

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8723

УДК 625.712:624.138.4.001.4

Статья

Оценка несущей способности грунта зимней лесовозной дороги с различной глубиной промерзания

Мохирев Александр Петрович

*доктор технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет
(Российская Федерация), ale-mokhirev@yandex.ru*

Исламова Мэри Темуровна

*аспирант, Сибирский федеральный университет (Российская Федерация),
iprtem@mail.ru*

Бурмистрова Ольга Николаевна

*доктор технических наук, профессор, Ухтинский государственный
технический университет (Российская Федерация), olga.burm@mail.ru*

Кручинин Игорь Николаевич

*доктор технических наук, профессор, Уральский государственный
лесотехнический университет (Российская Федерация), kinaa.k@yandex.ru*

Отев Кирилл Сергеевич

*аспирант, Поволжский государственный технический университет
(Российская Федерация), otev.kirill@mail.ru*

Получена: 8 июля 2025 / Принята: 3 сентября 2025 / Опубликовано: 29 сентября 2025

Аннотация: Зимние лесовозные автомобильные дороги являются важной частью лесозаготовительной инфраструктуры. До 80 % всех лесовозных дорог приходится на дороги зимнего действия. Несущая способность грунтов основания таких дорог существенно зависит от климатических условий: при промерзании грунт приобретает высокую жёсткость и способен выдерживать значительные нагрузки, тогда как в период оттепелей прочность основы резко падает. Цель исследования — оценить несущую способность грунтов основания зимней лесовозной дороги на основе полевых и лабораторных испытаний, а также дать рекомендации по допустимым нагрузкам и режимам эксплуатации данной дороги. В данной работе приведены результаты инженерно-геотехнического исследования несущей способности грунтов зимней лесовозной дороги,

находящейся в Большемуртинском районе Красноярского края. Выполнены полевые измерения динамического модуля упругости грунта с помощью приборов типа ПДУ-МГ4 «Удар» и отбор образцов для лабораторного определения влажности, плотности, гранулометрического и консистентного состава, а также прочностных характеристик (угла внутреннего трения φ и сцепления c). Несущая способность основания оценивалась двумя методами — по предельному сопротивлению грунта R_0 и по деформациям (модулю упругости E). Получено, что грунты основания зимней лесовозной дороги обладают расчётным сопротивлением порядка 200—250 кПа и динамическими модулями упругости 15—25 МПа, чего достаточно для движения среднетоннажной техники. Для исследуемой зимней лесовозной дороги предложено устанавливать допустимые нагрузки в зависимости от глубины промерзания грунта. При промерзании > 30 —50 см (устойчивые морозы) допускается движение машин с осевой нагрузкой до 10 тс включительно. При мелком промерзании (< 30 см) или оттепелях ограничить нагрузку до 5—6 тс на ось (вплоть до полного закрытия дороги для грузового транспорта при интенсивном таянии). В случае необходимости пропуска более тяжёлой техники основание зимней лесовозной дороги может быть усилено технологическими приёмами. Разработаны рекомендации по ограничению нагрузок в период оттепелей и по повышению устойчивости дороги.

Ключевые слова: зимняя лесовозная дорога; несущая способность грунта; модуль упругости; динамический плотномер; промерзание грунта

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8723

Article

Assessment of the Bearing Capacity of Winter Logging Road Subgrade with Different Freezing Depths

Aleksander Mokhirev

*D. Sc. in engineering, associate professor, Siberian Federal University
(Russian Federation), ale-mokhirev@yandex.ru*

Mary Islamova

*Ph. D. student, Siberian Federal University (Russian Federation),
ipmem@mail.ru*

Olga Burmistrova

*D. Sc. in engineering, professor, Ukhta State Technical University
(Russian Federation), olga.burm@mail.ru*

Igor Kruchinin

*D. Sc. in engineering, professor, Ural State Forest Engineering University
(Russian Federation), kinaa.k@yandex.ru*

Kirill Otev

Ph. D. student, Volga State University of Technology (Russian Federation), otev.kirill@mail.ru

Received: 8 July 2025 / Accepted: 3 September 2025 / Published: 29 September 2025

Abstract: Winter logging roads constitute a vital component of timber harvesting infrastructure. Approximately 80 % of all logging roads are seasonal winter roads. The bearing capacity of these roads subgrade soils is highly dependent on climatic conditions: when frozen, the soil gains considerable stiffness and can sustain heavy loads, whereas during thaw periods the foundation strength deteriorates sharply. The study aims to assess the bearing capacity of winter logging road subgrade soils based on field and laboratory tests and provide recommendations on permissible loads and operational regimes for such roads. This paper presents the results of engineering and geotechnical studies on the bearing capacity of soils in a winter logging road located in the Bolshemurinsky District of the Krasnoyarsk Territory. Field measurements of the dynamic modulus of soil elasticity were conducted using the PDU-MG4 «Udar», and samples were collected for laboratory determination of moisture content, density, granulometric and consistency composition, as well as strength characteristics (angle of

internal friction ϕ and cohesion c). The bearing capacity of the subgrade was assessed using two methods — based on the ultimate soil resistance R_0 and deformations (elastic modulus E). It was found that the subgrade soils of the winter logging road had a calculated resistance of about 200—250 kPa and dynamic elastic moduli of 15—25 MPa, which is sufficient for medium-tonnage vehicles. For the studied winter logging road, it is proposed to set permissible loads depending on the depth of soil freezing. When freezing depth exceeds 30—50 cm (stable frost conditions), the movement of vehicles with an axle load of up to 10 tf is allowed. With shallow freezing (< 30 cm) or thaws, the load should be limited to 5—6 tf per axle (up to a complete closure of the road to freight traffic during intense melting). If the passage of heavier equipment is necessary, the subgrade of the winter logging road can be reinforced using technological methods. Recommendations have been developed for load restrictions during thaws and for improving road stability.

Keywords: winter logging road; soil bearing capacity; elastic modulus; dynamic compaction meter; soil freezing

1. Введение

Освоение удалённых территорий в регионах Крайнего Севера и Сибири часто опирается на временные зимние лесовозные автодороги, которые эксплуатируются в холодный период года. Такие дороги сооружаются без капитального строительства покрытия, используя естественно промёрзший грунт и снежно-ледяной настил в качестве основы. Преимущество зимних лесовозных дорог состоит в их экономичности и возможности сезонного использования там, где строительство круглогодичных дорог затруднено или нерентабельно [1]. Однако надёжность и безопасность зимней лесовозной дороги напрямую зависят от несущей способности грунта основания, изменяющейся под влиянием температуры и влажности [2]. Известно, что в замёрзшем состоянии даже слабые водонасыщенные грунты превращаются в относительно прочный материал (лёд выполняет роль цементирующего агента) [2], [3]. В период оттепелей и весеннего таяния снега несущая способность резко снижается вследствие разжижения верхних слоёв и потери структурной прочности грунта [2]. Наибольшие проблемы с проходимостью наблюдаются именно в период оттаивания грунтов, когда прочностные и деформационные характеристики земляного полотна минимальны [4]. Таким образом, при проектировании и эксплуатации зимних лесовозных дорог необходимо учитывать сезонные изменения состояния грунта и предусматривать ограничения нагрузок.

Дополнительным вызовом является рост нагрузок от транспорта. Современные лесовозы обладают высокой массой, увеличенным давлением на ось, что требует соответствующей несущей способности дорожного основания. Обеспечение надёжной работы зимней лесовозной дороги в таких условиях возможно только при тщательной оценке прочности и жёсткости грунтов и соблюдении регламентов эксплуатации. В районах с многолетнемёрзлыми грунтами проблема усложняется: при оттаивании вечной мерзлоты основание может проседать и терять устойчивость [5], поэтому выбор правильных технологических решений для земляного полотна критически важен. В Красноярском крае климатические условия характеризуются продолжительной морозной зимой, значительной глубиной сезонного промерзания грунтов и обильным снежным покровом. Эти факторы определяют длительность эксплуатационного периода зимней лесовозной дороги и требования к её несущей способности.

Цель исследования — оценить несущую способность грунтов основания зимней лесовозной дороги на основе комплексных полевых и лабораторных испытаний, а также дать рекомендации по допустимым нагрузкам и режимам эксплуатации данной дороги. Для достижения этой цели проведены динамические нагружения грунта и измерения модуля упругости в натурных условиях, лабораторное определение физических и механических свойств отобранных образцов и расчёт несущей способности двумя методами (по R_0 и E) [6].

2. Материалы и методы

2.1. Объект исследования

Зимняя лесовозная дорога расположена в Большемуртинском районе Красноярского края и представляет собой грунтовую дорогу сезонного действия протяжённостью около 7,6 км. Для испытаний выбран характерный участок дорожного полотна длиной ~ 50 м с однородными грунтовыми условиями основания. Однородность участка подтверждена предварительным инженерно-геологическим анализом и визуальным осмотром. Исследования проводились в начале зимнего периода (начало ноября), когда установились отрицательные температуры воздуха и началось промерзание грунта основания, но снежный покров ещё был незначительным (менее 10 см). Среднесуточная температура воздуха во время испытаний составляла около $-5...-7$ °С, что соответствует типичным условиям начала зимней эксплуатации лесовозных дорог.

2.2. Полевые испытания

В полевых условиях основным методом оценки деформационных характеристик грунта послужило динамическое зондирование нагрузкой с помощью портативного плотномера ПДУ-МГ4 «Удар». Данный прибор представляет собой переносной динамический штамповый модуль, предназначенный для косвенного определения модуля упругости грунта по величине прогиба круглого штампа под ударной нагрузкой [7]. Принцип работы заключается в падении стандартизованного груза на штамп диаметром 20—30 см, установленный на поверхность грунта, при этом тензодатчики фиксируют приложенную силу удара и возникающий прогиб основания. Электронный блок вычисляет динамический модуль упругости E_d . Плотномер ПДУ-МГ4 включён в Госреестр средств измерений РФ (№ 45397-10) и обеспечивает точность измерения модуля порядка 5 %. Метод ударного нагружения относится к импульсным методам испытания грунтов, что имитирует воздействие движущегося колеса лучше, чем статический штамповый тест [7]. В ходе исследования измерения E_d проводились в пяти точках выбранного участка дороги. В каждой точке модуль упругости определяли на трёх уровнях: непосредственно на поверхности дороги (глубина 0), на глубине ~ 5 см и ~ 20 см от поверхности. Для этого предварительно в грунте устраивались небольшие выемки, позволяющие установить штамп прибора на заданной глубине. Такой подход позволил оценить изменение жёсткости грунта с глубиной. Ожидается, что в нижних слоях модуль выше за счёт большей плотности и меньшей влажности грунта. Дополнительно в полевых условиях осуществлялся замер температуры грунта с помощью почвенного термометра. Температуру измеряли рядом с точками определения E_d на глубинах отбора образцов. Этот температурный контроль важен, т. к. модуль упругости грунта сильно зависит от его мёрзлого или талого состояния [2]: при отрицательных температурах промёрзший грунт резко повышает свою жёсткость.

Одновременно с измерением модулей в тех же точках производился отбор образцов грунта для лабораторных испытаний. Использовался метод жёстких режущих колец диаметром 5 см: кольцо вдавливалось в грунт (на поверхности и на заданной глубине), затем осторожно извлекалось вместе с содержащимся грунтом. Образцы помещали в герметичную тару для сохранения естественной влажности до исследований. Всего отобрано 10 образцов (по два образца с каждого уровня глубины в разных точках).

2.3. Лабораторные испытания

В лаборатории проведён комплекс анализов для определения физико-механических свойств грунтов основы лесовозной дороги. Определение природной влажности грунта осуществлялось методом высушивания навесок до постоянной массы (ГОСТ 5180-2015). Каждый образец из режущего кольца взвешивали, затем сушили в термошкафу при температуре 105 °С до полного высыхания и повторно взвешивали. Массовая влажность w вычислялась как отношение массы испарившейся воды к массе сухого грунта (в процентах). Естественная влажность позволила оценить степень обводнённости грунтов и степень их промерзания (наличие льда) на момент отбора.

Плотность грунта в естественном сложении определяли методом режущего кольца по высушенному образцу: сухую массу грунта делили на объём кольца. Полученные плотность и влажность использованы для расчёта показателей пористости и степени насыщенности грунта водой.

Консистенция грунтов (границы текучести и пластичности) определялась для глинистых образцов по стандартным методикам (ГОСТ 5180-2015): жидкий предел WL — прибором пенетрации (конус Вика), пластичный предел WP — методом раскатывания жгута. Разность $WL - WP$ дала показатель пластичности IP , по величине которого классифицирована консистенция грунтов (пластичные, тугопластичные, полутвёрдые и т. д.).

Прочностные свойства грунтов (угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c) получены испытаниями на сдвиг. Применялся прибор прямого среза (двухполуплоскостной срез) согласно ГОСТ 12248-2010. Образцы грунта помещались в рабочий контейнер аппарата, нормальные нагрузки прижимали образец, после чего осуществлялся сдвиг до разрушения по заданной плоскости. Испытания проводились при нескольких значениях нормального напряжения; по максимальным сдвиговым сопротивлениям построена кривая Мора — Кулона, угол наклона которой дал φ , а пересечение с осью ординат — значение c . Для повышения достоверности образцы для среза уплотнялись в приборе до полевой плотности и доводились до природной влажности, имитируя состояние грунта в теле дороги. Полученные величины φ и c каждого образца использованы в расчётах несущей способности. Также на основе совокупности лабораторных данных произведена инженерная классификация грунтов основания (по гранулометрическому составу, пластичности и консистенции) и установлено текущее состояние грунтов (например, степень приближения

влажности к оптимальной, степень промерзания). Расчётное сопротивление основания R_0 (кПа) для разных типов грунтов представлено на диаграмме (рисунок 1).

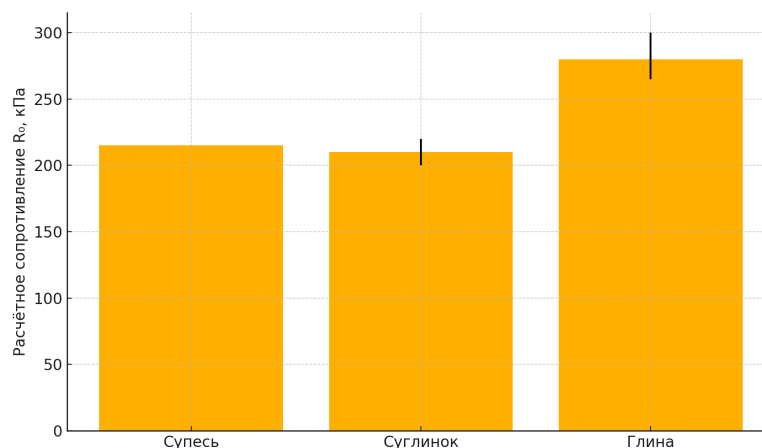


Рисунок 1. Расчётное сопротивление основания R_0 (кПа) для разных типов грунтов [рисунок авторов]

Figure 1. Design resistance of the subgrade R_0 (kPa) for different types of soils

2.4. Расчёт несущей способности

Для комплексной оценки были применены два подхода: 1) по прочностному критерию грунта (предельному сопротивлению R_0) и 2) по деформационному критерию (прогибу от нагрузки, связанному с модулем упругости E) [6]. Первый метод исходит из классической теории несущей способности грунта основания. Расчётное сопротивление грунта R_0 представляет максимальное контактное давление, которое грунт может выдержать без разрушения (без нарушения сплошности и прочности структуры). Для его определения использованы лабораторно полученные параметры прочности ϕ и c . В инженерной практике R_0 рассчитывается по эмпирическим формулам, близким к формулам Терцаги для несущей способности фундаментов, с поправками на размеры штампа и условия заложения. В нашем случае оценка R_0 выполнена для основания у поверхности (глубина заложения 0) шириной 1 м, что эквивалентно дорожному основанию под колесом. Были подставлены значения ϕ и c в расчётные выражения (с учётом коэффициента запаса надёжности $\sim 1,5$). В результате получены расчётные сопротивления R_0 (в кПа) для каждого типа грунта, характеризующего основу лесовозной дороги. Второй метод опирается на оценку прогибов дорожной конструкции под нагрузкой. Используя измеренные значения динамического модуля упругости грунта E_d , вычисляется ожидаемая величина вертикальной деформации (прогиба) грунтового основания под действием стандартной колёсной нагрузки. Нормативной расчётной нагрузкой принято давление порядка 0,5 МПа, приходящееся на площадь контакта автомобильного колеса $\sim 0,02\text{—}0,03\text{ м}^2$ [8]. Для заданного E по формуле упругого

половинного пространства оценивается прогиб; он сравнивается с предельно допустимым прогибом для нежёстких дорожных одежд (порядка нескольких миллиметров по нормативам для временных дорог [9]). Если вычисленный прогиб не превышает допустимого значения, по деформационному условию основание считается удовлетворительным (рисунок 2). В противном случае несущая способность считается ограниченной по деформациям даже при условии прочности.

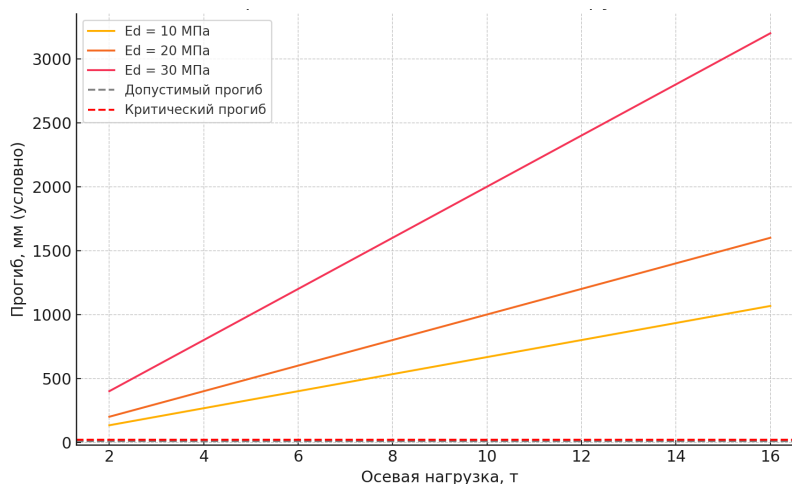


Рисунок 2. Прогиб основания (мм) под колесом в зависимости от осевой нагрузки (т) при разных значениях E_d [рисунок авторов]

Figure 2. Deflection of the subgrade (mm) under the wheel as a function of axial load (t) at different values of E_d

После расчётов по обоим критериям результаты сопоставлялись с требованиями нормативных документов и фактическими нагрузками от транспорта. В дорожной практике для грунтовых оснований предъявляются минимальные требования к модулю упругости и расчётному сопротивлению в зависимости от категории дороги и условий движения. Например, для лесовозных зимников рекомендуется модуль не ниже ~ 30 МПа в промёрзшем состоянии и прочностные показатели, обеспечивающие восприятие осевых нагрузок ~ 10 т [8]. В нашей работе полученные значения R_0 и E проанализированы на соответствие ожидаемым эксплуатационным нагрузкам техники, следующей по дороге. На их основе сформулированы выводы о пригодности основания дороги и даны рекомендации по её эксплуатации (ограничение нагрузок в тёплые периоды, возможное усиление конструкции при необходимости). Отметим, что использование двух подходов (по R_0 и E) даёт более полное представление: первый определяет предельную статическую нагрузку (запас прочности), второй — ожидаемые деформации и долговечность основания под движущейся нагрузкой. Совокупность критериев позволяет надёжнее оценить состояние лесовозной дороги и границы безопасной эксплуатации.

3. Результаты

3.1. Полевые измерения

Динамические испытания грунта показали закономерное увеличение модуля упругости E_d с глубиной залегания грунта (рисунок 3). На поверхности дороги (в верхнем рыхлом слое, частично перемороженном) значения E_d оказались минимальными — порядка десятков МПа. На глубине ~ 20 см модуль возрастал примерно в 1,5 раза. Это объясняется тем, что нижележащий грунт более плотный и менее насыщен водой (часть поровой воды уже превратилась в лёд), вследствие чего его жёсткость выше. Например, в точке с песчаным грунтом на поверхности $E_d \approx 15$ МПа, а на глубине 0,2 м — около 25 МПа. Диапазон измеренных динамических модулей упругости по различным точкам составил ~ 15 —26 МПа, что соответствует типичным значениям для оснований грунтовых дорог в начальной стадии промерзания. Температура грунта во время испытаний колебалась от -1 до -3 °C в верхних 20 см, т. е. грунт находился около точки замерзания. Это указывает, что при дальнейшем понижении температуры модуль упругости будет ещё увеличиваться (в полностью промёрзшем состоянии модуль может превышать 50 МПа [3]). Отобранные образцы грунта внешне представляли собой серо-бурые суглинистые грунты с различной степенью льдистости. В полевых условиях визуально фиксировалось появление на дороге первых морозобойных трещин при остывании грунта, что свидетельствует о начальной стадии промерзания и связанных с ней напряжениях в грунтовом массиве.

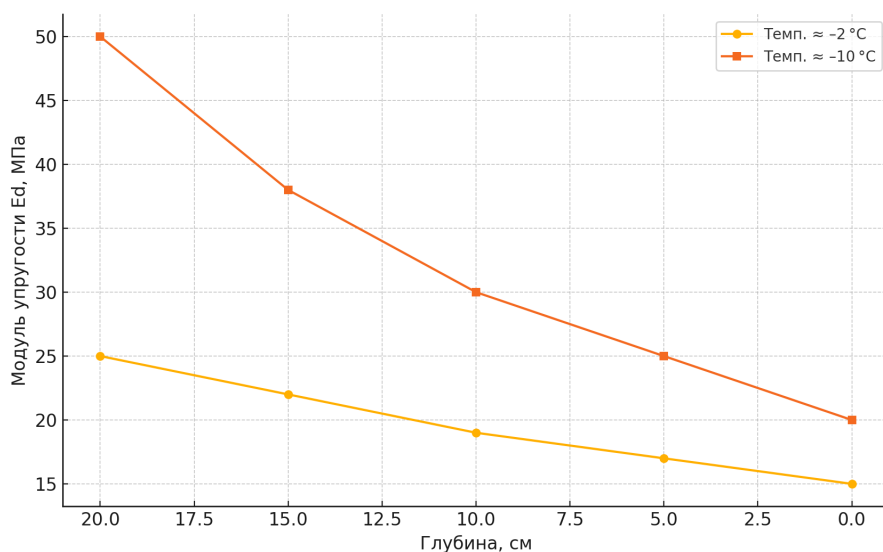


Рисунок 3. Модуль упругости E_d в зависимости от глубины залегания при двух температурных режимах [рисунок авторов]

Figure 3. E_d elastic modulus as a function of depth at two temperature regimes

3.2. Лабораторный анализ грунтов

По результатам классификационных испытаний установлено, что грунты основания представлены преимущественно пылеватой супесью и суглинком с переменной влажностью, а местами (в нижних горизонтах) — тугопластичной глиной. Определённые значения показателей консистенции указывают на пластичное состояние супесей ($WL \approx 30—35\%$, $IP \sim 7—10\%$) и полутвёрдое состояние суглинков и глин ($WL \approx 40—50\%$, $IP \sim 17—20\%$). Природная влажность верхних образцов составляла $\sim 20—25\%$, что близко или немного выше оптимальной для данных грунтов, указывая на частичное водонасыщение [2]. Нижние образцы имели меньшую влажность ($\sim 15—18\%$), соответственно, более высокую плотность. Плотность сухого грунта варьировала от 1,65 до 1,75 г/см³ для разных образцов, при степени пористости около 0,4—0,5. Прочностные характеристики, полученные на приборе среза, отражают достаточно высокую несущую способность мёрзлых связных грунтов. Далее (таблица, рисунок 4) приведены обобщённые свойства грунтов основания зимней лесовозной дороги (φ — угол внутреннего трения, c — удельное сцепление, E — модуль упругости, R_0 — расчётное сопротивление).

Таблица. Физико-механические свойства грунтов основания зимника

Table. Physical and mechanical properties of the winter road subgrade soils

Грунт	φ (°)	c (кПа)	E (МПа)	R_0 (кПа)
Супесь	≈ 27	≈ 15	15—16	≈ 215
Суглинок	24—25	20—30	20—22	200—220
Глина	≈ 20	70—75	24—26	265—300

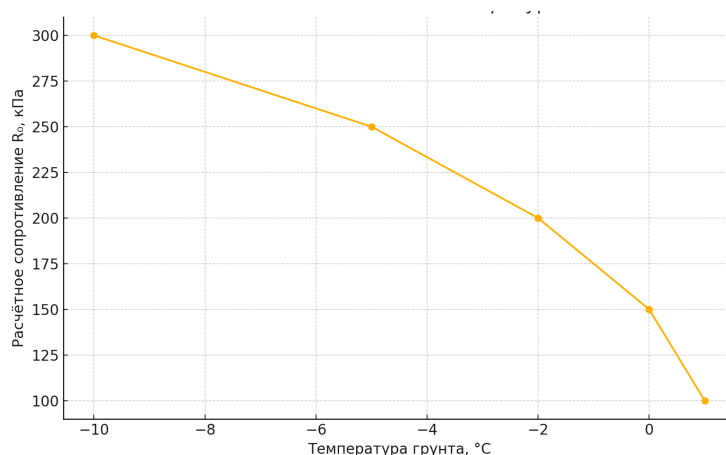


Рисунок 4. Зависимость расчётного сопротивления грунта R_0 (кПа) от температуры (°C) [рисунок авторов]

Figure 4. Dependence of design soil resistance R_0 (kPa) on temperature (°C)

Эти величины свидетельствуют о достаточно высоком сопротивлении грунта основы дороги — особенно глинистые прослойки при промерзании демонстрируют R_0 до 300 кПа. Динамический модуль упругости, определённый как ~ 20 МПа в среднем, подтверждается лабораторными оценками: при статическом нагружении образцов модуль деформации оказался ~ 15 МПа, а переход к кратковременному (динамическому) воздействию увеличивает его в 1,3—1,4 раза, что согласуется с полевой величиной 20 МПа. Таким образом, комплекс испытаний даёт согласующуюся картину прочности и жёсткости грунтов.

Полученные значения 15—26 МПа соответствуют начальной стадии промерзания грунта (температура $-1...-3$ °C), что и зафиксировано во время полевых испытаний. В этом состоянии грунт ещё не набрал максимальной прочности. Рекомендуемое значение ~ 30 МПа и выше — это норматив для установившегося промёрзшего состояния грунта, которое достигается при более глубоком промерзании ($> 30—50$ см) и устойчивых отрицательных температурах.

3.3. Оценка несущей способности

Расчётное сопротивление грунта основания R_0 , вычисленное по полученным величинам φ и c , находится в диапазоне 200—250 кПа для преобладающих супесей и суглинков, достигая 300 кПа для участков с глинистым грунтом. Эти значения близки к нормативным показателям для грунтовых дорог: например, для надёжной работы зимней лесовозной дороги желателен R_0 не ниже ~ 200 кПа [8]. Переводя R_0 в допустимую нагрузку, применяли коэффициент запаса $\sim 1,5$. Таким образом, грунт с $R_0 \approx 200$ кПа способен длительно нести давление порядка 130 кПа без разрушения. Это соответствует нагрузке около 5—6 т на одно колесо площадью $\sim 0,025$ м² или $\sim 10—12$ т на ось. Следовательно, для нашей зимней лесовозной дороги с $R_0 \sim 200—250$ кПа предельная безопасная осевая нагрузка составляет приблизительно 8—10 тс (рисунок 5). Действительно, среднетоннажные грузовые автомобили (типа «УРАЛ» или лесовозы без полного груза) имеют нагрузку порядка 7—9 тс на ось, такая техника может эксплуатировать дорогу без риска разрушения основания. Более тяжёлые машины (например, загруженный лесовоз с осевой нагрузкой ~ 15 т) создадут давление, близкое к 220—240 кПа под колесом, что вплотную подходит к предельному сопротивлению грунтов и грозит сдвиговыми повреждениями основы. Результаты расчёта по модулю упругости E подтверждают эти выводы. При динамическом модуле ~ 20 МПа прогиб грунта под колесом легкового автомобиля (давление $\sim 0,05—0,08$ МПа) будет долями миллиметра и никак не отразится на состоянии дороги. Под осевой нагрузкой 10 т (давление $\sim 0,2$ МПа) можно ожидать прогиб порядка 5—8 мм, что допустимо для временной зимней лесовозной дороги. Однако если осевая нагрузка превысит ~ 15 т (давление $> 0,3$ МПа), расчётный прогиб грунта возрастет до критических величин ($> 1—2$ см), особенно при частично талом состоянии грунта, и это приведёт к быстрому образованию колеи и разрушению дороги по деформационному признаку.

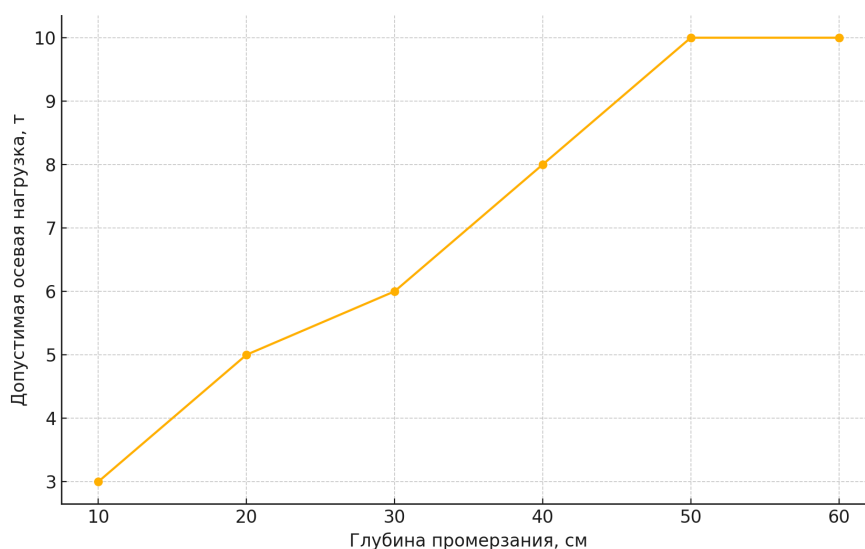


Рисунок 5. Схема режима допустимой осевой нагрузки (т) в зависимости от глубины промерзания грунта (см) [рисунок авторов]

Figure 5. Schematic diagram of the permissible axial load mode (t) depending on the soil freezing depth (cm)

Отдельно следует отметить влияние температуры на несущую способность. В полностью промёрзшем состоянии (температуры грунта значительно ниже 0°C) модуль упругости грунта может превышать 50 МПа, а прочность (R_0) возрастает за счёт мёрзлого сцепления [3]. В такие периоды зимняя лесовозная дорога выдерживает даже тяжёлую технику (например, 15—20 т на ось) без заметных повреждений. Но в начале зимы и в период потепления весной, когда верхние слои оттаивают и насыщаются водой, несущая способность резко падает — расчёт показал, что при $E \sim 10\text{—}15$ МПа и $R_0 < 150$ кПа даже грузовики средней тяжести могут вызвать недопустимые деформации [2], [4]. Именно поэтому движение тяжёлого транспорта по зимней лесовозной дороге строго ограничивается рамками устойчивого промерзания грунта. Наши наблюдения за состоянием зимней лесовозной дороги подтвердили эти расчётные выводы: в ходе оттепели, последовавшей спустя неделю после испытаний, на дороге местами появились глубокие колеи и прорывы грунта под колёсами единично прошедшей тяжёлой машины, тогда как при стабильно отрицательных температурах покрытие оставалось ровным.

4. Обсуждение и заключение

Проведённое исследование позволило количественно оценить несущую способность грунтов основания зимней лесовозной дороги и установить соответствие её характеристик требуемым нагрузкам.

Грунты основания (супеси, суглинки) в мёрзлом и промороженном состоянии обладают расчётным сопротивлением R_0 порядка 200—250 кПа, достигающим 300 кПа в наиболее плотных глинистых прослойках. Эти величины достаточны для восприятия нагрузок от средней дорожной техники (осевая нагрузка до ~ 10 т) с необходимым запасом прочности. Превышение данного уровня приводит к риску сдвигового разрушения грунта, поэтому движение перегруженных лесовозов и тяжёлой гусеничной техники по зимней лесовозной дороге без усиления основания не рекомендуется [8].

Измеренные модули упругости грунта E_d (~ 15 —25 МПа при частичном промерзании) и прогнозируемые прогибы показывают, что при полностью промёрзшем основании дорога сохраняет требуемую жёсткость даже под тяжёлыми машинами. В период оттепелей или неполного промерзания верхних слоёв несущая способность ограничивается по деформации: возможно образование глубоких колеи от грузового транспорта вследствие уменьшения модуля до ~ 10 МПа и ниже. Таким образом, для обеспечения долговечности покрытия рекомендуется ограничивать движение тяжёлых автомобилей в начале и конце зимнего сезона, когда грунт ещё недостаточно промёрз.

Для данной зимней лесовозной дороги предложено устанавливать допустимые нагрузки в зависимости от глубины промерзания грунта. При промерзании > 30 —50 см (устойчивые морозы) допускается движение машин с осевой нагрузкой до 10 тс включительно [5]. При меньшем промерзании (< 30 см) или оттепелях ограничить нагрузку до 5—6 тс на ось (вплоть до полного закрытия дороги для грузового транспорта при интенсивном таянии). Также целесообразно контролировать температуру грунта в критические периоды и при снижении прочности вводить временные ограничения, что соответствует действующим рекомендациям для зимних лесовозных дорог [9].

В случае необходимости пропуска более тяжёлой техники (например, единоразового провоза оборудования массой > 40 т) основание зимней лесовозной дороги может быть усилено технологическими приёмами. К ним относят укладку дополнительных настилов (слой брёвен, хвороста), использование щитов или геосинтетических материалов для распределения нагрузки, а также искусственное промораживание основания (например, полив водой для образования толстого ледяного слоя [10]). Эти меры повышают эквивалентную прочность и жёсткость конструкции, но требуют дополнительных затрат и организационных усилий, поэтому применяются только при обоснованной необходимости.

В целом, результаты исследования показали, что зимняя лесовозная дорога при соблюдении рекомендуемых ограничений способна эффективно выполнять транспортные функции в зимний период. Её грунтовое основание обладает достаточной несущей способностью для движения лесовозов и грузовых автомобилей средней нагрузки на всём протяжении устойчивых морозов. Для предотвращения повреждений дороги важно своевременно вводить сезонные ограничения движения в периоды оттепели и ранневесеннего размораживания грунта. Полученные методы и подходы к оценке несущей способности могут быть использованы для мониторинга состояния зимних лесовозных дорог

и оптимизации сроков их эксплуатации в зависимости от погодных условий. Это особенно актуально в свете возможного сокращения продолжительности зимнего периода из-за климатических изменений [11—14], что требует ещё более тщательно обоснованного управления нагрузками на зимние лесовозные дороги.

Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки № 25-11-20033, <https://rscf.ru/project/25-11-20033/>.

Список литературы

1. Хорошилов К. В. Зимние лесовозные дороги: особенности конструкции и функционирования // StudArctic Forum. 2017. № 4 (8). С. 11.
2. Jessberger H. L., Carbee D. L. Influence of Frost Action on the Bearing Capacity of Soils // Highway Research Record. 1970. No. 304. P. 14—23.
3. MacFarlane K. Load-bearing capacity increase of peat by freezing // Journal of Cold Regions Engineering. 1968.
4. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds / S. Rudov, V. Shapiro, I. Grigorev [et al.] // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10, no. 1. P. 2052—2071.
5. Планирование работы зимних лесовозных дорог на основе анализа статистики климатических данных / А. П. Мохирев, Е. В. Горяева, М. П. Мохирев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 2 (30). С. 176—185.
6. Katarov V., Syuney V., Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation // Forests. 2022. No. 13 (10). P. 1538. DOI: 10.3390/f13101538.
7. Applicability of portable tools in assessing the bearing capacity of forest roads / T. Kaakurivaara, N. Vuorimies, P. Kolisoja [et al.] // Silva Fennica. 2015. No. 49 (2). P. 1—26 (art. 1239).
8. СП 318.1325800.2017. Дороги лесные. Правила эксплуатации. Введён 26.06.2018.
9. ГОСТ Р 58948-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания. Введён 01.11.2020.
10. Ice bridges in the James Project / B. Michel, M.-C. Drouin, L. M. Lefebvre [et al.] // Canadian Geotech. Journal. 1974. November. DOI: doi.org/10.1139/t74-060.
11. Chugunkova A. V., Pyzhev A. I. Impacts of Global Climate Change on Duration of Logging Season in Siberian Boreal Forests // Forests. 2020. No. 11 (7). P. 756. DOI: 10.3390/f11070756.
12. Barrette P. D., Hori Y., Kim A. M. The Canadian winter road infrastructure in a warming climate: Toward resiliency assessment and resource prioritization // Sustainable and Resilient Infrastructure. 2022. DOI: 10.1080/23789689.2022.2075017.
13. Projected decrease in wintertime bearing capacity on different forest and soil types in Finland under a warming climate / I. Lehtonen [et al.] // Hydrol. Earth. Syst. Sci. 2019. No. 23. P. 1611—1631. DOI: 10.5194/hess-23-1611-2019.
14. Antonson H., Buckland P., Blomqvist G. Road Salt Damage to Historical Milestones Indicates Adaptation of Winter Roads to Future Climate Change // Climate. 2021. DOI: 10.3390/cli-9100149.

References

1. Khoroshilov K. V. Winter logging roads: design and operational features. *StudArctic Forum*, 2017, no. 4 (8), pp. 11. (In Russ.)
2. Jessberger H. L., Carbee D. L. Influence of Frost Action on the Bearing Capacity of Soils. *Highway Research Record*, 1970, no. 304, pp. 14—23.
3. MacFarlane K. Load-bearing capacity increase of peat by freezing. *Journal of Cold Regions Engineering*, 1968.
4. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I. [et al.] Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 2052—2071.
5. Mokhirev A. P., Goryaeva E. V., Mokhirev M. P., Ivshina A. V. Planning the operation of winter logging roads based on climate data statistics analysis. *Forest Engineering Journal*, 2018, vol. 8, no. 2 (30), pp. 176—185. (In Russ.)
6. Katarov V., Syuney V., Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation. *Forests*, 2022, no. 13 (10), p. 1538. doi: 10.3390/f13101538.
7. Kaakkurivaara T., Vuorimies N., Kolisoja P., Uusitalo J. Applicability of portable tools in assessing the bearing capacity of forest roads. *Silva Fennica*, 2015, no. 49 (2), pp. 1—26 (art. 1239).
8. SP 318.1325800.2017. Forest roads. Operating rules. Enforced 26.06.2018. (In Russ.)
9. GOST R 58948-2020. Public highways. Winter roads and ice crossings. Technical regulations for construction and maintenance. Enforced 01.11.2020. (In Russ.)
10. Michel B., Drouin M.-C., Lefebvre L. M., Rosenberg P., Murray R. Ice bridges in the James Project. *Canadian Geotech. Journal*, 1974, november. doi: doi.org/10.1139/t74-060.
11. Chugunkova A. V., Pyzhev A. I. Impacts of Global Climate Change on Duration of Logging Season in Siberian Boreal Forests. *Forests*, 2020, no. 11 (7), p. 756. doi: 10.3390/f11070756.
12. Barrette P. D., Hori Y., Kim A. M. The Canadian winter road infrastructure in a warming climate: Toward resiliency assessment and resource prioritization. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2022. doi: 10.1080/23789689.2022.2075017.
13. Lehtonen I. [et al.]. Projected decrease in wintertime bearing capacity on different forest and soil types in Finland under a warming climate. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*, 2019, no. 23, pp. 1611—1631. doi: 10.5194/hess-23-1611-2019.
14. Antonson H., Buckland P., Blomqvist G. Road Salt Damage to Historical Milestones Indicates Adaptation of Winter Roads to Future Climate Change. *Climate*, 2021. doi: 10.3390/cli9100149.