в осенне-весенний период. Это объясняется резкими циклическими колебаниями положительных и отрицательных температур, что влечет изменение физико-механических характеристик грунтов основания и земляного полотна, то есть прочностные характеристики резко снижаются.

Одним из примеров проявления указанных дефектов является участок автомобильной дороги с капитальным покрытием, соединяющей города Новый Уренгой и Надым, в соответствии с геометрическими размерами: ширина земляного полотна по верху 12 м, высота насыпи составляет 2,0 м, что по технической категоричности соответствует III категории. Вышеуказанные общие проблемные точки для дорожных конструкций проявлены в полной мере: отклонения от горизонтальной отметки (провалы и выпучивание) составляют в среднем до 25 см, в отдельных случаях достигают 40 см; на асфальтобетонном покрытии вдоль продольной оси дороги основная трещина с максимальным раскрытием 12 см, дополнительно отметим, наличие сетки продольных и поперечных трещин с меньшим раскрытием; в откосной части действует несколько разрушающих факторов, совместное действие которых приводит к потере устойчивости откосов. При эксплуатации автомобильной дороги планомерно проводятся

работы, в рамках которых восстанавливаются основные технические параметры, однако критические деформации быстро проявляются вновь.

Для приведения величин деформаций и скорости их нарастания к нормативным требованиям была выдвинута следующая гипотеза исследований — в вертикальной плоскости в подоткосной части дорожной конструкции, прерывая наиболее вероятные линии скольжения и ограничивая возможные горизонтальные перемещения и выпор грунтов основания, необходимо разместить геосинтетический материал, который для включения в работу по восприятию нормальных и касательных напряжений, опирается на льдогрунтовые цилиндры, образованные при помощи установки одиночных термостабилизаторов.

Сформулируем цель исследования: оценка влияния совместной работы армирующих геосинтетических материалов и одиночных термостабилизаторов на напряженно-деформированное и температурное состояние дорожной конструкции на неоднородном многолетнемерзлом основании при действии длительностоящих поверхностных вод путем проведения натуральных экспериментов и последующего геотехнического мониторинга, а также выполнения прогнозных расчетов в программных комплексах. В соответствии с гипотезой и заявленной целью, сформулированы задачи исследований:

- выполнить инженерные изыскания и комплексное обследование проблемного участка дорожной конструкции на неоднородном многолетнемерзлом основании при действии длительностоящих поверхностных вод для установления возможных причин образования критических деформаций и дефектов;
- разработать конструктивное решение по усилению основания и насыпи земляного полотна при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте локальных участков дорожной конструкции на неоднородном многолетнемерзлом основании при действии длительностоящих поверхностных вод в непосредственной близости от откосов;
- исследовать влияние конструктивного решения на напряженно-деформированное и температурное состояние дорожной конструкции на неоднородном многолетнемерзлом основании при действии длительностоящих поверхностных вод на основе натурального эксперимента;
- провести численное моделирование объекта в современных программных комплексах и сопоставить с результатами экспериментальных исследований;
- оценить эффективность предлагаемого конструктивного решения дорожной конструкции на неоднородном многолетнемерзлом основании при действии длительностоящих поверхностных вод.

Методы

В экспериментальной части работы для исследования выбран участок вышеуказанной автомобильной дороги длиной 60 м.

Для измерения температур грунтового основания экспериментальная конструкция земляного полотна оборудовалась термометрическими скважинами глубиной 10 м с обсадкой скважин металлическими трубами диаметром 57 мм с герметичными заглушками. Замеры температуры выполняли через каждый 1 м по глубине скважины с применением многозонного цифрового датчика температуры с выходом на портативный контроллер цифровых датчиков.

Осадка грунтовых слоев по глубине неоднородного многолетнемерзлого основания дорожной конструкции измерялись при помощи марок. Вертикальные перемещения марок

фиксируются прогибомерами. Марка соединяется с прогибомером при помощи стальной проволоки диаметром 0,3 мм. Программой мониторинга предусмотрено отслеживание перемещений электронным тахеометром. Для этого сразу после установки всех датчиков выполнялись работы по плано-высотной привязке к местности.

На исследуемом участке было установлено 120 грунтовых марок на 10 исследуемых поперечниках. На каждом поперечнике у всех марок одинаковая глубина погружения относительно уровня дневной поверхности. Выбор места расположения датчика направлен на изучение деформированного состояния откосной части насыпи земляного полотна и основания. Грунтовые марки расположены как в теле откоса автомобильной дороги, так и в основании земляного полотна на уровне подошвы и на глубине 1 м, 2 м, 3 м и 4 м.

Измерение общих напряжений на вертикальных и горизонтальных площадках осуществлялось месдозами мембранного типа с тензорезисторными датчиками. В качестве регистрирующей аппаратуры применялся цифровой измеритель деформаций. Прибор обеспечивает подключение до шести расширителей каналов, каждый из которых имеет 80 измерительных каналов.

Установка оборудования для наблюдения за температурным и напряженно-деформированным состояниями грунтов основания и земляного автомобильной дороги осуществлялась сразу после проведения работ по устройству конструктивно-технологического решения по армированию исследуемого участка автомобильной дороги. Схема расположения глубинных марок, вертикальных и горизонтальных тензорезисторных месдоз представлена на рисунке 1. На участке длиной 60 метров принято 10 поперечников. На армированной стороне автомобильной дороги расположено 73 грунтовые марки и 78 месдоз, на неармированной — 47 и 42 соответственно. В плане датчики расположены таким образом, чтобы измерять напряженно-деформированное состояние в основании, подоткосной части и упорном грунтовом валике.

Выполнено численное моделирование в программных комплексах промерзания-оттаивания и напряженно-деформированного состояния грунтового основания и насыпи дорожной конструкции. Задача разложена на две составляющие — прогноз температурного режима в программном модуле Termoground программного комплекса FEM models и расчет напряжений и деформаций в программном комплексе Plaxis 3D. Данный подход реализован в работе [4], где авторы демонстрируют алгоритм прогноза промерзания и оттаивания грунтов в основании дорожных насыпей с выделением двух этапов — расчет напряженно-деформированного состояния массива грунта с находящимся на нем сооружением и расчет температурных полей в программном модуле Termoground с учетом лучистой энергии Солнца, приводящей к неравномерности деформаций поперечников с учетом ориентации в широтном направлении.

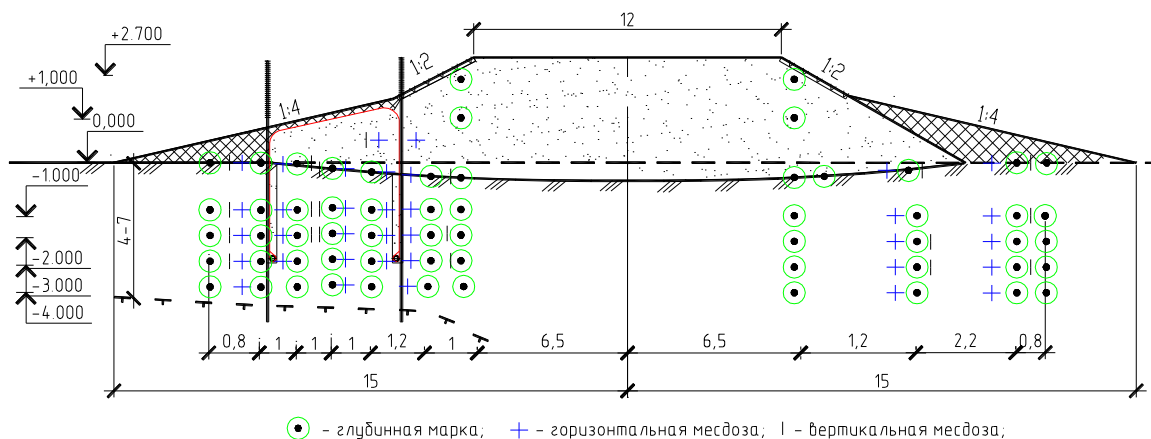


Рисунок 1. Схема расположения месдоз и марок (разработано авторами)

В работе [5] представлены подходы к проведению экспериментальных исследований в натуральных условиях на маломасштабных модельных участках дорожных конструкций в условиях сезонно-мерзлых грунтов, а также результаты измерений параметров промерзания (влажность, температура и скорость промерзания). Подбор необходимого оборудования для мониторинга напряжений и деформаций в армогрунтовых основаниях автомобильных дорог изложены в статье [6], акцент сделан на тензорезисторные датчики давления для измерения вертикальных нормальных напряжений в грунтовом массиве, приведены и обоснованы их основные технические характеристики. Проанализирована регистрирующая аппаратура и даны рекомендации по выбору тензоизмерительной системы, а также датчиков для измерения растягивающих напряжений в армирующих прослойках.

Результаты

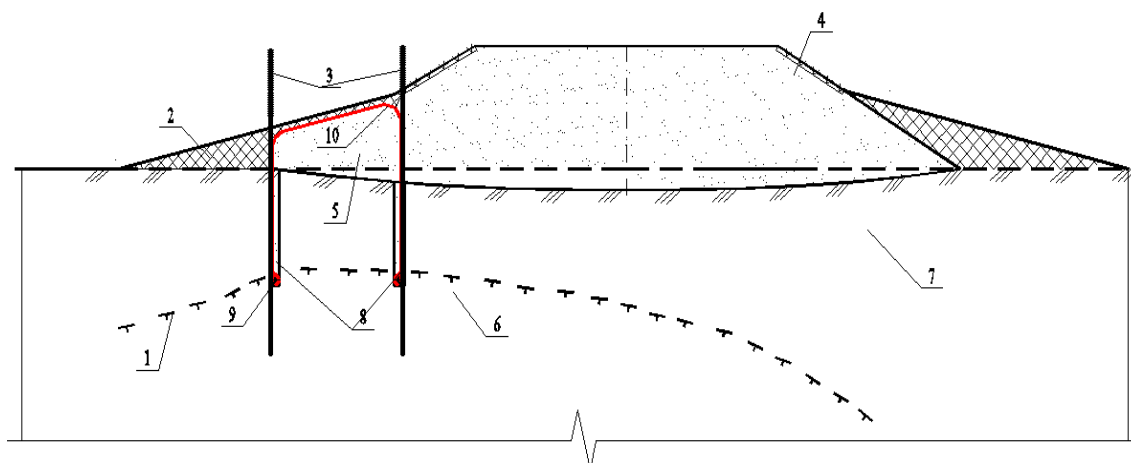
Для детального изучения причин развития деформаций и определения инженерно-геокриологической обстановки были выполнены геологические и геодезические изыскания. На исследуемом участке разработано 6 горных выработок. Скважины расположены у подошвы откоса земляного полотна, напротив локальных деформативных зон покрытия проезжей части. По результатам камеральной обработки выявлено расположение дорожной конструкции на неоднородном в поперечном разрезе основании, которое с одной стороны от продольной оси дороги представлено водонасыщенными и пластичномерзлыми торфами и супесью, а с другой водонасыщенными песками разной крупности.

Следует отметить, что процессы миграции надмерзлотных подземных вод на рассматриваемом участке происходит круглогодично. Это обеспечивается природным уклоном напластований слоев грунта, уровнем подземных вод, а также рельефом местности. Усугубляет ситуацию наличие незамерзающего в зимний период водоема у подошвы насыпи, над пластичномерзлым торфом.

Совместное влияние длительно стоящих поверхностных вод, подпитывающееся за счет круглогодичной миграции подземных, приводит к снижению прочностных характеристик и суффозии грунтов.

Комбинация неблагоприятных факторов с учетом все более возрастающей нагрузки от движения транспорта, как по интенсивности, так и весу, приводит к указанным выше критическим деформациям. Для их стабилизации предлагается конструктивное решение [7], проиллюстрировано рисунком 2. Сделаем необходимые пояснения: часть земляного полотна, подверженного критическим деформациям, опирается на основание, представленное тальми водонасыщенными торфами и супесью, ниже кровли многолетнемерзлых грунтов — пластичномерзлым льдистым торфом, выполнены траншеи, обозначены цифрой 8, в которые вертикально размещен геосинтетический материал, в нижней части закрепленный анкерной трубой 9, а верхняя часть полотнища захватывает часть откоса, образуя «упорный валик» 5, в общем получаем армирующую полуобойму из геосинтетика. Одиночные термостабилизаторы 3, погружены ниже верхней границы многолетнемерзлых грунтов 1.

Вокруг термостабилизаторов сформируется ледогрунтовой цилиндрический массив, он будет служить опорой для геосинтетика, который, работая на растяжение, в результате включится в работу во восприятию нормальных и касательных напряжений в основании и откосе. При этом ожидаем эффект от поднятия верхней границы многолетнемерзлых вследствие совместной работы охлаждающих термостабилизаторов и геосинтетика, препятствующего свободному передвижению поровой воды. В работе [8] приведены результаты численного моделирования данного конструктивно-технологического решения по стабилизации циклических деформаций дорожной конструкции.



1 — верхняя граница многолетнемерзлых грунтов; 2 — торфяная подсыпка; 3 — термостабилизаторы; 4 — земляное полотно; 5 — упорный валик; 6 — пластично-мерзлый торф; 7 — пески средней крупности водонасыщенные; 8 — траншеи; 9 — анкерная труба; 10 — геосинтетический материал

Рисунок 2. Конструктивное решение по усилению основания и насыпи земляного полотна дорожной конструкции на неоднородном многолетнемерзлом основании при действии длительностоящих поверхностных вод в непосредственной близости от откосов (разработано авторами)

На рисунке 3 а (март) и 3 б (сентябрь) представлены изолинии температуры, полученные по результатам наблюдений температурного режима основания и насыпи земляного полотна, значения приведены на третий год проведения геотехнического мониторинга автомобильной дороги на неоднородном многолетнемерзлом основании после внедрения конструктивного решения. В целом наблюдаем переход талого водонасыщенного торфа в подоткосной части насыпи земляного полотна в мерзлое состояние, в том числе и на конец периода действия положительных температур.

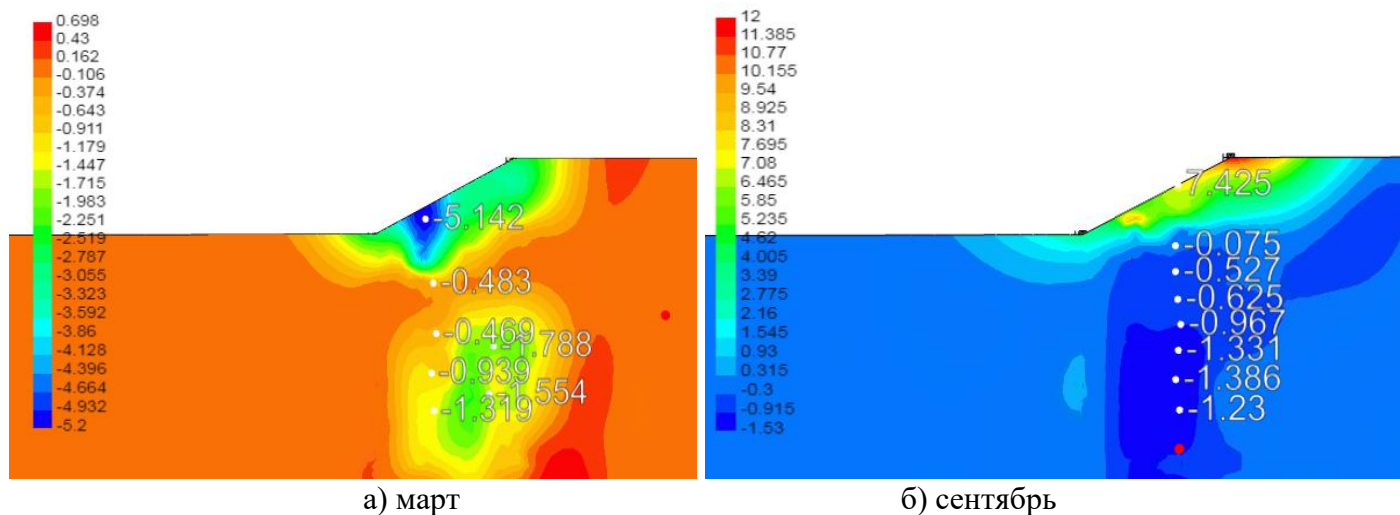
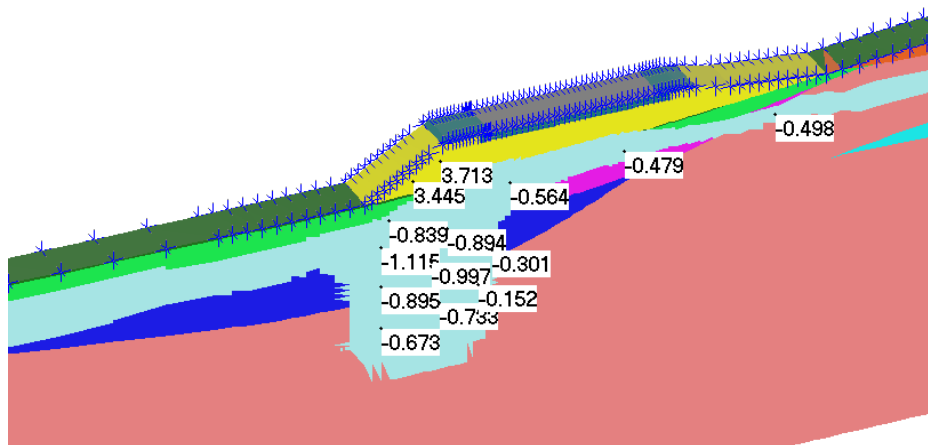
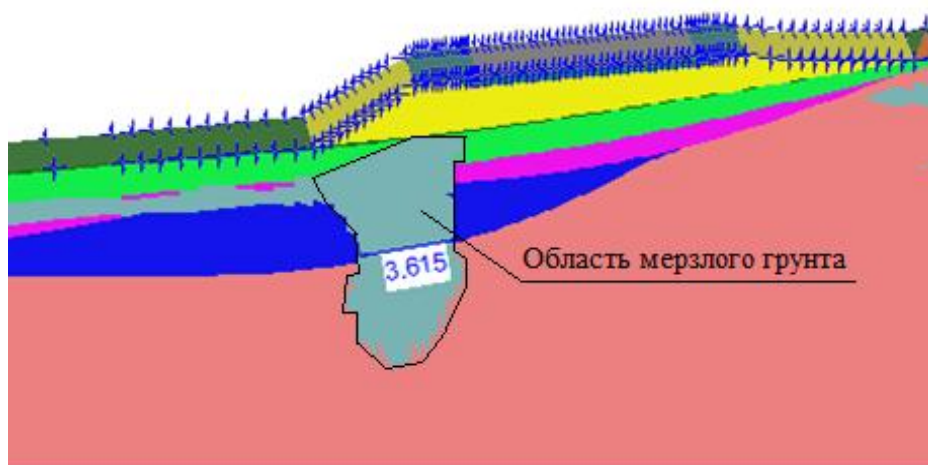


Рисунок 3. Изолинии температуры грунта на 3-й год геотехнического мониторинга (разработано авторами)

По результатам расчетов температурного режима грунтов в программном модуле Termoground программного комплекса FEM models на рисунках 4 а и 4 б приведены значения температуры грунтов на третий год эксплуатации, а также размеры льдогрунтового массива, образованного действием сезонно-охлаждающих устройств. В экспериментальном исследовании были применены термостабилизаторы ТК 32/10 производства фирмы «Фундаментстройаркос», геосинтетический материал Геоспан ТН-80.



а) значения температур



б) размеры льдогрунтового массива

Рисунок 4. Расчетная область образования льдогрунтового массива после трех лет эксплуатации (разработано авторами)

Отдельные результаты численного моделирования деформированного состояния основания и насыпи в программном комплексе Plaxis 3D по упругопластической модели Кулона — Мора проиллюстрированы на рисунках 5–7.

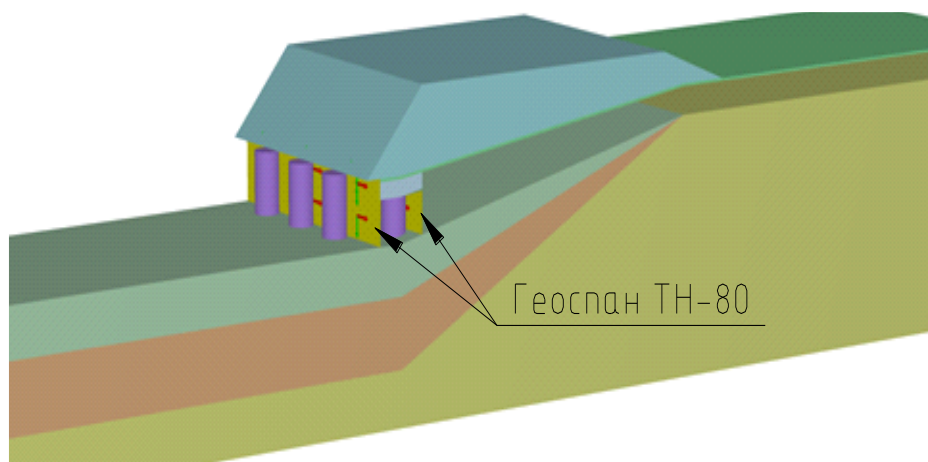
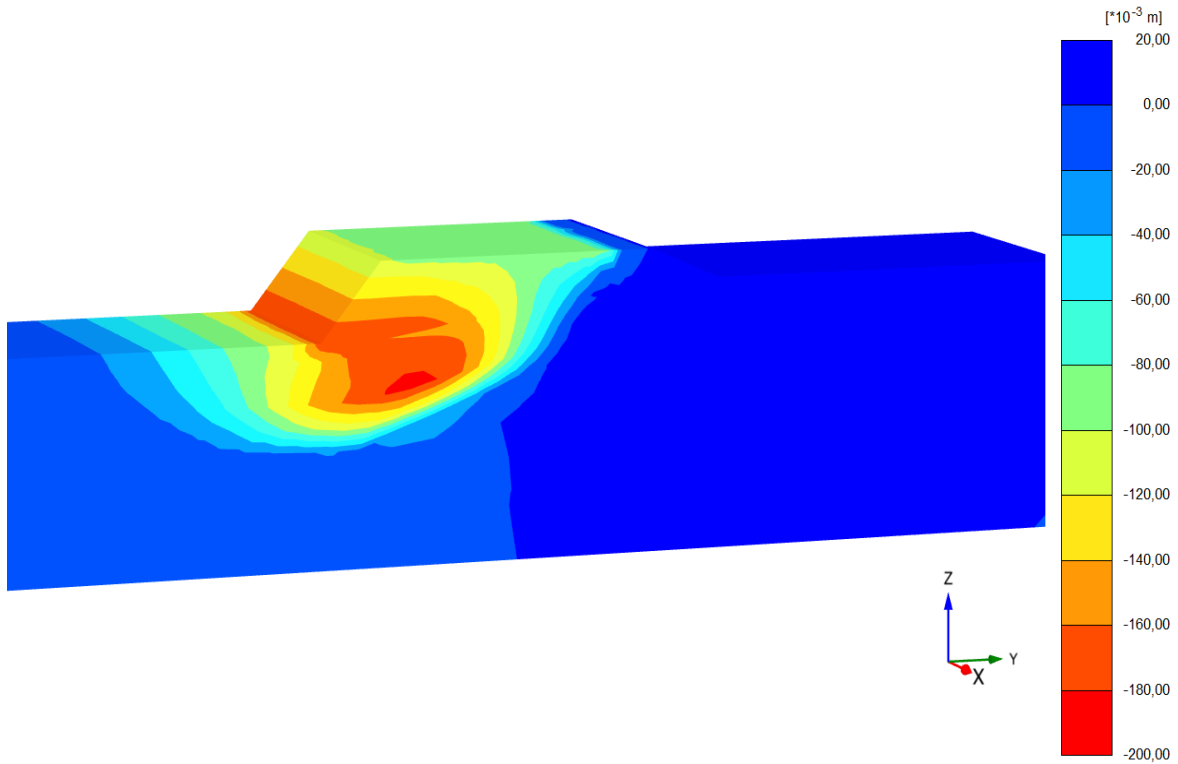
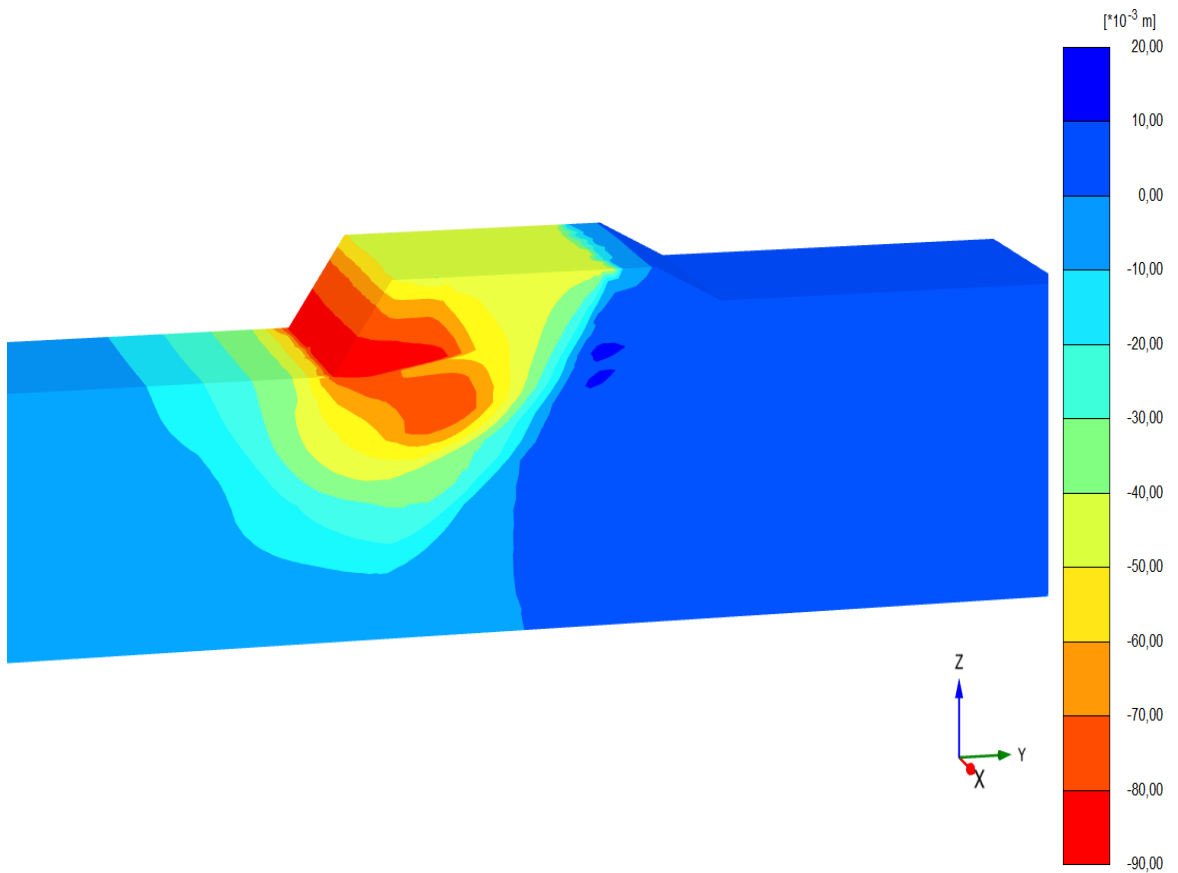


Рисунок 5. Модель грунтового основания с льдогрунтовыми цилиндрами и геосинтетическим материалом (разработано авторами)



а) изолинии горизонтальных перемещений без усиления



б) усиленной льдогрунтовыми цилиндрами (термостабилизаторы) и геосинтетическим материалом

Рисунок 6. Изолинии горизонтальных перемещений в дорожной конструкции (разработано авторами)

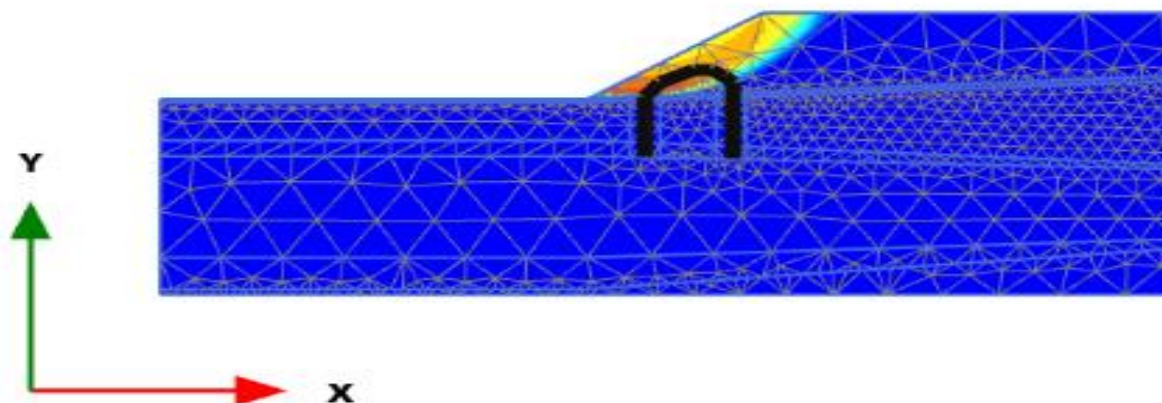


Рисунок 7. Результаты расчета коэффициента устойчивости $K_{уст} = 2,275$ (разработано авторами)

Обсуждение

В геологическом строении экспериментальный участок сформирован техногенными насыпными грунтами, озёрно-аллювиальными, биогенными отложениями. При анализе инженерно-геокриологических изысканий можно заключить, что автомобильная дорога находится на неоднородном в поперечном разрезе основании. Что является причиной такого расположения дорожной конструкции остается вопросом открытым, возможно несоответствие инженерных изысканий и проектных решений в части привязки к координатам на местности, ошибки при геодезической разбивке трассы на этапе строительства, несоблюдение технологического процесса и заданных реперов при отсыпке насыпи земляного полотна. В результате одна часть дорожной конструкции опирается на водонасыщенные пески мелкие и средней крупности, а также водонасыщенные глинистые грунты, находящиеся в талом состоянии, а другая на водонасыщенный талый торф и с глубины 1,20–3,50 м максимально вскрытой мощностью до 8,40 м на пластичномерзлые — торф и заторфованный суглинок, мерзлые грунты имеют температуры от минус 0,3 до минус 0,60°C. Мощность слоя сезонного промерзания-оттаивания для песков составляет от 3,00 до 2,40 м, для торфа от 0,80 до 0,60 м. Очевидно, при таком сложении подстилающих грунтов вертикальные и горизонтальные деформации основания и тела насыпи земляного полотна будут неравномерными, что автоматически скажется на повреждениях дорожного покрытия.

Особую роль в данном случае играют рельеф местности и гидрологические условия. Рельеф площадки слабовсхолмлен, заболочен. В основной части покрыт почвенно-растительным слоем (сфагновые мхи, мочажник, ерник, тальник). Рассматриваемый участок автодороги полностью проходит по левобережной пойме р. Правая Хетта. Прилегающая к трассе автодороги территория затапливается уровнями редкой повторяемости.

Грунтовые воды на данной площадке обнаружены практически повсеместно. Скважинами вскрыты два водоносных горизонта. Первый с глубины в интервале 0,1–1,30 м, водовмещающими грунтами является торф, насыщенный водой, мощностью от 0,50 до 2,20 м, является надмерзлотным. Второй водоносный горизонт — подмерзлотный, вскрыт с глубины 4,70 м мощностью 1,30 м, водовмещающими грунтами являются пески средней крупности, насыщенные водой.

На расстоянии 1,5 м от подошвы насыпи земляного полотна, расположен водоем, питаемый атмосферными осадками и мигрирующими грунтовыми и тальными водами. Прилегающий водоем способствует растеплению многолетнемерзлых грунтов основания автомобильной дороги, а также развитию опасных геокриологических процессов, таких как термокарст, эрозия

мохо-растительного почвенного слоя, а совместно с фильтрацией воды сквозь водоносные горизонты к суффозии грунтов насыпи и основания земляного полотна.

На основе исходных данных выделим основные факторы, влияющие на устойчивость экспериментального участка автомобильной дороги:

- неоднородное в поперечном разрезе основание, представленное талыми и пластичномерзлыми грунтами;
- фильтрация воды в основании дорожной конструкции, наличие двух водоносных горизонтов (надмерзлотный и подмерзлотный);
- длительностоящие поверхностные воды вблизи подошвы откоса, опирающегося на талые и пластичномерзлые грунты.

В комбинации они дают потерю устойчивости откоса и значительные деформации грунтового массива вследствие выпора растепленного пластичномерзлого торфа и суглинка в основании дорожной конструкции от продольной оси в сторону поверхностных длительно стоящих вод. В силу передачи нагрузки на неоднородное в поперечном разрезе основание дополнительно происходит вертикальная неравномерная осадка одной части дороги относительно другой, что выражается в разрыве асфальтобетонного покрытия с образованием продольных трещин по всей длине экспериментального участка.

Статья А.Н. Богомолова с коллегами [9] позволяет аналитически оценить напряженное состояние и устойчивость откоса, а также определить угол наклона наиболее вероятной площадки разрушения в точке грунтового массива. Что особенно важно для дальнейших исследований по уточнению и доработке конструктивного решения в части наиболее эффективного расположения геосинтетического материала и опорных льдогрунтовых цилиндров, приводится анализ значимых факторов и работы с ними для определения минимальной величины коэффициента запаса устойчивости и построения наиболее вероятной линии скольжения. Неоценимую помощь при анализе выполненных расчетов и постановке задач для следующих этапов исследований оказали следующие работы: в части определения устойчивости системы «водонасыщенное основание — насыпь» [10], влияния сезонных изменений коэффициента запаса устойчивости грунтовых массивов с учетом «взвешивающего» воздействия грунтовых вод и дестабилизирующих гидравлических напоров [11], а также построения наиболее вероятных линий скольжения [12].

В статье [13] приводятся результаты численного моделирования в программном комплексе Plaxis 2D работы фундаментов мелкого заложения при разной степени водонасыщения грунта, особое внимание уделяется связи поровых давлений и деформаций грунтов оснований. Практически значимыми являются расчеты программных комплексах Plaxis и FEA. Работа [14] посвящена анализу входных параметров и расчетных схем при прогнозе деформаций и напряжений, возникающих в грунтовых массивах. Отмечается необходимость учета при геотехнических расчетах истории нагружения основания, наличия поровой воды, уровня грунтовых вод, а также особенности влияния выбранных расчетных схем.

Использование геосинтетических материалов для снижения деформативности слабых водонасыщенных оснований не является новеллой, более того, наличие широкой линейки предложений и возможность получить материал с заданными прочностными характеристиками, предопределяет активное применение в дальнейшей практике строительства. Изучению влияния геосинтетиков на напряженно-деформированное состояние оснований инженерных сооружений посвящены ряд работ российских и зарубежных исследователей. Одним из направлений является горизонтальное армирование основания геосинтетическими полотнами. В работе [15] представлена серия лабораторных экспериментов исследования влияния горизонтального

армирования песчаного основания геосинтетиком на его несущую способность при давлении от модели квадратного столбчатого фундамента, проведена обработка эксперимента методами математической статистики. В монографии [16] коллективом авторов представлены лабораторные и натурные экспериментальные исследования, а также методика расчета, сопоставление с прогнозом в программном комплексе Plaxis песчаной сваи, армированной по контуру, в водонасыщенных глинистых грунтах.

Заключение

В экспериментально-теоретическом исследовании рассмотрен участок автомобильной дороги длиной 60 м в Ямало-Ненецком автономном округе, в районе поселка городского типа Пангоды. Выбор данного участка обоснован критическими циклическими деформациями, потерей устойчивости дорожной конструкции, в первую очередь откосной части. Выполнение плановых работ по капитальному ремонту не приводит к желаемому результату. Определена цель исследования — оценка влияния на стабилизацию деформаций и обеспечение устойчивости дорожной конструкции совместной работы армирующих геосинтетических материалов и одиночных термостабилизаторов, путем изучения напряженно-деформированного и температурного состояния дорожной конструкции на неоднородном многолетнемерзлом основании при действии длительностоящих поверхностных вод путем проведения натурных опытов, а также выполнения прогнозных расчетов в программных комплексах. В ходе работы решены поставленные задачи.

Проведены инженерные изыскания, геологические и геодезические, а также обследован указанный участок на предмет определения количественных значений всех видов деформации на дорожном покрытии. Выявлены основные факторы приводящие к потере устойчивости конструкции в целом. Таковыми являются сложные инженерно-геокриологические условия основания, выраженные в неоднородности грунтов в поперечном разрезе, наличие двух водоносных горизонтов в основании, прилегающие к откосу длительно стоящие поверхностные воды.

Разработано конструктивное решения по усилению дорожной конструкции на неоднородном многолетнемерзлом основании с применением геосинтетического материала и одиночных термостабилизаторов. Кроме того, была разработана программа геотехнического мониторинга для исследования температурного режима и напряженно-деформированного состояния опытного участка.

На следующем этапе было выполнено внедрение конструктивного решения на рассматриваемом участке и проведены наблюдения в течение пяти лет в рамках геотехнического мониторинга.

При разработке конструктивного решения и в ходе геотехнического мониторинга был выполнен прогноз напряженно-деформированного состояния и температурного режима грунтов основания и тела земляного полотна, при помощи современных программных комплексов Plaxis 3D и Termoground. Сопоставление результатов прогноза с данными натурных наблюдений показывает достаточно высокую сходимость — погрешности в пределах 10 %.

В целом, можно заключить эффективность предлагаемого конструктивного решения по стабилизации деформаций автомобильной дороги, что выражается в снижении деформаций дорожного покрытия на рассматриваемом участке. В первые два года наблюдений приращение деформаций снижалось, а начиная с третьего года деформации практически отсутствовали. Однако, стоит отметить, что полученные результаты, например, расчетный коэффициент устойчивости равный 2,275, свидетельствуют о возможности и необходимости оптимизации предложенного решения в части количества сезонно-охлаждающих устройств. Что приведет к

большей технико-экономической целесообразности предлагаемой конструкции автомобильной дороги.

По результатам проведенной экспериментально-теоретической работы получен патент на изобретение Российской Федерации, положительное решение государственной экспертизы, справки о внедрении результатов научно-исследовательских работ в проектные решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров, И.И. Новые подходы к проектированию и строительству железных и автомобильных дорог в криолитозоне / И.И. Сахаров, С.А. Кудрявцев, В.Н. Парамонов, Т.Ю. Вальцева // Транспортные сооружения. — 2024. — Т. 11, № 2. — С. 1–19. — URL: <https://t-s.today/03SATS224.html>. — DOI: [10.15862/03SATS224](https://doi.org/10.15862/03SATS224). — EDN: [DNITYN](https://edn.sci.org/EDN/DNITYN). (дата обращения: 12.12.2025).
2. Шепитько, Т.В. Анализ эффективности взаимодействия сезонно-действующих охлаждающих устройств и теплоизоляционных слоев на многолетнемерзлые грунты основания транспортных сооружений / Т.В. Шепитько, И.А. Артюшенко, А.А. Зайцев, А.С. Ноздрачев // Транспортные сооружения. — 2024. — Т. 11, № 3. — URL: <https://t-s.today/07SATS324.html>. — DOI: [10.15862/07SATS324](https://doi.org/10.15862/07SATS324). — EDN: [STZYDC](https://edn.sci.org/EDN/STZYDC). (дата обращения: 12.12.2025).
3. Шанхоев, З.Ш. Применение конструктивно-технологического мероприятия на подтопляемых участках автомобильной дороги в условиях вечной мерзлоты / З.Ш. Шанхоев // Транспортные сооружения. — 2024. — Т. 11, № 4. — URL: <https://t-s.today/05SATS424.html>. — DOI: [10.15862/05SATS424](https://doi.org/10.15862/05SATS424). — EDN: [BRDFDQ](https://edn.sci.org/EDN/BRDFDQ). (дата обращения: 12.12.2025).
4. Кудрявцев, С.А. Учет солнечной радиации при численном моделировании теплофизических процессов промерзания и оттаивания вечномерзлых грунтов / С.А. Кудрявцев, Т.Ю. Вальцева, А.В. Кажарский, Ж.И. Котенко, В.Н. Парамонов, И.И. Сахаров // Construction and Geotechnics. — 2020. — Т. 11, № 4. — С. 20–32. — URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/1167>. — DOI: [10.15593/2224-9826/2020.4.02](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.4.02). — EDN: [TVNSRC](https://edn.sci.org/EDN/TVNSRC). (дата обращения: 12.12.2025).
5. Burgonutdinov A.M., Istomina K.R., Kleveko V.I. Experimental studies of physical and mechanical processes in seasonally frozen soils of constructions of automobile roads / A.M. Burgonutdinov, K.R. Istomina, V.I. Kleveko // Construction and Geotechnics. — 2022. — Т. 13, № 3. — С. 98–106. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49605279>. — DOI: [10.15593/2224-9826/2022.3.09](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2022.3.09). — EDN: [HXLCAX](https://edn.sci.org/EDN/HXLCAX). (дата обращения: 12.12.2025).
6. Клевеко, В.И. Выбор оборудования для проведения экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния армогрунтовых оснований и конструкций дорожных одежд / В.И. Клевеко, Е.И. Тетерин // Construction and Geotechnics. — 2023. — Т. 14, № 3. — С. 16–23. — URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/4070>. — DOI: [10.15593/2224-9826/2023.3.02](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2023.3.02). — EDN: [JAIRJQ](https://edn.sci.org/EDN/JAIRJQ). (дата обращения: 12.12.2025).

7. Патент № 2580549 С1 Российская Федерация, МПК Е 02 D 17/18. Автомобильная дорога на многолетнемерзлых грунтах: № 2015106446/03: заявл. 25.02.2015: опубл. 10.04.2016 / В.В. Воронцов, А.Н. Краев, М.Е. Игошин, Т.В. Пермитина; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет». — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37390027>. — EDN: [DJHSHI](https://elibrary.ru/item.asp?id=37390027). (дата обращения: 12.12.2025).
8. Игошин, М.Е. Моделирование температурного режима основания эксплуатируемой автомобильной дороги с учетом конструктивного решения по стабилизации границы многолетнемерзлых грунтов / М.Е. Игошин, М.В. Парамонов, В.В. Воронцов // Геотехника. — 2016. — № 3. — С. 34–41. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26280403>. — EDN: [WDCLJH](https://elibrary.ru/item.asp?id=26280403). (дата обращения: 12.12.2025).
9. Богомолов, А.Н. Оценка устойчивости нагруженного склона в сложных инженерно-геологических условиях / А.Н. Богомолов, В.Г. Офрихтер, А.В. Редин, О.А. Богомоллова, С.А. Богомолов // Construction and Geotechnics. — 2022. — Т. 13, № 4. — С. 70–85. — URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/3535>. — DOI: [10.15593/2224-9826/2022.4.06](https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/3535). — EDN: [ZJBKCN](https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/3535). (дата обращения: 12.12.2025).
10. Богомоллова, О.А. Расчет устойчивости системы "основание — насыпь" / О.А. Богомоллова, А.В. Жиделев // Construction and Geotechnics. — 2021. — Т. 12, № 4. — С. 19–36. — URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/1936>. — DOI: [10.15593/2224-9826/2021.4.02](https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/1936). — EDN: [CVBDHM](https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/1936). (дата обращения: 12.12.2025).
11. Богомоллова, О.А. Сезонные изменения величины коэффициента запаса устойчивости оползневого склона / О.А. Богомоллова, А.В. Жиделев // Construction and Geotechnics. — 2020. — Т. 11, № 3. — С. 77–88. — URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/948>. — DOI: [10.15593/2224-9826/2020.3.07](https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/948). — EDN: [OLPDOE](https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/948). (дата обращения: 12.12.2025).
12. Богомоллова, О.А. Определение угла наклона наиболее вероятной площадки разрушения в точке грунтового массива / О.А. Богомоллова, А.В. Жиделев // Construction and Geotechnics. — 2020. — Т. 11, № 1. — С. 20–29. — URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/711>. — DOI: [10.15593/2224-9826/2020.1.02](https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/711). — EDN: [VKLOJG](https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/711). (дата обращения: 12.12.2025).
13. Hakro M.R., Kumar A., Habib A.F., Ali M., De Azevedo A.R.G., Fediuk R., Sabri M.M.S., Salmi A., Awad Y.A. Numerical analysis of shallow foundations with varying and soil conditions / M.R. Hakro, A. Kumar, A.F. Habib [et al.] // Buildings. — 2022. — Vol. 12, No. 5. — Art. 693. — URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/5/693>. — DOI: [10.3390/buildings12050693](https://www.mdpi.com/2075-5309/12/5/693). — EDN: [WKWTVU](https://www.mdpi.com/2075-5309/12/5/693). (дата обращения: 12.12.2025).
14. Жусупбеков, А.Ж. Влияние особенностей работы расчетной схемы и ее входных параметров на величину деформаций грунтового массива / А.Ж. Жусупбеков, В.М. Улицкий, И.П. Дьяконов, М.В. Ершова // Вестник гражданских инженеров. — 2022. — № 6(95). — С. 47–55. — URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/sites/files/ru/articles/95/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F6.pdf>. — DOI: [10.23968/1999-5571-2022-19-6-47-55](https://vestnik.spbgasu.ru/sites/files/ru/articles/95/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F6.pdf). — EDN: [QKSCVM](https://vestnik.spbgasu.ru/sites/files/ru/articles/95/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F6.pdf). (дата обращения: 12.12.2025).

15. Lafifi B., Rouaiguia A., Soltani El.A. A novel method for optimizing parameters influencing the bearing capacity of geosynthetic reinforced sand using RSM, ANN, and multi-objective genetic algorithm / B. Lafifi, A. Rouaiguia, El.A. Soltani // *Studia Geotechnica et Mechanica*. — 2023. — Vol. 45, No. 2. — P. 174–196. — URL: <https://reference-global.com/article/10.2478/sgem-2023-0006>. — DOI: [10.2478/sgem-2023-0006](https://doi.org/10.2478/sgem-2023-0006). — EDN: [WMRMQE](https://www.edn.net/WMRMQE). (дата обращения: 12.12.2025).
16. Краев, А.Н. Песчаная армированная свая в водонасыщенных глинистых грунтах / А.Н. Краев, А.Н. Краев, В.В. Воронцов, Д.С. Скворцов. — М.: Знание-М, 2023. — 146 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50155825>. — ISBN: 978-5-00187-413-3. — EDN: [XRLOBQ](https://www.edn.net/XRLOBQ). (дата обращения: 12.12.2025).

Vorontsov Vyacheslav Viktorovich

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: variog08@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0141-7452>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=546740

Igoshin Mikhail Evgenyevich

«MSK Projekt», Moscow, Russia

E-mail: m.e.igoshin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3622-2234>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=761903

The combined use of geosynthetics and thermal stabilizers under the influence of long-standing surface water on a heterogeneous permafrost road base

Abstract. Decrees of the President of the Russian Federation defined the land territory of the Arctic zone of the Russian Federation, uniting 10 regions of our state. The foundations of state policy and the development strategy of this territory have been approved due to its colossal importance as a strategic resource base of our country. The Arctic zone is characterized by harsh climatic conditions, as well as the widespread distribution of permafrost soils, which determines the specifics of the design of engineering structures. The dynamic development of the state largely depends on the availability of transport infrastructure, including a network of high-quality roads. This determines the relevance and practical significance of the development and implementation of new design and technological solutions for the construction, repair and reconstruction of the road network. The article discusses a constructive solution using geosynthetic materials and seasonal cooling devices to stabilize cyclic deformations of the base, subgrade and pavement of a highway on permafrost. The specificity of the problem is the base, which is heterogeneous in cross section, represented by plastically frozen icy peat and plastically frozen sandy loam on one side of the longitudinal axis of the road structure and water-saturated sand of fine and medium size on the other. In the immediate vicinity of the roadbed embankment, long-standing surface waters are observed, melting the plastically frozen base soil. The results of calculations of the stability of the road structure in the Plaxis software package are presented, as well as the forecast of temperature fields at the base of the soil mass in Termoground. Authors comparison was made of the results of numerical modeling and geotechnical monitoring of a full-scale object after the implementation of the proposed solution.

Keywords: permafrost soils; highway; base; geosynthetic materials; thermal stabilization; geotechnical monitoring