

УДК 539.42

DOI: 10.15393/j2.art.2018.4201

Статья

Сезонное промерзание лесовозной грунтовой дороги: моделирование условий появления поперечных трещин

Тиммо А. Гаврилов^{1*}, Константин В. Хорошилов¹ и Геннадий Н. Колесников¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет», 185910, Россия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33; E-Mails: gavrilov@petrsu.ru (Т. Г.); ale-ks-na@yandex.ru (К. Х.); kolesnikovgn@yandex.ru (Г. К.)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: gavrilov@petrsu.ru (Т. Г.);
Tel.: +7(8142)766425.

Получена: 1 сентября 2018 / Принята: 19 сентября 2018 / Опубликовано: 10 октября 2018

Аннотация: В представленной работе объектом исследования является двухслойная конструкция как модель прямолинейного участка (сегмента) грунтовой автомобильной дороги в стадии сезонного промерзания. Предмет исследования: условия появления и параметры морозобойных трещин в верхнем слое автомобильной дороги при сезонном промерзании. Цель работы: моделирование условий появления поперечных трещин в верхнем слое при сезонном промерзании грунтовой дороги. В работе представлена математическая модель формирования морозобойных трещин в грунтах. Представлены практические примеры численной реализации предложенного подхода. Показано, что разработанная методика обеспечивает достаточную адекватность результатов моделирования, не требует громоздких вычислений; результаты выполненного исследования не противоречат известным по литературе данным; практическое значение работы определяется тем, что представленные результаты могут быть использованы при обосновании технических решений по совершенствованию зимних лесовозных дорог; перспективы исследования связаны с уточнением данных о взаимодействии слоя мёрзлого грунта, взаимодействующего с нижележащим слоем грунта, температура которого неотрицательна.

Ключевые слова: зимние лесовозные дороги; верхний слой; сезонное промерзание грунта; морозобойные трещины; силы растяжения.

DOI: 10.15393/j2.art.2018.4201

Article

Seasonal Freezing of a Logging Dirt Road: Modeling of Conditions of Transverse Cracks Emergence

Timmo Gavrilov^{1*}, Konstantin Khoroshilov¹ and Gennadii Kolesnikov¹

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Petrozavodsk State University», 185910, Russia, Petrozavodsk, pr. Lenina, 33; E-Mails: gavrilov@petsu.ru (T. G.); ale-ks-na@yandex.ru (K. Kh.); kolesnikovgn@yandex.ru (G. K.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: gavrilov@petsu.ru (T.G.); Tel.: +7(8142)766425.

Received: 1 September 2018 / Accepted: 19 September 2018 / Published: 10 October 2018

Abstract: There are a number of urgent tasks related to the forecasting of the state and improvement of technologies for the construction of temporary forest roads. In the present work, the object of the study is a two-layer structure as a model of a straight section (segment) of a dirt road in the stage of seasonal freezing. Conditions of occurrence and parameters of frost cracks in the upper layer of the road during seasonal freezing were simulated. The paper demonstrates the possibility of using mathematical modeling of mechanical systems to analyze the conditions of frost cracks formation in the soil. The considered problem is to predict the distance between frost cracks in the soil. Practical examples of numerical implementation of the proposed approach are presented. The research results confirm that the use of mathematical modeling methods in the problems associated with the analysis of the state of temporary logging roads is a relevant and promising direction; the developed method provides sufficient adequacy of the simulation results, does not require cumbersome calculations; the results of the study do not contradict the data known in the literature; the practical significance of the work is determined by the fact that the presented results can be used to justify technical solutions for improving winter logging roads; the prospects of the study are associated with the refinement of data on the interaction of the frozen soil layer interacting with the underlying soil layer, the temperature of which is non-negative.

Keywords: winter logging roads; upper layer; seasonal soil freezing; frost cracks; tensile forces.

1. Введение

Касаясь актуальности темы данной работы, отметим следующее. Примерно четвертая часть мировых запасов лесных ресурсов находится в России, что является конкурентным преимуществом страны в системе мирохозяйственных связей. Однако потенциал рационального использования лесных ресурсов реализован в недостаточной степени. К основным причинам отставания относится недостаточная протяжённость лесовозных (лесозаготовительных) дорог, приходящихся на единицу площади лесных земель. Характеристики современного состояния транспортной инфраструктуры приведены в «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года». Протяжённость лесных дорог в Российской Федерации составляла на момент подготовки данного документа 1,5 км на 1 тыс. га лесных земель; в странах Западной Европы и Северной Америки — от 10 до 45 км. Например, в Финляндии на 1 тыс. га лесных земель приходится 12,3 км лесных дорог [1], в Австрии и Германии — соответственно 36 и 45 км. При этом на дату подготовки Стратегии в России доля дорог круглогодичного действия с твёрдым покрытием в общем объёме лесных дорог составляла 11,2 % (181 тыс. км), на грунтовые дороги круглогодичного действия приходилось 32 % (514 тыс. км), остальные — временные дороги.

Таким образом, в настоящее время сохраняется актуальность прикладных исследований, ориентированных на совершенствование технологий строительства лесовозных (лесозаготовительных) дорог. В этой связи появляется комплекс вопросов, из которых в данной работе затрагивается проблема совершенствования зимних лесовозных дорог, причём более подробно рассматривается задача моделирования условий появления поперечных трещин в верхнем слое дороги при сезонном промерзании. Решению задач, относящихся к данному направлению прикладных исследований, посвящено большое число работ.

В настоящее время основной объём заготовки и вывозки леса приходится на зимний период [2]. Влияние погодных условий на объёмы вывозки древесины по временным ледяным и снежно-ледяным лесовозным дорогам применительно к условиям Республики Карелия исследовано в работе [3], в которой подтверждено доминирование объёмов вывозки в зимних условиях, однако прогнозируется, что при изменении климатических сценариев для Карелии возрастает целесообразность транспортной инфраструктуры круглогодичного действия. Тем не менее в настоящее время и на ближайшую перспективу остаются актуальными проблемы совершенствования зимних лесовозных дорог. В качестве обоснования данного замечания приведём данные из работы [4], в которой установлено, что ряд, элементами которого являются значения суточных температур за 10 лет (2007—2017) для одного из районов Красноярского края, содержит практически незначимый линейный тренд: температура увеличивалась примерно на 0,02 °C в год.

Продолжительность функционирования зимних лесовозных дорог с покрытием из уплотнённого снега, снежно-ледяных и ледяных дорог определена в работе [5] и составляет в условиях Республики Карелия 100—130 дней в год. В условиях отмеченного выше района Красноярского края — 158 дней в год для дороги с покрытием из снега и 188 дней для ледяной дороги [4].

Технологии строительства лесных дорог, в том числе зимних лесовозных дорог, регламентируются в России сводом правил СП 288.1325800.2016.

Анализ литературы показал, что многоплановым исследованиям, ориентированным на совершенствование лесовозных дорог, посвящено большое число работ, обзоры которых приведены в работах [6—12]. Однако несмотря на большой объём исследований, ряд вопросов требует дальнейшего изучения. К их числу относится проблема повышения эксплуатационной надёжности зимних лесовозных дорог. Различные аспекты данной проблемы рассмотрены в публикациях [1], [4], [5—14].

В данной работе внимание фокусируется на вопросах механического взаимодействия слоёв дорожной конструкции в межсезонный период, когда глубина промерзания, а значит, и толщина указанного выше верхнего слоя не достигли своих предельных значений. Физико-механические свойства материала данного слоя при промерзании существенно изменяются. Переход воды в состояние льда сопровождается перестройкой структуры мерзлого грунта, повышением его прочности, уменьшением водопроницаемости [19], [22], [23]. В то же время свойства материала нижележащего слоя, температура которого неотрицательна, почти не изменяются. Таким образом, сегмент лесовозной грунтовой дороги может рассматриваться как двуслойная конструкция. В реальных ситуациях данный сегмент механически взаимодействует с транспортными средствами, а также сопротивляется воздействию отрицательных температур. Далее принимается во внимание только воздействие отрицательных температур. Результат такого воздействия — деформации сегмента и (при определённых условиях) появление трещин, которые в литературе называют морозобойными трещинами [7], [15]. Необходимо отметить, что морозобойные трещины появляются не только в покрытиях автомобильных дорог, но также в мёрзлом грунте [7], [11], [15]. Это означает, что вопросы, связанные с появлением морозобойных трещин, актуальны как для автомобильных дорог с твёрдым асфальтобетонным покрытием, так и для грунтовых лесовозных дорог в начальной стадии промерзания.

Объект исследования: двуслойная конструкция как модель прямолинейного участка (сегмента) автомобильной дороги в стадии промерзания.

Предмет исследования: условия появления и параметры морозобойных трещин в верхнем слое автомобильной дороги при сезонном промерзании.

Цель работы: моделирование условий появления поперечных трещин в верхнем слое при сезонном промерзании грунтовой дороги.

2. Материал и методы исследования

Физические и механические условия, формирующиеся при промерзании грунтов [15], приводят к появлению растягивающих сил в верхнем слое грунта. Если сопротивление грунта растяжению недостаточно, то появляется трещина. Из всего многообразия трещин далее рассматриваются только поперечные трещины, появляющиеся при промерзании автомобильных дорог после определённого количества циклов «замораживание — оттаивание». Объектом исследования является прямолинейный участок лесовозной дороги, длина которого ограничена двумя поперечными трещинами. Задача заключается в определении длины участка. Если длина этого участка равна бесконечности, то трещин нет. Однако практика показывает, что морозобойные трещины появляются как на поверхности грунтовых массивов [15], так и в верхних слоях автомобильных дорог [7], [11], [16], [17], [18].

В данной статье использованы известные методы математического моделирования механических систем с учётом условий формирования морозобойных трещин [7], [9], [11], [12], [15], [17], [18], [19].

Физические и механические условия формирования морозобойных трещин исследованы в работе [15], в которой решена задача о температурном поле заполненного грунтом полупространства при отрицательной температуре на его поверхности. Температура на дневной поверхности данного полупространства ниже, чем на некоторой глубине. Поэтому правомерно предположить, что в межсезонный период «осень — зима» верхний слой указанного полупространства состоит из мерзлого грунта и опирается на слой грунта с неотрицательной температурой.

Таким образом, в межсезонный период «осень — зима», при определённых условиях, можно рассматривать слой мёрзлого грунта как аналог асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Соответственно, для моделирования взаимодействия слоя мёрзлого грунта с нижележащим слоем грунта могут быть адаптированы методики, хорошо известные в анализе напряжений и деформаций асфальтобетонных покрытий [7], [17], [18], [20].

Промерзание слоя мёрзлого грунта сопровождается деформациями растяжения, которые являются причиной появления указанных выше поперечных трещин. Чтобы определить растягивающие силы и связанные с ними силы сдвига, рассмотрим сегмент автомобильной дороги, длина которого ограничена двумя поперечными трещинами. Наличие трещин означает, что растягивающих сил на торцах сегмента нет (растягивающие силы существовали до разрушения материала и раскрытия трещин). С точки зрения геометрии упрощённая модель сегмента представляет собой параллелепипед, размеры которого определяются толщиной слоя мёрзлого грунта, шириной дороги и длиной сегмента. Сегмент опирается на нижележащий слой грунта с неотрицательной температурой и взаимодействует с ним посредством сил трения и адгезии, которые распределены по площади контакта и прямо пропорциональны перемещениям (сдвигу) одного слоя относительно другого. При

этом коэффициент пропорциональности равен k (Н/м³). Физический смысл данного коэффициента определён в статье [16], в которой представлен также подход, использованный нами при моделировании условий появления морозобойных трещин. Значения данного коэффициента изменяются в большом интервале и могут быть определены по экспериментальным данным. Необходимо принимать во внимание, что линейная зависимость сил от деформаций сдвига выполняется до некоторого предела. При достаточно большой величине сил сдвига происходит проскальзывание одного слоя относительно другого; в этом случае перемещение (сдвиг) одного слоя относительно другого происходит без увеличения сил в плоскости контакта слоёв [21].

При снижении температуры длина сегмента уменьшается, однако уменьшению длины препятствуют касательные силы трения и адгезии, действующие в области контакта слоёв. Таким образом, с физической точки зрения взаимодействие слоёв сопровождается деформациями растяжения верхнего слоя и деформациями сдвига одного слоя относительно другого. С учётом симметрии задачи находим, что касательные силы и соответствующие деформации сдвига в середине длины сегмента равны нулю и возрастают по модулю в направлении от середины длины сегмента к его торцам. С другой стороны, деформации растяжения возрастают в направлении от торцов сегмента к его середине.

В данной работе использованы методы математического моделирования механических систем. Для проверки адекватности результатов моделирования использованы известные по литературе данные.

3. Результаты и их обсуждение

Формализуя представленный выше подход к моделированию состояния исследуемого сегмента автомобильной дороги, можно показать, что при уменьшении температуры на $\Delta t = t - t_0$ наибольшие значения растягивающих сил N_{max} и напряжений σ_{max} , а также сил сдвига T_{max} и касательных напряжений τ_{max} могут быть определены по формулам:

$$N_{max} = -k B \alpha \Delta t L^2 / 8, \quad (1)$$

$$\sigma_{max} = -k \alpha \Delta t L^2 / 8H, \quad (2)$$

$$T_{max} = -k B \alpha \Delta t L^2 / 8, \quad (3)$$

$$\tau_{max} = -k \alpha \Delta t L. \quad (4)$$

Здесь $\Delta t < 0$ — перепад температур; коэффициент k , как отмечено выше, характеризует силу трения и адгезии, распределённую по площади контакта слоёв [16], [21]; B , H и L — соответственно ширина, толщина и длина верхнего слоя сегмента; α — коэффициент

теплового расширения [19]. Обоснование представленных формул требует отдельного рассмотрения, выходящего за рамки данной статьи.

Используя приведенную выше формулу для σ_{max} и известные по литературе оценки растягивающих напряжений σ_m , которые могут привести к появлению морозобойных трещин [19], из условия $\sigma_{max} = \sigma_m$ найдём максимальную длину сегмента без трещин при $\Delta t = t - t_0 < 0$:

$$L_{max} = (-8 \sigma_m H / k \alpha \Delta t)^{1/2}. \quad (5)$$

Величина L_{max} определяет также расстояние между морозобойными трещинами. На рисунке 1 представлен пример визуализации зависимости (5), если $\sigma_m = 0,5$ МПа, $H = 0,1$ м, $k = 5 \dots 250$ MN / м³, $\alpha = 2 \cdot 10^{-4}$ °C⁻¹, $t_0 = 0$ °C, $t = -1 \dots -20$ °C.

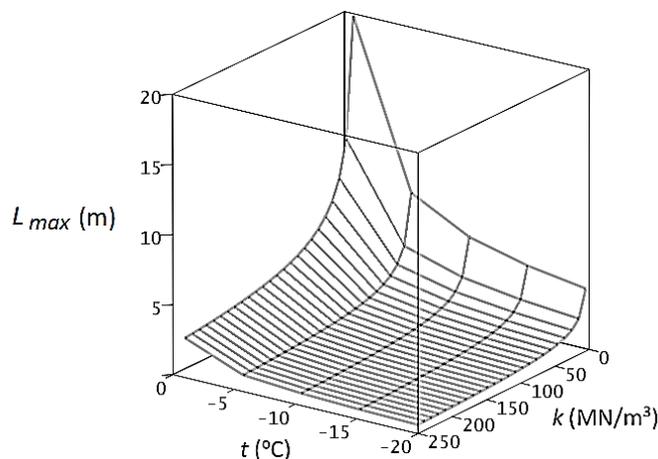


Рисунок 1. Зависимость $L_{max}(t, k)$, если σ_m , H и α постоянны

При конечных значениях α , если $t \rightarrow 0$ или $k \rightarrow 0$, то $L_{max} \rightarrow \infty$, т. е. теоретически в этом случае морозобойных трещин нет. Понижение температуры t и увеличение сцепления слоёв k ведёт к уменьшению L_{max} ; в данном примере минимальное значение $L_{max} = 0,442$ м.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при промерзании наибольшая интенсивность процессов изменения структуры рассматриваемого сегмента имеет место в окрестности точки с близкими к нулю координатами t и k ; интенсивность данных процессов быстро падает с увеличением t и k (рисунок 1).

С практической точки зрения уменьшение k моделирует уменьшение сцепления между верхним слоем и основанием, что принимается во внимание при обосновании мероприятий, направленных на предотвращение образования трещин в асфальтобетонных покрытиях. К числу таких мероприятий относится также увеличение толщины асфальтобетонного слоя [20, с. 72].

Если $\Delta t \neq 0$, то с увеличением прочности материала верхнего слоя (σ_m) и его толщины H расстояние между трещинами L_{max} (5) возрастает, а значит, уменьшается количество трещин на единицу длины автомобильной дороги. Эти замечания справедливы для автомобильных дорог с бетонным или асфальтобетонным покрытием, толщина которого H почти не изменяется при промерзании. Принципиальное отличие грунтовой дороги заключается в том, что при промерзании возрастает толщина верхнего слоя H ; кроме того, увеличивается прочность σ_m мёрзлого грунта как материала данного слоя. Современные представления о закономерностях изменения прочности грунтов при отрицательных температурах достаточно подробно рассмотрены в статьях [12], [19], [22], [23].

Применяя упрощённый подход к анализу закономерностей влияния указанных выше σ_m и H на L_{max} , предположим, что толщина верхнего слоя мёрзлого грунта H и прочность материала данного слоя σ_m при $t = -10$ °C равны, соответственно H_{10} и σ_{m10} . Предположим также, что σ_m и H изменяются пропорционально $|\Delta t|$ с коэффициентами β_H и β_σ соответственно. Тогда $H = H_{10} \beta_H |\Delta t|$, $\sigma_m = \beta_\sigma \sigma_{m10} |\Delta t|$. Коэффициенты β_H и β_σ могут быть определены с использованием известных по литературе данных. Пусть $\beta_H = \beta_\sigma = \beta = 0,1$ °C⁻¹. Тогда, используя (5), получим:

$$L_{max} = (8 \sigma_m H / k \alpha |\Delta t|)^{1/2} = \beta (8 \sigma_{m10} H_{10} |\Delta t| / k \alpha)^{1/2}. \quad (6)$$

Детализируя зависимость (6), рассмотрим пример. Пусть $\sigma_{m10} = 0,2$ МПа, $H_{10} = 0,1$ м, $\beta = 0,1$ °C⁻¹, $t_0 = 0$ °C, $t = -2 \dots -10$ °C, $k = 0,5 \dots 20$ MN / м³, $\alpha = 2 \cdot 10^{-4}$ °C⁻¹. Для данного набора числовых значений визуализация зависимости (6) представлена на рисунке 2.

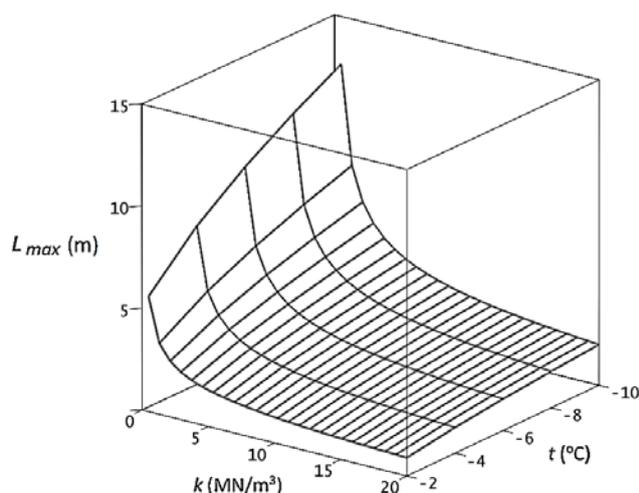


Рисунок 2. Зависимость $L_{max}(t, k)$, если $\alpha = 2 \cdot 10^{-4}$ °C⁻¹

Необходимо отметить, что коэффициент теплового расширения мёрзлого грунта α нелинейно зависит от температуры, причём данная зависимость для ряда грунтов имеет локальный максимум при температуре примерно $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19, с. 162]. Это означает, что при той же температуре зависимость (6) имеет минимум, что с физической точки зрения соответствует наименьшему расстоянию между морозобойными трещинами в грунте. Например, согласно опубликованным данным [19, рис. 2], найдём, что для мёрзлого суглинка при $t = -2; -3; -5; -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения α равны, соответственно $2 \cdot 10^{-4}; 3 \cdot 10^{-4}; 2 \cdot 10^{-4}; 5 \cdot 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Принимая $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t = -2; -3; -5; -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, получим по формуле (6) при $k = 0,5\text{ МН/м}^3$ значения L_{max} , соответственно 6,9; 5,7; 8,9; 25,3 м. Минимальное значение, равное 5,7 м, представляет собой оценку расстояния между морозобойными трещинами.

Проверяя адекватность данной оценки, обратимся к опубликованным данным [24, с. 976], согласно которым «с морозобойными трещинами связано формирование на дневной поверхности почвы полигонально-западного микрорельефа. Полигоны имеют диаметр 2—6 м, ширина трещин 3—5 см». Таким образом, найденное по формуле (6) значение расстояния между морозобойными трещинами (5,7 м) является реалистичным.

Важно обратить внимание на то обстоятельство, что в рассмотренном случае минимальное значение L_{max} , равное 5,7 м, достигается при $t = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Следовательно, отклонения температуры от $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ с течением времени не приведут к появлению новых морозобойных трещин в грунте. Этот вывод, полученный как результат моделирования с применением формулы (6), подтверждается опубликованными в работе [24, с. 976] данными об эволюции криогенных трещин, согласно которым «в некоторых случаях трещина возникает один раз и в этом месте больше не повторяется много лет».

Как отмечено выше, мёрзлый грунт является материалом верхнего слоя грунтовой лесовозной дороги. При строительстве таких дорог в качестве местного материала используют смесь лесной почвы и грунта (почво-грунт) [1], [14]. В этой связи, для оценки адекватности представленного выше расстояния между морозобойными трещинами, представляют интерес опубликованные в статье [25] данные о полигональной структуре рельефа четырёх разновидностей серых лесных почв. «Морфологически это выглядит как чередование бугров и западин округлой и овальной форм, диаметр бугров составляет от 5 до 20 м, а превышение над западинами — от 0,5 до 3 м. Начало формирования микрорельефа относят к позднему плейстоцену, когда во время похолодания произошло полигональное растрескивание поверхности и заполнение трещин жильным льдом» [25, с. 44]. В данном случае диаметр бугров от 5 до 20 м можно рассматривать как характерное расстояние между морозобойными трещинами, которое не противоречит представленному выше значению 5,7 м.

Как отмечено выше, рассматриваемые трещины в начальной стадии своей эволюции образуются при температуре примерно $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данное обстоятельство позволяет сформулировать следующие предположения: толщина слоя мёрзлого грунта в данной стадии невелика; температура $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ характерна для промерзания в межсезонный период, когда

влажность грунта большая и поэтому сцепление слоя мёрзлого грунта с нижележащим слоем талого грунта с примесями глины невелико. Соответственно, невелик и коэффициент сцепления k в формуле (6), принятый равным $0,5 \text{ МН} / \text{м}^3$. Уточнение значений данного коэффициента требует продолжения исследований с учётом известных результатов [26], относящихся к строительству автомобильных дорог.

4. Выводы и заключение

В работе продемонстрированы возможности применения математического моделирования механических систем для анализа условий формирования морозобойных трещин в грунтах. Рассмотренная задача заключается в прогнозе расстояния между морозобойными трещинами в грунте. Представлены практические примеры численной реализации предложенного подхода. По результатам выполненного исследования можно сформулировать следующие выводы:

- разработана методика математического моделирования в актуальных задачах, связанных с анализом состояния временных лесовозных автомобильных дорог;
- разработанная методика обеспечивает достаточную адекватность результатов моделирования, не требует громоздких вычислений;
- результаты выполненного исследования не противоречат известным по литературе данным;
- подтверждён вывод работы В. П. Мерзлякова [19] о том, что коэффициент теплового расширения следует рассматривать как важную характеристику мерзлого грунта наряду с другими его характеристиками;
- практическое значение работы определяется тем, что представленные результаты могут быть использованы при обосновании технических решений по совершенствованию зимних лесовозных дорог;
- перспективы исследования связаны с уточнением данных о взаимодействии слоя мёрзлого грунта, взаимодействующего с нижележащим слоем талого грунта.

Список литературы

1. Проектирование, строительство, содержание и ремонт лесных дорог : учебное пособие / В. К. Катаров, Н. В. Ковалёва, А. Н. Кочанов, В. И. Марков, А. Н. Петров, Е. И. Ратькова, Д. В. Рожин, А. В. Степанов, А. П. Соколов, В. С. Сютёв. — Петрозаводск : Издательство ПетрГУ, 2014. — 92 с.
2. Мохирев, А. П. Методика выбора лесозаготовительных машин под природно-климатические условия / А. П. Мохирев // Лесотехнический журнал. — 2016. — Т. 6, № 4 (24). — С. 208—215.
3. Прокопьев Е. А. Влияние климата на объёмы вывозки древесины в Республике Карелия / Е. А. Прокопьев, Н. А. Рослякова, П. А. Рязанцев // Друкеровский вестник. — 2017. — № 5. — С. 173—185.

4. Планирование сроков эксплуатации зимних лесовозных дорог на основе анализа статистики климатических данных / А. П. Мохирев, Е. В. Горяева, М. П. Мохирев, А. В. Ившина // Лесотехнический журнал. — 2018. — № 2. — С. 176—185.
5. Шегельман, И. Р. Оценка сезонности при подготовке лесозаготовительного производства / И. Р. Шегельман, В. М. Лукашевич // Фундаментальные исследования. — 2011. — № 12—3. — С. 599—603.
6. Усовершенствование методики определения прочности дорожной конструкции / А. М. Бургонутдинов, О. Н. Бурмистрова, С. И. Сушков, И. Н. Кручинин // Лесотехнический журнал. — 2016. — Т. 6. — № 3 (23). — С. 65—73.
7. Бургонутдинов, А. М. Методика образования морозобойных трещин на автомобильных дорогах и способы борьбы с этим явлением / А. М. Бургонутдинов, Б. С. Юшков, О. Н. Бурмистрова // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 8—2. — С. 285—289.
8. Развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли — опыт Финляндии / Ю. Ю. Герасимов, С. Карвинен, В. С. Сюнёв, А. П. Соколов, В. К. Катаров // Транспортное дело России. — 2009. — № 7. — С. 99—102.
9. Методы, модели и алгоритмы повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесных автомобильных дорог в процессе проектирования, строительства и эксплуатации / А. В. Скрыпников, Т. В. Скворцова, Е. В. Кондрашова, А. И. Вакулин, В. Н. Логачев. — Москва : Издательство «ФЛИНТА», 2013. — 312 с.
10. Использование укрепленных грунтов, местных материалов и отходов промышленности для строительства дорожных одежд лесных дорог : [монография] / М. Ю. Смирнов, А. В. Скрыпников, В. Н. Логачев, Е. В. Чернышова, В. С. Логойда, Д. В. Ломакин. — Йошкар-Ола : ПГТУ, 2017. — 169 с.
11. Павлов, Ф. А. Покрытия лесных дорог / Ф. А. Павлов. — Москва : Лесная пром-сть, 1980. — 176 с.
12. Миляев, А. С. Альтернативная методика расчета промерзания слоистых оснований сезонных зимних лесовозных дорог / А. С. Миляев // Resources and Technology. — 2010. — Т. 8. — С. 83—87.
13. Сушков, С. И. Методика динамического расчёта насыпи лесовозных автомобильных дорог / С. И. Сушков, О. Н. Бурмистрова, М. А. Михеевская // Лесотехнический журнал. — 2013. — № 4 (12). — С. 89—93.
14. Ратькова, Е. И. Воздействие циклов «замораживание — оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии / Е. И. Ратькова, В. С. Сюнёв, В. К. Катаров // Resources and Technology. — 2013. — Т. 10, № 1. — С. 73—89.
15. Merzlyakov, V. P. Physical and mechanical conditions for primary frost crack formation / V. P. Merzlyakov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2016. — Vol. 53, No. 4. — P. 221—225.
16. Chen, G. One-dimensional nonlinear model for prediction of crack spacing in concrete pavements / G. Chen, G. Baker // Advances in Structural Engineering. — 2005. — Vol. 8, No. 6. — P. 595—602.
17. Rajbongsh, P. Estimation of temperature stress and low-temperature crack spacing in asphalt pavements / P. Rajbongsh, A. Das // Journal of Transportation Engineering. — 2009. — Vol. 135, No. 10. — P. 745—752.
18. Judycki, J. A new viscoelastic method of calculation of low-temperature thermal stresses in asphalt layers of pavements / J. Judycki // International Journal of Pavement Engineering. — 2018. — Vol. 19. — Issue 1. — P. 24—36.

19. Мерзляков, В. П. Коэффициент теплового расширения как характеристика мёрзлых грунтов / В. П. Мерзляков // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. — 2012. — № 2. — С. 159—167.
20. Попов, А. Н. Математическая модель деформирования асфальтобетонного слоя усиления сборного аэродромного покрытия под воздействием температуры / А. Н. Попов, А. В. Кочетков, А. Н. Масалькин // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2015. — № 2 (38). — С. 65—74.
21. Shen, W. Distributed thermal cracking of AC pavement with frictional constraint / W. Shen, D. J. Kirkner // Journal of Engineering Mechanics. — 1999. — Vol. 125, No. 5. — P. 554—560.
22. Коновалов, А. А. Фазовые переходы и долговечность мёрзлого грунта // Криосфера Земли. — 2014. — Т. XVIII, № 1. — С. 31—38.
23. Роман, Л. Т. Влияние степени водогазонасыщения на температурные деформации мерзлых грунтов / Л. Т. Роман, В. П. Мерзляков, А. Н. Малеева // Криосфера Земли. — 2017. — Т. XXI, № 3. — С. 24—31.
24. Морфологические и физические свойства почвенной массы из криогенных трещин мерзлотных лугово-чернозёмных почв Забайкалья / Ю. Б. Цыбенков, Г. Д. Чимитдоржиева, Э. О. Чимитдоржиева, Р. А. Егорова, Е. Ю. Мильхеев, Т. В. Давыдова, Ц. Д. Корсунова // Почвоведение. — 2016. — № 8. — С. 975—981.
25. Макарова, А. П. Почвенные и микробиологические свойства целинных и залежных серых лесных почв Приангарья, осложнённых палеокриогенезом / А. П. Макарова, А. А. Козлова // Пермский аграрный вестник. — 2014. — № 4 (8). — С. 44—50.
26. Zhang, J. Influence of supporting base characteristics on shrinkage-induced stresses in concrete pavements / J. Zhang, V. C. Li // Journal of Transportation Engineering. — 2001. — Т. 127, No. 6. — P. 455—462.

References

1. Proektirovanie, stroitel'stvo, sodержanie i remont lesnyh dorog / V. K. Katarov, N. V. Kovaljova, A. N. Kochanov, V. I. Markov, A. N. Petrov, E. I. Rat'kova, D. V. Rozhin, A. V. Stepanov, A. P. Sokolov, V. S. Sjunjov. — Petrozavodsk : Izdatel'stvo PetrGU, 2014. — 92 s.
2. Mohirev, A. P. Metodika vybora lesozagotovitel'nyh mashin pod prirodno-klimaticheskie uslovija / A. P. Mohirev // Lesotekhnicheskij zhurnal. — 2016. — Т. 6, No. 4 (24). — S. 208—215.
3. Prokop'ev, E. A. Vlijanie klimata na ob#jomy vyvozki drevesiny v respublike Karelija / E. A. Prokop'ev, N. A. Rosljakova, P. A. Rjazancev // Drukerovskij vestnik. — 2017. — No. 5. — S. 173—185.
4. Planirovanie srokov jekspluatacii zimnih lesovoznnyh dorog na osnove analiza statistiki klimaticheskih dannyh / A. P. Mohirev, E. V. Gorjaeva, M. P. Mohirev, A. V. Ivshina // Lesotekhnicheskij zhurnal. — 2018. — No. 2. — S. 176—185.
5. Shegel'man, I. R. Ocenka sezonnosti pri podgotovke lesozagotovitel'nogo proizvodstva / I. R. Shegel'man, V. M. Lukashevich // Fundamental'nye issledovanija. — 2011. — No. 12—3. — S. 599—603.
6. Uovershenstvovanie metodiki opredelenija prochnosti dorozhnoj konstrukcii / A. M. Burgonutdinov, O. N. Burmistrova, S. I. Sushkov, I. N. Kruchinin // Lesotekhnicheskij zhurnal. — 2016. — Т. 6, No. 3 (23). — S. 65—73.

7. *Burgonutdinov, A. M.* Metodika obrazovanija morozobojnyh treshhin na avtomobil'nyh dorogah i sposoby bor'by s jetim javleniem / A. M. Burgonutdinov, B. S. Jushkov, O. N. Burmistrova // Fundamental'nye issledovanija. — 2014. — No. 8—2. — S. 285—289.
8. Razvitie transportnoj infrastruktury lesnoj otrasli — opyt Finljandii / Ju. Ju. Gerasimov, S. Karvinen, V. S. Sjunjov, A. P. Sokolov, V. K. Katarov // Transportnoe delo Rossii. — 2009. — No. 7. — S. 99—102.
9. Metody, modeli i algoritmy povyshenija transportno-jekspluacionnyh kachestv lesnyh avtomobil'nyh dorog v processe proektirovanija, stroitel'stva i jekspluacii / A. V. Skrypnikov, T. V. Skvorcova, E. V. Kondrashova, A. I. Vakulin, V. N. Logachev. — Moskva : Izdatel'stvo «FLINTA», 2013. — 312 s.
10. Ispol'zovanie ukreplennyh gruntov, mestnyh materialov i othodov promyshlennosti dlja stroitel'stva dorozhnyh odezhd lesnyh dorog / M. Ju. Smirnov, A. V. Skrypnikov, V. N. Logachev, E. V. Chernyshova, V. S. Logojda, D. V. Lomakin. — Joshkar-Ola : PGU, 2017. — 169 s.
11. *Pavlov, F. A.* Pokrytija lesnyh dorog / F. A. Pavlov. — Moskva : Lesnaja promyshlennost', 1980. — 176 s.
12. *Miljaev, A. S.* Al'ternativnaja metodika rascheta promerzaniya sloistyh osnovanij sezonnyh zimnih lesovoznyh dorog / A. S. Miljaev // Resources and Technology. — 2010. — T. 8. — S. 83—87.
13. *Sushkov, S. I.* Metodika dinamicheskogo raschjota nasypi lesovoznyh avtomobil'nyh dorog / S. I. Sushkov, O. N. Burmistrova, M. A. Mihieevskaja // Lesotehnicheskij zhurnal. — 2013. — No. 4 (12). — S. 89—93.
14. *Rat'kova, E. I.* Vozdejstvie ciklov «zamorazhivanie — ottaivanie» na deformacionnye svojstva lesnyh pochvo-gruntov Karelii / E. I. Rat'kova, V. S. Sjunjov, V. K. Katarov // Resources and Technology. — 2013. — T. 10, No.1. — S. 73—89.
15. *Merzlyakov, V. P.* Physical and mechanical conditions for primary frost crack formation / Merzlyakov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2016. — Vol. 53, No. 4. — P. 221—225.
16. *Chen, G.* One-dimensional nonlinear model for prediction of crack spacing in concrete pavements / G. Chen, G. Baker // Advances in Structural Engineering. — 2005. — Vol. 8, No. 6. — P. 595—602.
17. *Rajbongsh, P.* Estimation of temperature stress and low-temperature crack spacing in asphalt pavements / P. Rajbongsh, A. Das // Journal of Transportation Engineering. — 2009. — Vol. 135, No. 10. — P. 745—752.
18. *Judycki, J.* A new viscoelastic method of calculation of low-temperature thermal stresses in asphalt layers of pavements / J. Judycki // International Journal of Pavement Engineering. — 2018. — Vol. 19. — Issue 1. — P. 24—36.
19. *Merzljakov, V. P.* Koeficient teplovogo rasshirenija kak harakteristika merzlyh gruntov / V. P. Merzljakov // Geojekologija, inzhenernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija. — 2012. — No. 2. — S. 159—167.
20. *Popov, A. N.* Matematicheskaja model' deformirovanija asfal'tobetonnoego sloja usilenija sbornogo ajerodromnogo pokrytija pod vozdejstviem temperatury / A. N. Popov, A. V. Kochetkov, A. N. Masalykin // Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury. — 2015. — No. 2 (38). — S. 65—74.
21. *Shen, W.* Distributed thermal cracking of AC pavement with frictional constraint / W. Shen, D. J. Kirkner // Journal of Engineering Mechanics. — 1999. — Vol. 125, No. 5. — P. 554—560.

22. *Konovalov, A. A.* Fazovye perehody i dolgovechnost' merzlogo grunta / A. A. Konovalov // Kriosfera Zemli. — 2014. — T. XVIII, No. 1. — S. 31—38.
23. *Roman, L. T.* Vlijanie stepeni vodogazonasysshenija na temperaturnye deformacii merzlyh gruntov / L. T. Roman, V. P. Merzljakov, A. N. Maleeva // Kriosfera Zemli. — 2017. — T. XXI, No. 3. — S. 24—31.
24. Morfologicheskie i fizicheskie svojstva pochvennoj massy iz kriogennyh treshhin merzlotnyh lugovo-chernozemnyh pochv Zabajkal'ja / Ju. B. Cybenov, G. D. Chimitdorzhieva, Je. O. Chimitdorzhieva, R. A. Egorova, E. Ju. Mil'heev, T. V. Davydova, C. D. Korsunova // Pochvovedenie. — 2016. — No. 8. — S. 975—981.
25. *Makarova, A. P.* Pochvennye i mikrobiologicheskie svojstva celinnyh i zaleznyh seryh lesnyh pochv Priangar'ja, oslozhnennyh paleokriogenezom / A. P. Makarova, A. A. Kozlova // Permskij agrarnyj vestnik. — 2014. — No. 4 (8). — S. 44—50.
26. *Zhang, J.* Influence of supporting base characteristics on shrinkage-induced stresses in concrete pavements / J. Zhang, V. C. Li // Journal of Transportation Engineering. — 2001. — T. 127, No. 6. — P. 455—462.

© Гаврилов Т. А., Хорошилов К. В., Колесников Г. Н., 2018