

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.72

Обеспечение эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог в условиях Сибири и крайнего севера

А.М. Кулижников

Александр Михайлович Кулижников

Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт»
(ФАУ «РОСДОРНИИ»), Москва, Российская Федерация

kulizhnikov@rosdornii.ru

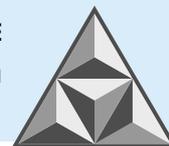


Сложные природно-климатические, неблагоприятные грунтово-гидрогеологические и криогенные условия Сибири и Крайнего Севера требуют особого подхода к проектированию дорожных конструкций. С учетом прогнозирования изменений климата, интенсивности и состава транспортного потока, возникает ряд неопределенностей на стадии проектирования, которые могут привести к неучтенной картине в процессе эксплуатации автомобильной дороги. Рассмотрены результаты прогнозирования и изменения эксплуатационных характеристик, а также георадиолокационных обследований на участках эксплуатируемых автомобильных дорог в жизненном цикле, сформулированы основные положения обеспечения эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог в Сибири во II и III дорожно-климатических зонах. Также для условий Крайнего Севера даны рекомендации по обеспечению эксплуатационной надежности с постановочной позицией, требующей проведения дополнительных углубленных мониторинговых обследований.

Ключевые слова: надежность, эксплуатация, проектирование, автомобильные дороги, криогенные условия, прочность

Для цитирования:

Кулижников А.М. Обеспечение эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог в условиях Сибири и Крайнего Севера // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 66-83. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023



SCIENTIFIC ARTICLE

Ensuring operational reliability in the design of highways in Siberia and the Far North

A.M. Kulizhnikov

Aleksandr M. Kulizhnikov

Federal Autonomous Institution «Russian road research institute», Moscow, Russia

kulizhnikov@rosdornii.ru

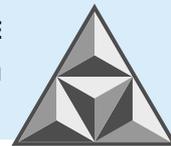


Complex natural and climatic, unfavorable soil-hydrogeological and cryogenic conditions of Siberia and the Far North require a special approach to the design of road structures. Taking into account the prediction of climate changes, the intensity and composition of traffic flow, a number of uncertainties arise at the design stage, which can lead to an unrealistic unaccounted picture during the operation of the highway. The article presents the criteria of operational reliability, the results of forecasting and changes in the operational characteristics of highways in the life cycle. It also provides the results of georadar surveys on the sections of operated highways, and concerns with the main provisions of ensuring operational reliability in the design of highways in Siberia in the II and III road-climatic zones. The results of the research give the recommendations for the conditions of the Far North. They are able to ensure operational reliability with a staged position requiring additional in-depth monitoring surveys.

Key words: reliability, operation, design, highways, cryogenic conditions, durability

For citation:

Kulizhnikov, A.M. (2023) Ensuring operational reliability in the design of highways in Siberia and the Far North, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 66-83 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023



ВВЕДЕНИЕ

Для решения вопросов обеспечения эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог, в первую очередь, необходимо обратить внимание на особенности условий Крайнего Севера. Крайний Север и Сибирь занимают более 60% территорий Российской Федерации, отличающихся экстремальными природно-климатическими условиями, слабо развитой инфраструктурой и сетью транспортных сообщений. На этой территории имеются большие запасы природных ресурсов (в том числе – неосвоенных) и проживает всего 7% населения. Жизнь здесь очень дорогая, затраты на строительство дорог – в два, а на эксплуатацию – в 10 раз выше, чем в центральной части России. Большие затраты в обслуживании автомобильных дорог определяют актуальность оценки эксплуатационной надежности на стадии проектирования.

С учетом длительных периодов эксплуатации (межремонтные сроки службы – 12 лет и сроки службы между капитальными ремонтами – 24 года), указанные особенности требуют достоверной картины при прогнозировании транспортного потока (состав, интенсивность движения) и детального изучения климатических, криогенных, геологических и гидрогеологических условий по длине трассы и в каждом поперечном сечении в полосе отвода.



Рис. 1. Продольные трещины, просадки земляного полотна, обусловленные оттаиванием многолетнемерзлых грунтов подстилающего основания; размывы паводковыми водами
Fig. 1. Longitudinal cracks, subsidence of the roadbed caused by thawing of permafrost soils of the underlying foundation; wash due to flood

Так, неоднородность подстилающих грунтов и криогенных условий приводит к продольному растрескиванию и образованию просадок на поверхности покрытия автомобильных дорог (рис. 1), усложнению водоотвода и размывам земляного полотна.



ПОНЯТИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Эксплуатационная надежность – это способность дорожной конструкции сохранять заданные эксплуатационные характеристики (продольная и поперечная ровность, прочность, шероховатость) в течение расчетного срока службы [1].

Вопросы обеспечения эксплуатационной надежности автомобильных дорог при проектировании во II и III дорожно-климатических зонах ранее рассмотрены в [1]. Большой вклад в их решение внесли российские исследователи А.П. Васильев, В.А. Веренько, В.А. Давыдов, В.Н. Ефименко, С.М. Жданова, И.А. Золотарь, М.С. Коганзон, О.А. Красиков, А.А. Малышев, В.П. Носов, В.В. Пассек, Р.З. Порицкий, Н.А. Пузаков, Н.Ф. Савко, В.А. Семенов, Ю.В. Слабодчиков, А.Я. Тулаев, А.А. Цернант и др. И все же повышению эксплуатационной надежности на стадии проектирования автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах уделяется недостаточное внимание. Не систематизированы многолетние (за последние 30 лет) мониторинговые исследования в условиях Крайнего Севера.

Например, при надежностном подходе прогнозирование влияния интенсивности и состава движения на срок службы дорожной одежды может выполняться в пределах максимально и минимально возможного значения, как и прогнозирование изменения климата (температура воздуха, количество осадков, глубина промерзания и т.д.), положения уровня грунтовых и поверхностных вод. Различным сценариям должны соответствовать индивидуальные значения надежности для дорожной одежды, соответствующие дифференцированным значениям коэффициентов прочности.

Пункт 7.1.2 ГОСТ Р 59120-2021 гласит: «Дорожные одежды автомобильных дорог должны быть запроектированы так, чтобы обеспечивать безотказную работу в течение расчетного межремонтного и расчетного срока службы дорожной одежды со значениями предельного коэффициента разрушения (табл. 1), назначаемого на последний год межремонтного срока в зависимости от капитальности дорожной одежды и категории дороги» [2].

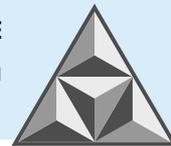
Таблица 1. Предельный коэффициент разрушения в зависимости от капитальности дорожной одежды и категории автомобильной дороги [2]

Table 1. The maximum coefficient of destruction depending on the capital of the pavement and the category of the highway [2]

Тип дорожной одежды	Категория дороги	Предельный коэффициент разрушения
Капитальный	IA, IB, IB, II	0.10
	III, IV	0.2
Облегченный	III, IV, V	0.3
Переходный	IV, V	0.4

На сегодняшний день особенности условий Крайнего Севера здесь не учтены. Следовательно, за счет дополнительного увеличения затрат на строительство и содержание автомобильных дорог предстоит добиваться установленных требований, в том числе и по предельному коэффициенту разрушения.

Интегральной характеристикой надежности дорожной конструкции является уровень надежности, характеризующий вероятность ее отказа (в зависимости от достоверности прогнозирования воздействий на автомобильную дорогу транспортного потока и учета климатических, криогенных, геологических и гидрогеологических условий) в течение расчетного срока службы, с учетом предельного коэффициента разрушения.



КРИТЕРИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Следует обратить внимание на критерии эксплуатационной надежности автомобильных дорог:

- работоспособность;
- срок службы дорожной одежды. ГОСТ Р 58861-2020 [3];
- степень резервированности по прочности;
- ремонтпригодность.

Особого внимания заслуживают два последних критерия.

Критерий «степень резервированности по прочности во II и III дорожно-климатических зонах» свидетельствует о том, что по мере истираемости и потери прочности покрытия слоев дорожной одежды функции по обеспечению прочности должны брать на себя резервные элементы. Таковыми могут быть, например, слои основания дорожной одежды, прочность которых должна увеличиваться по мере эксплуатации за счет укрепления минеральных слоев основания минеральными вяжущими или активными золошлаковыми смесями. Другой пример – устройство самовосстанавливающихся конструктивных слоев дорожной одежды, например, органоминеральных смесей типа черного щебня. Однако в условиях Крайнего Севера основным звеном обеспечения прочности и надежности дорожных конструкций являются неоднородные подстилающие и пылеватые грунты земляного полотна, стабильность свойств которых в условиях периодического оттаивания многолетнемерзлых грунтов гарантировать крайне сложно. Степень резервированности в условиях Крайнего Севера можно достигаться, в основном, за счет обеспечения устойчивости земляного полотна. Необходимо избегать продольного растрескивания, образования таликовых зон, просадок и размывов подстилающих грунтов и грунтов земляного полотна (при сохранности многолетнемерзлых грунтов, обеспечении поверхностного водоотвода от земляного полотна).

Во II и III дорожно-климатических зонах целесообразно придерживаться концепции «вечных дорог» [4, 5], в которую заложен принцип прочных и надежных оснований, позволяющих в процессе эксплуатации заменять изношенные слои покрытия. Целесообразно внедрять саморегулирование (самодиагностику) на базе нейронных сетей, когда «умная дорога» на основе оснащения комплексом датчиков с использованием экспертных систем обнаруживает и предупреждает о возникновении повреждений, сигнализирует о необходимости ремонтных работ. Такие работы успешно ведутся за рубежом. В Российской Федерации сотрудники Московского автодорожного института используют отдельные элементы самодиагностики автомобильных дорог по условиям колеобразования на основе регистрации транспортного потока и прогнозирования глубины колеи в процессе эксплуатации.

В условиях Крайнего Севера ремонтпригодность достигается за счет внедрения инновационных решений по сохранению многолетнемерзлых грунтов (в частности, дополнительного замораживания в теплый период года), диагностирования температурного режима грунтов основания насыпи и земляного полотна в трехмерном пространстве (по глубине дорожных конструкций и в поперечном направлении) и обеспечения поверхностного водоотвода от земляного полотна.



ОПЫТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрим, как изменяются эксплуатационные характеристики дорожных конструкций в процессе эксплуатации.

Попытки прогнозирования состояния таких конструкций осуществляют давно. Так, например, согласно результатам изучения участков автомобильной дороги М-4 «Дон» с применением аппарата цепей Маркова [6], предполагается, что на 18-й год службы примерно 22% участка будут находиться в неудовлетворительном состоянии; гарантия срока выдержки до капитального ремонта, с учетом коэффициента предельного разрушения, отсутствует.

Известен прогноз формирования теплового поля под проектной насыпью автомобильной дороги Надым-Салехард [7], выполненный по программе «Qfrost», который показал, что на третий год эксплуатации возможно развитие талика мощностью до 3.5 м в связи с негативным отепляющим влиянием снегонакопления у откосов земляного полотна. На пониженных обводненных участках трассы Северного широтного хода образование новых таликов (мощность может достигать до 15–20 м) также представляется неизбежным; при этом мерзлота отличается неоднородностью по длине дороги и имеет прерывистый характер [7].

Исследования показали, что после оттаивания мерзлый грунт находится преимущественно в текуче-пластичном состоянии, не пригодном для воздействия транспортных нагрузок (показатель текучести почти вдвое больше, чем у талых грунтов). Это приводит к низкой несущей способности грунтов основания и, как следствие, образованию просадок [7].

Стабильность основания насыпи не обеспечивается даже в исходном состоянии; возникают дополнительные нагрузки от насыпи и воздействия транспортного потока. Негативные процессы развития талика усугубляются в процессе строительства. По результатам численного моделирования напряженного состояния земляного полотна на переувлажненных участках автомобильной дороги Надым – Салехард установлены максимальные напряжения сдвига и наибольшие деформации под откосами насыпей.

Если перейти от прогнозирования состояния автомобильных дорог к фактическим результатам [8], средний модуль упругости для трех замеров на одном из километров автомобильной дороги М4 «Дон» в различные годы (с октября 2014 по октябрь 2016 г.) в осенний период снизился с 1447 до 995 МПа. Таким образом, несущая способность снижается почти в 1.5 раза, что очень существенно.

Согласно результатам исследований [9], на автомобильной дороге «Россия» за четыре года эксплуатации продольная ровность покрытия по IRI изменилась с 3.1-4.6 до 4.7-6.3 м·км⁻¹, то есть ухудшилась более чем в 1.5 раза. Эти примеры характерны для Европейской части Российской Федерации, где отсутствуют многолетнемерзлые грунты, в то время как в условиях Крайнего Севера такое снижение прочности и ровности будет значительно выше.

Снижению продольной ровности соответствует и потеря прочности дорожной конструкции, что показано [10] сначала по результатам прогнозирования (рис. 2), а затем подтвердилось результатами экспериментальных измерений на участках автомобильных дорог различных технических категорий.

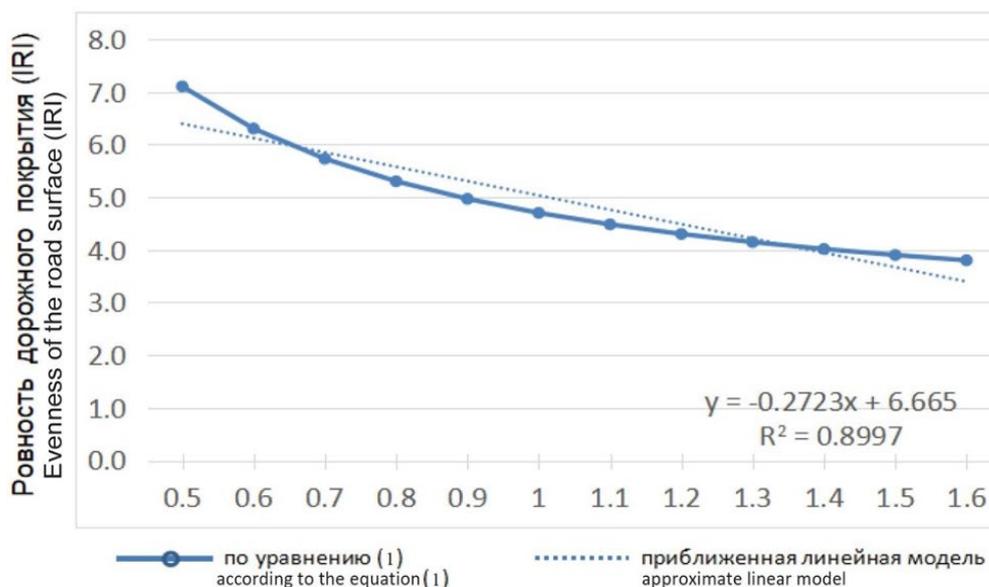


Рис. 2. График зависимости ровности дорожного покрытия от коэффициента прочности дорожной конструкции автомобильной дороги II категории

Fig. 2. Dependence graph of road surface evenness on strength coefficient of the road structure of a category II

На автомобильных дорогах проводились исследования глубины колееобразования [11], при этом изучалось влияние шипованной резины, воздействие интенсивности и состава транспортного потока. В связи с этим пункт 7.6 ГОСТ Р 59120-2021 [2] гласит: «Конструкцию дорожной одежды при проектировании необходимо проверять расчетами на устойчивость к образованию колеи в процессе эксплуатации автомобильной дороги». Однако вопросы преждевременного образования колеи в условиях Крайнего Севера при коротком теплом периоде и невысоких температурах на поверхности покрытия хотя и возникают, но являются менее актуальными, чем таковые, возникающие во II-IV дорожно-климатических зонах.

В процессе эксплуатации автомобильной дороги техническое состояние, прочность и ровность автомобильной дороги ухудшаются, и принятые проектные решения в условиях Крайнего Севера часто не обеспечивают нормативные сроки службы дорожных одежд. Следовательно, на стадии проектирования автомобильных дорог необходимо дифференцированно прогнозировать и учитывать изменение эксплуатационных характеристик автомобильных дорог.

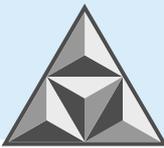
В [12] рассмотрены способы учета эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения (НИД).

В США расчет потери эксплуатационной надежности учитывает допустимое колееобразование в слое покрытия и износ щебеночного слоя покрытия. Также при проектировании принимается во внимание коэффициент эксплуатационной надежности при расчете нежестких и жестких дорожных одежд, который достигает 1.5.

В Канаде прочность и эксплуатационная надежность дорожных одежд автомобильных дорог с НИД включает проверку на колееобразование, коррелируется с расчетами на морозостойкость и осушение.

В Финляндии допускается сумма определенных повреждений до следующего ремонта, предусматривается предотвращение образования колеи до допустимого значения, а также возникновение неровностей, вызванных просадкой и морозным пучением.

В России на автомобильных дорогах с НИД дорожная одежда, рассчитанная на прочность (по остаточным деформациям), проходила проверку на эксплуатационную надежность



по следующим условиям: колееобразование, истирание и износ материала покрытия, морозное пучение и осушение. На сегодняшний день на дорогах общего пользования, согласно ПНСТ 542-2021 [13], выполняются проверки только на морозоустойчивость и осушение дорожной одежды.

На основе приведенного анализа можно рекомендовать следующее. Дорожная одежда, рассчитанная на прочность, должна пройти проверку на эксплуатационную надежность по условиям: обеспечение продольной ровности и колееобразование (поперечная ровность); износ материала покрытия; морозного пучение и осушение дорожной одежды. Для условий Крайнего Севера целесообразно добавить проверку на устойчивость грунтов к просадкам, образованию и развитию таликовых зон, возникновению продольных трещин и предотвращению размывов поверхностными водами.

ДЕЙСТВУЮЩИЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

Ниже представлен перечень действующих на сегодняшний день нормативно-технических документов по проектированию дорог в условиях Крайнего Севера:

1. СП 313.1325800.2017 Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства;
2. ОДМ 218.2.095-2019 Методические рекомендации по проектированию земляного полотна на вечной мерзлоте с использованием местных грунтов;
3. ГОСТ 33149-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог в сложных условиях.
4. Методические рекомендации по применению конструктивных мероприятий для сохранения вечномерзлых грунтов в основаниях земляного полотна и искусственных сооружений на автомобильных дорогах центральной Якутии (ООО ЦНИИС, ОАО «ТРАНДОРПРОЕКТ»).
5. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования.

На основании указанной документации разрабатываются проектные решения (в том числе – направленные на сохранение многолетнемерзлых грунтов), однако проверка эксплуатационной надежности на стадии проектирования в документах не предусмотрена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФАУ РОСДОРНИИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Автор настоящей работы имеет многолетний опыт обследования с использованием георадаров автомобильных дорог (водно-тепловой режим) и разведки запасов в притрассовых карьерах на автомобильных дорогах «Колыма», в Республиках Бурятия, Саха (Якутия), Коми, Ямало-Ненецком округе, а также в Мурманской и Архангельской областях. В ходе обследований неразрушающий георадиолокационный метод показал высокую эффективность при определении внутреннего строения дорожных конструкций, в ходе исследования водно-теплого режима грунтов земляного полотна и подстилающего основания, выявления ослабленных зон в дорожных конструкциях, определения причин потери прочности и разрушения дорожных конструкций.

Способы повышения эксплуатационной надежности были установлены по результатам исследований оценки прочности дорожной одежды совместно с георадарным сканированием внутреннего строения дорожных сооружений. В георадарных обследованиях в различные годы



принимали участие также сотрудники ФАУ «РОСДОРНИИ» (г. Москва) Р.Р. Денисов, Р.А. Еремин, Е.О. Зверев, А.О. Кузнецов, Н.Г. Пудова.

Внутреннее строение дорожных конструкций определялось по радарограммам с помощью одноканальных импульсных георадаров, а в последние годы – двухканальных георадаров и шестиканального георадарного комплекса (рис. 3). Динамические прогибы и модуль упругости оценивали с помощью установки динамического нагружения FWD (рис. 4).



Рис. 3. Мобильная дорожная лаборатория ФАУ «РОСДОРНИИ» с шестиканальным георадарным комплексом

Fig. 3. Mobile road laboratory of the FAA "ROSDORNII" with a six-channel georadar complex



Рис. 4. Установка динамического нагружения FWD
Fig.4. FWD dynamic loading machine

Шестиканальный георадарный комплекс позволяет за один проход восстанавливать пространственное изображение дорожной конструкции по всей ширине георадарного комплекса, оценивать толщины слоев и определять местоположение ослабленных зон.

Испытания, проведенные в 2022 г. совместно с ГК «АВТОДОР» на вновь построенном участке автомобильной дороги М-12 Москва-Казань, показали, что модули упругости на поверхности дорожной одежды изменяются в пределах 300 МПа (рис. 5).

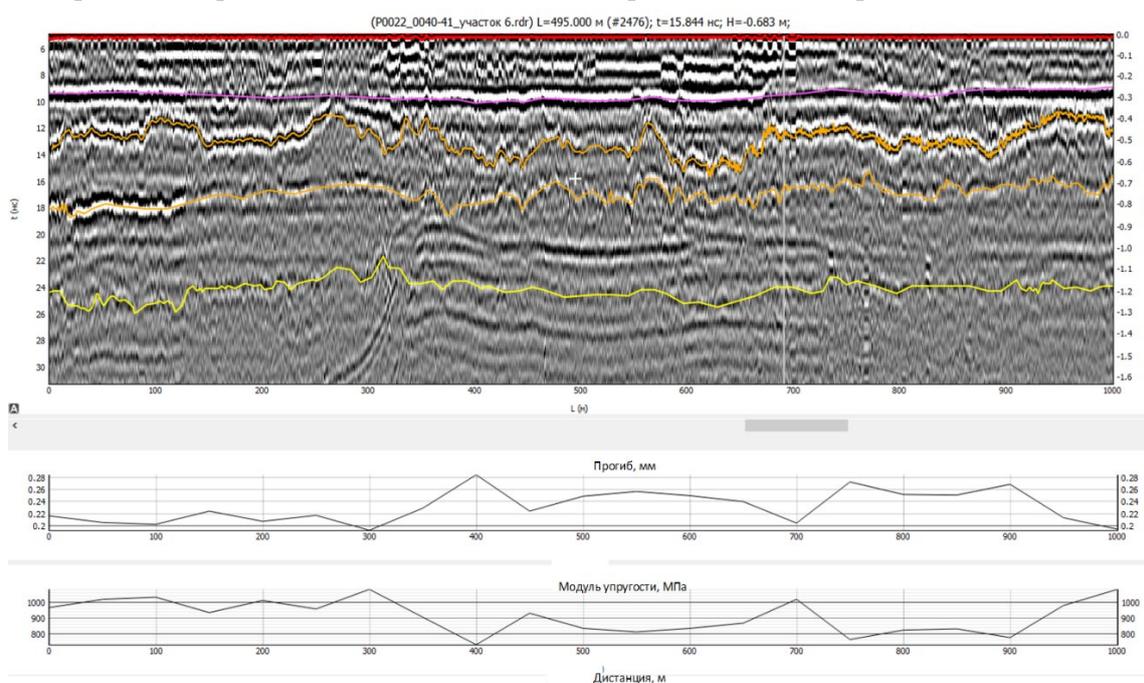


Рис. 5. Радарограмма и графики зависимости динамического прогиба и модуля упругости на участке автомобильной дороги М-12 протяженностью 1000 км
Fig. 5. Radarogram and dependence graphs of the dynamic deflection and modulus of elasticity on a section of the M-12 highway with a length of 1000 km



Несмотря на неоднородность по прочности на поверхности рабочего слоя земляного полотна и основания, подстилающего земляное полотно, требуемые модули упругости на поверхности покрытия дорожной одежды были обеспечены. В процессе эксплуатации под воздействием транспортной нагрузки в расчетный период могут возникать различные сопротивления нагрузкам по длине автомобильной дороги и, как результат, преждевременные разрушения в процессе эксплуатации. Чтобы обеспечить однородность по прочности, при проведении инженерных изысканий необходимо оценить деформационные характеристики грунтов подстилающего основания, предусмотреть усиление и укрепление участков со слабыми грунтами и рассчитать модуль упругости на поверхности рабочего слоя земляного полотна, который должен иметь низкие значения вариации по длине автомобильной дороги.

Результаты георадарных обследований, проведенные ФАУ «РОСДОРНИИ» (г. Москва) на автомобильной дороге «Колыма» [14] с целью выявления однородности подстилающих грунтов и грунтов земляного полотна, отражают данные на рис. 6, 7. Выявленные ослабленные зоны (рис. 7, темно-синий цвет) неравномерно распределены как по длине, так и по глубине продольного разреза (протяженностью 900 м), что объясняется различным сопротивлением нагрузкам от движения транспортных средств.

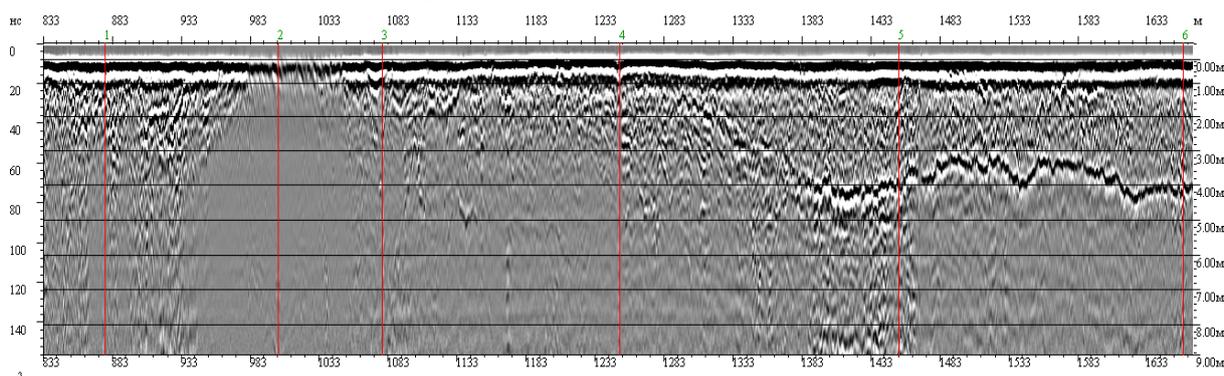


Рис. 6. Фрагмент радарограммы продольного разреза на отрезке участка автомобильной дороги «Колыма»

Fig. 6. Fragment of a radar image of a longitudinal section on a segment of the Kolyma highway

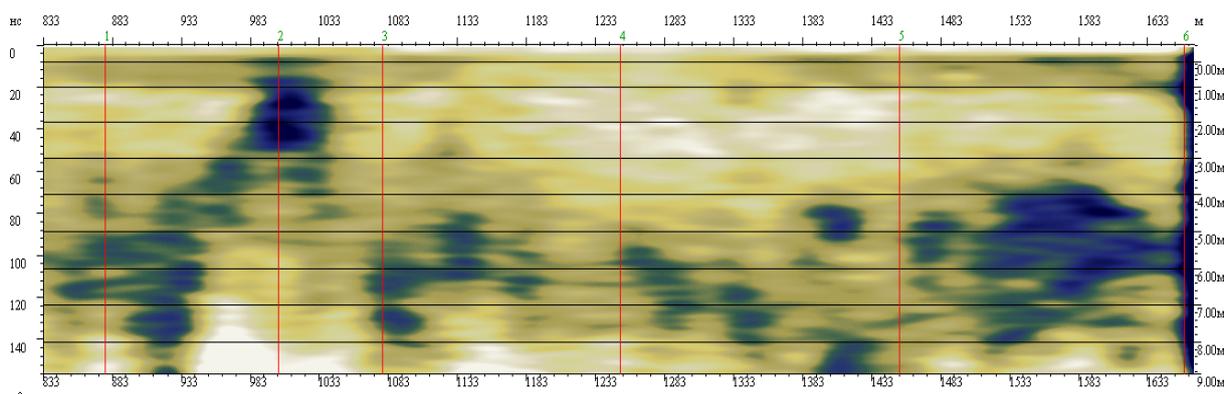


Рис. 7. Продольный профиль после обработки методом частотного анализа на том же отрезке (см. рис. 6) с выделением ослабленных зон (темно синий цвет)

Fig. 7. The longitudinal profile after processing by the method of frequency analysis on the same segment (see Fig. 6) with the allocation of weakened zones (dark blue)

Возможности диагностирования георадарами криогенных процессов в грунтах оснований автомобильных дорог оценивались в Якутии специалистами Института горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН под руководством Л.Л. Федоровой [15]. По радарограммам



определяются области сильнообводненных талых грунтов, а также включения линз мерзлых грунтов в грунтовые основания из талых грунтов на участках автомобильных дорог.

Опыт работ сотрудников ФАУ «РОСДОРНИИ» (г. Москва) по определению георадиолокационными методами состояния грунтов, подстилающих земляное полотно, отражает рис. 8. На рис. 8, *a* приведена радарограмма с выделенными синим фоном ослабленными зонами, определенными по максимальной энергии сигнала (рис. 8, *б*) и минимальными значениями частоты сигнала (рис. 8, *в*). Характерно, что ослабленные зоны на радарограмме могут быть определены не только по качественным визуальным признакам, но и по количественным характеристикам.

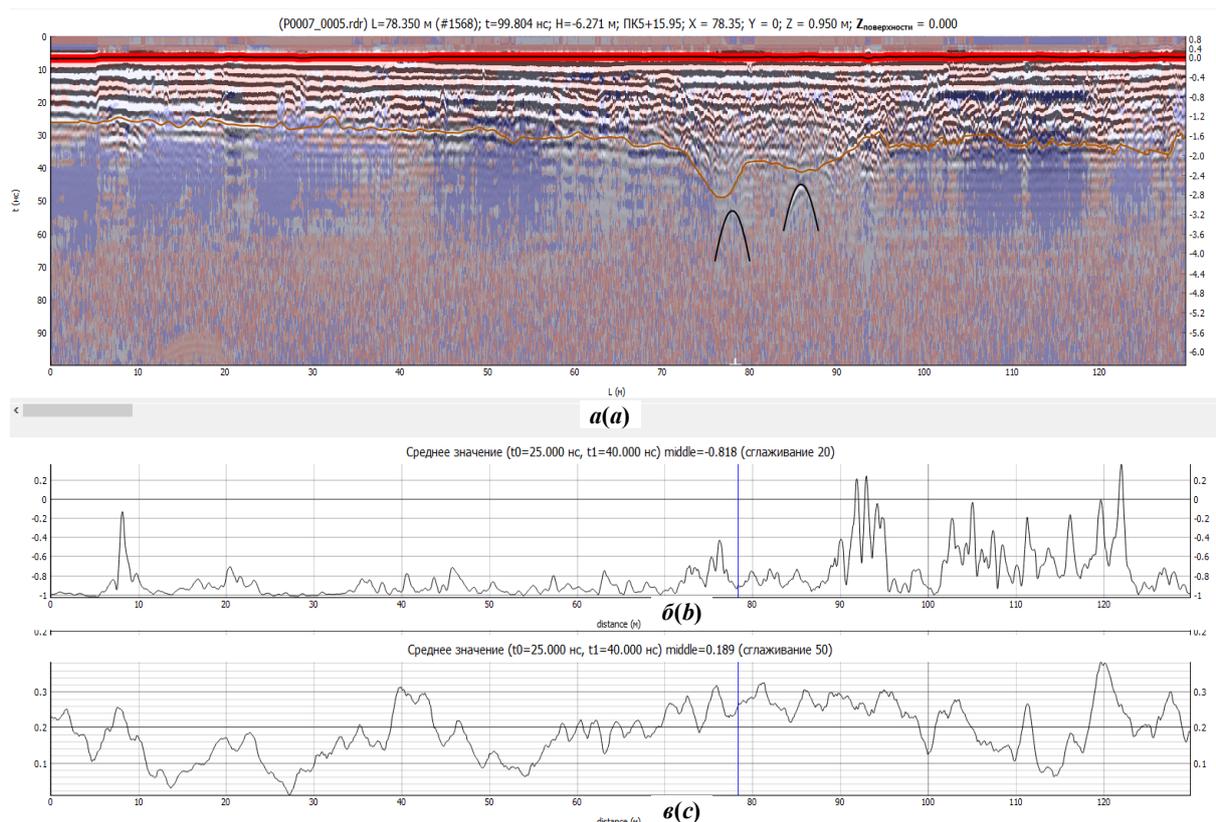


Рис. 8. Радарограмма и графики энергии и частоты электромагнитного сигнала на протяжении участка автомобильной дороги: *a* – радарограмма, *б* – энергия электромагнитного сигнала, *в* – частота электромагнитного сигнала

Fig. 8. Radarogram and graphs of the energy and frequency of the electromagnetic signal throughout the section of the highway: *a* – radarogram, *b* – the energy of the electromagnetic signal, *c* – the frequency of the electromagnetic signal

В 2019 г. совместно с ГК «АВТОДОР» также проведены первые испытания на участке автомобильной дороги А-107 «ММК» [16] в сопоставлении с типовыми и опытными конструкциями дорожных одежд и различными геосинтетическими материалами. По результатам получены радарограммы и построен график зависимости модуля упругости по длине участка дороги (рис. 9).

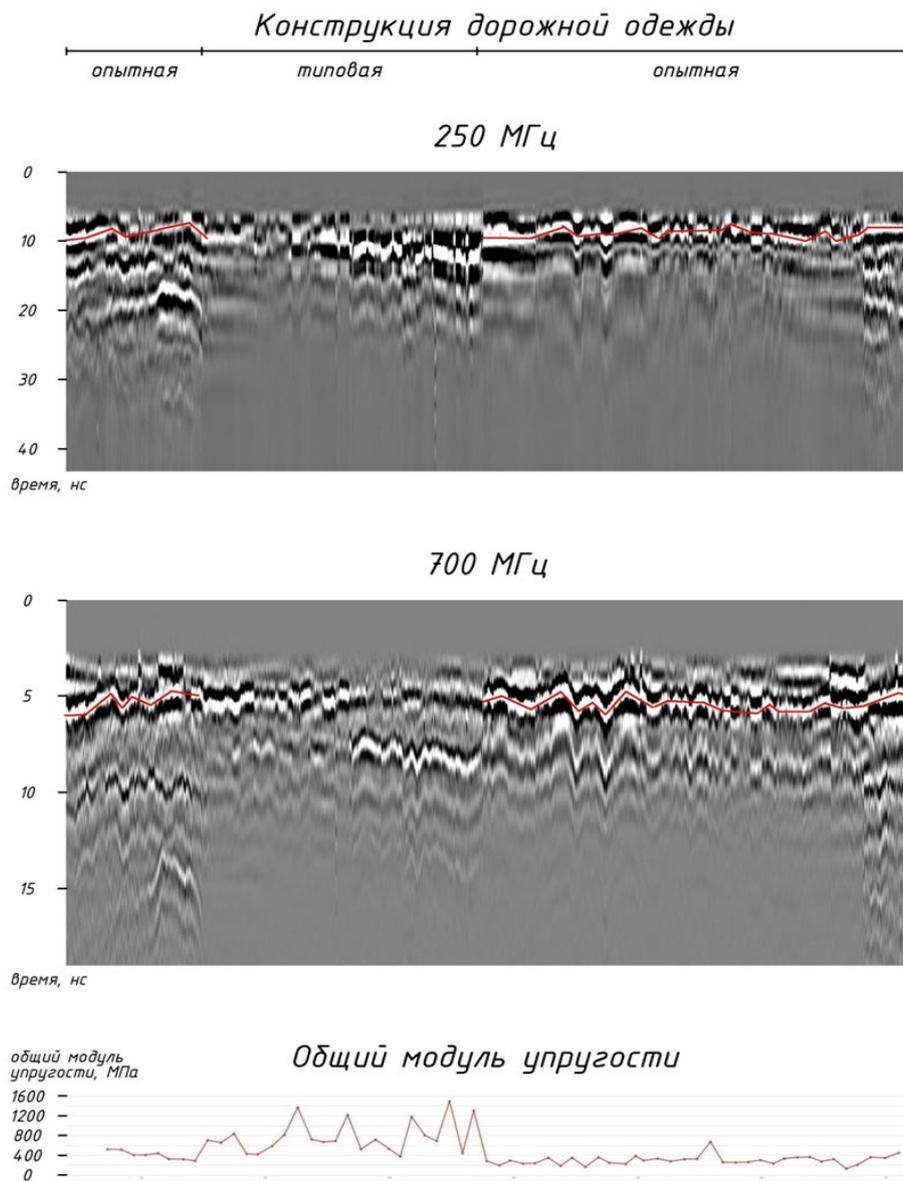


Рис. 9. Радарограммы при центральной частоте антенного блока 250 и 400 МГц и график зависимости модуля упругости по длине обследуемого участка автомобильной дороги.

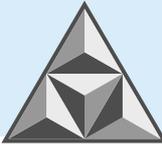
Красные линии – местоположение геосинтетических материалов.

Fig. 9. Radarograms at the central frequency of the antenna unit 250 and 400 MHz and dependence graph of the modulus of elasticity along the length of the highway surveyed section. Red lines are the location of geosynthetic materials.

По результатам динамического нагружения и георадиолокационных работ выявлено следующее:

– в типовых конструкциях модуль упругости выше, чем в опытных конструкциях с геосинтетическими материалами; в то же время коэффициент вариации модуля упругости в опытных конструкциях значительно меньше, чем в типовых конструкциях; это свидетельствует об однородности по прочности опытных конструкций с геосинтетическими материалами и отсутствию однородности по прочности типовых конструкций;

– местоположение геосинтетического материала, в отличие от других дорожно-строительных материалов, выражено на радарограммах ярко, так как слой способствует



некоторой аккумуляции влаги; об этом свидетельствует повышенная амплитудой сигнала на поверхности данного слоя и снижение общего модуля упругости на поверхности покрытия дорожной одежды;

– укладка геосинтетических материалов в основание насыпи и рабочие слои земляного полотна способствует повышению однородности дорожных конструкций по прочности.

Имеется также положительный опыт по применению георешеток с теплоизолирующим наполнителем [17] для предотвращения растепления многолетнемерзлых грунтов в условиях Крайнего Севера и их армирования.

В 2006-2007 гг. ФАУ «РОСДОРНИИ» (г. Москва) выполнило работы по заданию Федерального дорожного агентства на тему «Исследование надежности дорожных конструкций автомобильных дорог в зоне многолетнемерзлых грунтов с разработкой методических рекомендаций по конструированию и расчету дорожных одежд и земляного полотна» [14]. По результатам исследований был подготовлен проект ОДМ «Методические рекомендации по конструированию и расчету дорожных одежд и земляного полотна при проектировании автомобильных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов». В отчете представлены: типовые конструкции земляного полотна и технологические решения, применяемые при каждом из трех принципов проектирования; конструктивные решения по повышению прочности дорожной одежды и обеспечению устойчивости откосов; рекомендации по использованию различных видов геосинтетических материалов. Основные положения указанного проекта легли в основу решений по повышению эксплуатационной надежности автомобильных дорог.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Способы повышения эксплуатационной надежности при проектировании можно разделить:

- с применением инновационных материалов и технологий;
- с использованием известных конструктивных решений.

Такие способы целесообразно также классифицировать в зависимости от обеспечения эксплуатационных характеристик (прочность дорожной одежды, ровность поверхности покрытия, шероховатость материала покрытия, устойчивость грунтов земляного полотна).

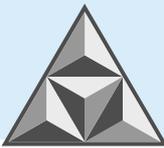
Обеспечение прочности и продольной ровности должно достигаться на всем протяжении дорожного полотна. В условиях Крайнего Севера следует предусмотреть:

- сохранение многолетнемерзлых грунтов основании насыпей;
- усиление участков со слабыми грунтами и зонами (с использованием армирующих слоев, в том числе из геосинтетических материалов),
- устройство легких и невысоких насыпей, стадийное строительство, строительство эстакад.

Основные решения в условиях Крайнего Севера:

– регулирование мерзлотных условий с помощью сезонно-охлаждающих установок и оборудования для терморегулирования – тепловых экранов, амортизаторов (аккумуляторов), диодов и трансформаторов, вентиляционных труб, геокомпозитных слоев, а также поверхностного водоотвода от земляного полотна [7, 17-21];

– запроектированная дорожная одежда должна отвечать критериям резервированности и ремонтпригодности, в том числе за счет обеспечения устойчивости подстилающих грунтов в основании насыпи и грунтов земляного полотна;



- расчетные характеристики дорожно-строительных материалов должны назначаться с учетом уровня надежности и сроков службы дорожной одежды;

- достижение требуемых модулей упругости и однородности по прочности на поверхности рабочего слоя земляного полотна.

Обеспечение поперечной ровности достигается путем:

- разработки новой или усовершенствование известной методики расчета глубины колеи;
- применения в дорожных покрытиях материалов, устойчивых к низким температурам и пластическому деформированию при высоких температурах, а также износостойких;

- армирования основания земляного полотна на слабых грунтах и (или) рабочего слоя земляного полотна армирующими, в том числе – геосинтетическими материалами;

- достижения однородности по прочности в поперечном направлении на поверхности рабочего слоя земляного полотна и поверхности подстилающего основания насыпей.

Обеспечение шероховатости (коэффициента сцепления) достигается за счет выполнения работ по своевременной замене защитных слоев и слоев износа.

Основная задача учета эксплуатационной надежности при проектировании – проверка сроков службы расчетной конструкции дорожной одежды по результатам анализа прочности и ровности в процессе эксплуатации с учетом изменения интенсивности движения и состава транспортного потока, климатических условий в течение нормативного срока службы дорожной одежды. В условиях Крайнего Севера крайне важным является сохранение многолетнемерзлых грунтов в основаниях насыпей с учетом прогнозирования изменения климатических и криогенных условий, водно-теплового режима в срок службы автомобильной дороги, а также обеспечение поверхностного водоотвода от земляного полотна.

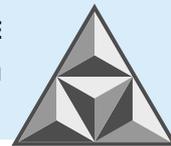
ВЫВОДЫ

Дорожная одежда на стадии проектирования должна пройти проверку на эксплуатационную надежность по критериям: обеспечение продольной ровности; колеобразование; износ материала покрытия; морозное пучение и осушение дорожной одежды. Для условий Крайнего Севера дополнительно рекомендуется ввести критерии: устойчивость грунтов к просадкам, продольному растрескиванию, образованию таликовых зон и размывам паводковыми водами.

Запроектированная дорожная одежда должна отвечать критериям резервированности и ремонтпригодности. Для Крайнего Севера целесообразно подготовить многолетнюю научно-техническую программу повышения эксплуатационной надежности, оборудовать опытные участки и провести мониторинговые обследования автомобильных дорог с различными сроками эксплуатации (в том числе – с использованием георадиолокационного оборудования).

Обеспечение прочности и продольной ровности на всем протяжении автомобильной дороги может быть достигнуто за счет постоянства показателей на поверхности основания, подстилающего насыпь по длине дороги. Обеспечение же поперечной ровности достигается проверкой на колеобразование с применением в дорожных покрытиях материалов, устойчивых к пластическому деформированию и износу, а также армирующих слоев (в том числе – из геосинтетических материалов).

Обеспечение прочности на поверхности основания, подстилающего земляное полотно, достигается сохранением многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей. При этом целесообразно усиливать участки дорог с ослабленными грунтами и зонами путем использования геосинтетических материалов.



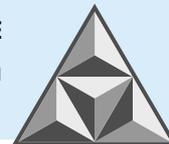
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кулижников А.М.** Повышение сроков службы дорожной одежды за счет учета эксплуатационной надежности // *Дорожная держава*. 2023. № 115. С. 16-21.
2. ГОСТ Р 59120-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования.
3. ГОСТ Р 58861-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт. Планирование межремонтных сроков.
4. **Радовский Б.С.** Концепция вечных дорожных одежд // *Дорожная техника*. 2011. № 11. С. 132–144.
5. **Кулижников А.М.** Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог // *Транспорт Российской Федерации*. 2018. № 2 (75). С. 46-50.
6. **Тиратурян А.Н., Белоусов Е.С., Шаталов В.Ю.** Имитационное моделирование ухудшения эксплуатационного состояния нежестких дорожных конструкций на основе вероятностного подхода // *Инженерный вестник Дона*. 2016. № 3. С. 1-9.
7. **Луцкий С.Я., Ландсман А.Я., Шепитько Т.В., Бурукин А.Ю.** Развитие транспортной инфраструктуры Арктики // *СТТ DIGEST*. 2019. № 6. URL: <https://www.wilmix.ru/o-kompanii/statyi/98-razvitie-transportnoj-infrastruktury-arktiki/?ysclid=llxmhxnasl663198724>
8. **Тиратурян А.Н., Ольховой С.А.** Оценка деградации прочности нежесткой дорожной конструкции на основе натуральных измерений на участке автомобильной дороги М4 «Дон» п. Тарасовский // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160>
9. **Красиков О.А.** Ровность покрытий нежестких дорожных одежд. М.: ГосИНТИ, 2019. 317 с.
10. **Буртыль Ю.В., Капский Д.В.** Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т. 19, № 4 (86). С. 570-583.
11. **Тиратурян А.Н.** Мониторинг состояния нежестких дорожных конструкций на основе анализа диссипативных процессов при их деформировании: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов на Дону, 2020. 336 с.
12. **Кулижников А.М., Каптур С.А.** Зарубежные методы расчета дорожных одежд с НИД // *Автомобильные дороги*. 2016. № 12. С. 31-34.
13. ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования.
14. **Кулижников А.М.** Исследование дорожных конструкций на многолетнемерзлых грунтах // *Дороги и мосты*. 2009. Вып. 2/22. С. 89-110.
15. **Федорова Л.Л., Саввин Д.В., Федоров М.П.** Возможности диагностики криогенных процессов в грунтах оснований автодорог методом георадиолокации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2017. № 7. С. 195-202
16. **Кулижников А.М., Еремин Р.А., Кузнецов А.О.** Влияние характеристик границ контакта слоев на прочность дорожной одежды // *Дороги и мосты*. 2019. Вып. 2/42. С. 90-103
17. **Пшеничникова Е.С.** Особенности применения геосинтетических материалов в зоне вечной мерзлоты // *Дороги. Инновации в строительстве*. 2018. № 67. С. 28-32.
18. **Цернант А.А.** Сооружение земляного полотна: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1998. 100 с.
19. Методические рекомендации по применению конструктивных мероприятий для сохранения вечномерзлых грунтов в основаниях земляного полотна и искусственных сооружений на автомобильных дорогах центральной Якутии. М.: ЦНИИС, 2010. 89 с.
20. **Гулько О.Н.** Анализ методов строительства конструкций земляного полотна в районах Вечной мерзлоты в России и США // *Проектирование автомобильных дорог: сб. науч. тр. / МАДИ*. М.: МАДИ, 2003.
21. **Макаров А.С., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш.** Конструктивно-технологические решения по устройству автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/17SATS418.pdf> (доступ свободный)

Поступила в редакцию 03.08.2023

Одобрена после рецензирования 18.09.2023

Принята к опубликованию 21.09.2023



REFERENCES

1. **Kulizhnikov, A.M.** (2023) Increasing the service life of road clothing by taking into account operational reliability, *Dorozhnaya derzhava*, (115), pp.16-21 (in Russian).
2. GOST R 59120-2021. (2021) *Public roads. Travel clothes. General requirements* (in Russian).
3. GOST R 58861-2020. (2020) *Public automobile roads. Major repairs and repairs. Planning of inter-repair periods* (in Russian).
4. **Radovskiy, B.S.** (2011) The concept of eternal road clothes, *Dorozhnaya tekhnika*, (11), pp. 132-144 (in Russian).
5. **Kulizhnikov, A.M.** (2018) Ways to increase the inter-repair service life of highways, *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2 (75), pp. 46-50 (in Russian).
6. **Tiraturyan, A.N., Belousov, E.S. & Shatalov, V.Yu.** (2016) Simulation modeling of deterioration of the operational condition of non-rigid road structures based on a probabilistic approach, *Inzhenerniy vestnik Dona*, (3), pp. 1-9 (in Russian).
7. **Lutskiy, S.Ya., Landsman, A.Ya., Shepitko, T.V. & Burukin, A.Yu.** (2019) Development of the Arctic transport infrastructure, *CTT DIGEST*, (6) [online]. Available at: <https://www.wilmix.ru/o-kompanii/statyi/98-razvitiye-transportnoj-infrastruktury-arktiki/?ysclid=llxmhxnasl663198724> (in Russian).
8. **Tiraturyan, A.N. & Ol'hovoy, S.A.** (2017) Assessment of the degradation of the strength of a non-rigid road structure based on full-scale measurements on the section of the M4 highway "Don" v. Tarasovsky, *Inzhenerniy vestnik Dona*, (2) [online]. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160> (in Russian).
9. **Krasikov, O.A.** (2019) *Evenness of coatings of non-rigid road clothes*. M.: GosINTI (in Russian).
10. **Burtyl, Yu.V. & Kapskiy, D.V.** (2022) Modeling of the relationship between the evenness and strength of non-rigid road clothes on the basis of theoretical and practical studies, *Vestnik SibADI*, 19 (4-86), pp. 570-583 (in Russian).
11. **Tiraturyan, A.N.** (2020) *Monitoring of the state of non-rigid road structures based on the analysis of dissipative processes during their deformation*. PhD. Rostov na Donu (in Russian).
12. **Kulizhnikov, A.M. & Kaptur, S.A.** (2016) Foreign methods of calculating road clothes with NID, *Avtomobilnyye dorogi*, (12), pp. 31-34 (in Russian).
13. PNST 542-2021 (2021) *Public roads. Non-rigid travel clothes. Design rules* (in Russian).
14. **Kulizhnikov, A.M.** (2009) Investigation of road structures on permafrost soils, *Dorogi i mosty*, (2/22), pp. 89-110 (in Russian).
15. **Fedorova, L.L., Savvin, D.V. & Fedorov, M.P.** 2017 Possibilities of diagnostics of cryogenic processes in the soils of the bases of highways by the method of georadiolocation, *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, (7), pp. 195-202 (in Russian).
16. **Kulizhnikov, A.M., Eremin, R.A. & Kuznetsov A.O.** (2019) The influence of the characteristics of the contact boundaries of layers on the strength of the pavement, *Dorogi i mosty*, (2/42), pp. 90-103 (in Russian).
17. **Pshenichnikova, E.S.** (2018) Features of the use of geosynthetic materials in the permafrost zone, *Dorogi. Innovatsii v stroitelstve*, (67), pp. 28-32 (in Russian).
18. **Tsernant, A.A.** (1998) *Construction of the roadbed*. PhD. Moscow (in Russian).
19. *Methodological recommendations on the use of constructive measures for the preservation of permafrost soils in the foundations of the roadbed and artificial structures on the highways of Central Yakutia* (2010). M.: TsNIIS (in Russian).
20. **Gul'ko, O.N.** (2003) Analysis of methods of construction of roadbed structures in permafrost areas in Russia and the USA, *Proyektirovaniye avtomobilnykh dorog: sb. nauch. trudov / MADI*. Moscow: MADI (in Russian).
21. **Makarov, A.S., Kraev, A.N. & Shankhoyev, Z.Sh.** (2018) Constructive and technological solutions for the construction of highways on permafrost soils, *Internet-zhurnal «Transportnyye sooruzheniya»*, (4) [online]. Available at: <https://t-s.today/PDF/17SATS418.pdf> (free access) (in Russian).

Received 03.08.2023

Approved after reviewing 18.09.2023

Accepted 21.09.2023