

УДК 625.711.84

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4602

Обзор

Функционирование временных лесовозных дорог в зимний и межсезонный периоды (на примере Республики Карелия)

Константин В. Хорошилов¹, Василий К. Катаров¹, Тиммо А. Гаврилов^{1,*},
Геннадий Н. Колесников¹

¹ Петрозаводский государственный университет, Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 29; E-Mails: ale-ks-na@yandex.ru (К. Х.); vkatarov@petrsu.ru (В. К.); gtimmo@mail.ru (Т. Г.); kgn@petrsu.ru (Г. К.)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: gtimmo@mail.ru (Т. Г.);
Tel.: +7-814-2-76-64-25

Получена: 24 апреля 2019 / Принята: 29 мая 2019 / Опубликовано: 20 июня 2019

Аннотация: В данной статье внимание фокусируется на анализе закономерностей функционирования лесовозных дорог на примере Республики Карелия. В настоящее время большая часть объёмов лесозаготовок приходится на зимний период. Однако по данным литературы известно, что изменения климата могут стать одной из причин ускоренного развития транспортной инфраструктуры круглогодичного действия. С учётом экономической целесообразности и технической возможности, на ближайшую перспективу остаются актуальными проблемы совершенствования лесных дорог всех видов. Объектом исследования в статье являются временные лесные дороги. Предмет исследования — закономерности функционирования временных лесных дорог в зимний и межсезонные периоды. Цель работы — обоснование рекомендаций по совершенствованию временных лесных дорог в межсезонные периоды. Используются методы математического моделирования и результаты экспериментальных исследований. Рассмотрены особенности температурных деформаций грунтового дорожного полотна, которые могут быть причиной его разрушения. Основным результатом является обоснование ограничений движения автотранспорта по лесным дорогам, если температура равна $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше.

Ключевые слова: объёмы лесозаготовок; зимние лесовозные дороги; верхний слой; изгиб; растяжение; сезонное промерзание; моделирование.

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4602

Review

Functioning of temporary logging roads in winter and off-season periods (a case of the Republic of Karelia)

**Konstantin V. Khoroshilov¹, Vasily K. Katarov¹, Timmo A. Gavrilov^{1,*},
Gennady N. Kolesnikov¹**

¹ Petrosavodsk State University, Russia, 185910, Republic of Karelia, Petrozavodsk, pr. Lenina, 29; E-Mails: ale-ks-na@yandex.ru (K. Kh.); vkatarov@petsu.ru (V. K.); gtimmo@mail.ru (T. G.); kgn@petsu.ru (G. K.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: gtimmo@mail.ru (T. G.); Tel.: +7-814-2-76-64-25

Received: 24 April 2019 / Accepted: 29 May 2019 / Published: 20 June 2019

Abstract: This article focuses on the analysis of patterns of functioning of forest roads on the example of the Republic of Karelia. At present, most of the logging volumes are in the winter period. However, according to the literature, it is known that climate change may be one of the reasons for the accelerated development of transport infrastructure throughout the year. Taking into account economic feasibility and technical feasibility, in the near future, the problems of improving forest roads of all kinds remain topical. The object of research in the article are temporary forest roads. The subject of the research is the patterns of functioning of temporary forest roads in the winter and off-season periods. The goal of the work is to substantiate recommendations for improving temporary forest roads during off-season periods. Used methods of mathematical modeling and the results of experimental studies. The features of temperature deformations of the unpaved roadbed, which may cause the destruction of the roadway, are considered. The main result is the justification of restrictions on the movement of vehicles on forest roads, if the temperature is -3°C and above.

Keywords: logging volumes; winter logging roads; top layer; bending; stretching; seasonal freezing; modeling.

1. Введение

Древесина относится к возобновляемым ресурсам, что особенно ценно с экологической и экономической точек зрения. Однако существуют и становятся всё более актуальными проблемы не только рационального использования, но и заготовки древесины, включая её вывозку. В данной статье внимание фокусируется на анализе закономерностей функционирования лесовозных дорог на примере Республики Карелия. Характеризуя масштаб проблем, отметим следующее. В мире леса занимают 4 млрд га территории, что составляет около 30 % площади суши. Более 50 % всех лесных площадей находится на территории таких стран, как Россия, Бразилия, Канада, Соединённые Штаты Америки и Китай. В этих странах сосредоточена большая часть запасов древесины — 155 млрд куб. м лиственной и 127 млрд куб. м хвойной древесины. На долю России приходится более 20 % площади мирового лесного покрова [1].

По объёму лесозаготовок в 2016 г. лидировали Соединённые Штаты Америки (402 млн куб. м), Китай (340 млн куб. м), Бразилия (254 млн куб. м), Россия (214 млн куб. м) и Канада (163 млн куб. м). Объём мировой лесозаготовки составляет 3,7 млрд куб. м, из них деловой древесины — около 1,9 млрд куб. м. Объёмы лесозаготовок определяются доступностью лесных ресурсов, развитостью лесной промышленности и наличием рыночных возможностей [1].

В настоящее время вклад лесного комплекса в экономику России существенно ниже оцениваемого потенциала и аналогичного показателя других стран, схожих с Россией по объёмам запасов и заготовки древесины, что показано в работе [1], где определено, что в настоящее время лесной комплекс России является динамично развивающимся сектором экономики. Основные направления, цели и задачи более полной реализации потенциала данного сектора экономики конкретизированы в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г., утверждённой Распоряжением Правительства РФ от 20.09.2018 № 1989 р (далее — Стратегия).

Количественной оценкой материальной основы развития данного сектора экономики являются объёмы лесозаготовок (включая вывозку лесоматериалов), планируемые с учётом выполнения условий рационального природопользования. В настоящее время вывозка заготовленных лесоматериалов осуществляется преимущественно по автомобильным лесным дорогам, классификация которых, а также правила проектирования, строительства и содержания определены в Своде правил СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства».

Объёмы лесозаготовок на отрезке времени с 1995 по 2016 г. и планы на 2030 г. характеризуются следующими данными: 1995 г. — 150 млн куб. м, 2016 г. — 213,8 млн куб. м. Предусматривается, что уровень заготовки леса к 2030 г. составит 286,1 млн куб. м, что, однако, ниже уровня 1990 г. (304 млн куб. м) [1]. Сложившуюся ситуацию можно объяснить истощением лесосырьевой базы, доступной с точки зрения

лесотранспортной инфраструктуры, а также недостаточными объёмами строительства автомобильных лесных дорог на новых территориях лесозаготовок.

Касаясь социально-экономических оценок, отметим следующее. Заготовка древесины остаётся наиболее распространённым видом использования лесов, как по площади, так и по объёму платежей в бюджет. Запасы древесины в России оцениваются в 82,8 млрд куб. м. При этом величина ежегодной расчётной лесосеки составляет 704 млн куб. м. Однако среднее значение показателя освоения расчётной лесосеки в период 2011—2016 гг. находилось в интервале от 28 до 31 %. Увеличение освоения расчётной лесосеки в настоящее время ограничено недостаточной лесотранспортной инфраструктурой (дороги, мосты и другие объекты), а также удалённостью от железнодорожных и других транспортных путей [1].

Лесозаготовками занимаются, по классификации работы [1], мелкие компании (объём заготовки древесины менее 20 тыс. куб. м в год), средние (от 20 до 100 тыс. куб. м), крупные (от 100 до 500 тыс. куб. м) и очень крупные (более 500 тыс. куб. м). По состоянию на 2016 г. численность занятых в лесном комплексе оценивается в 500 тыс. чел. (0,8 % занятых) [1]. В современных условиях сформировалась тенденция к уменьшению доли древесины, заготавливаемой мелкими компаниями. При этом увеличивается количество крупных и очень крупных компаний, большая часть которых действует на территориях Северо-Западного и Сибирского федеральных округов. Практика показала, что мелкие компании имеют наименьшее освоение расчётной лесосеки, а крупные компании — наибольшее. Однако освоение расчётной лесосеки очень крупными компаниями пока ниже, чем у средних и крупных компаний; основная причина такого состояния заключается в том, что очень крупными компаниями осваиваются новые лесные участки, на которых в настоящее время нет транспортной инфраструктуры (дорог, мостов и других объектов). В этой связи актуализируется комплексная проблема совершенствования технологий проектирования, строительства и ремонта лесных дорог, в т. ч. зимних лесовозных дорог.

Наибольшую долю (до 25 %) поступлений неналоговых доходов всех видов от использования лесов формируют субъекты Российской Федерации, входящие в состав Северо-Западного федерального округа, на которые приходится 17 % указанной выше расчётной лесосеки России [1]. Очевидно, такое соотношение ($25 / 17 = 1,47$) может служить индикатором уровня развития лесного комплекса. Если индикатор больше, равен или меньше единицы, то, соответственно, уровень развития больше, равен или меньше среднего значения. В данном случае доминирование Северо-Западного федерального округа обусловлено полным комплексом производств: лесозаготовкой, целлюлозно-бумажной промышленностью, выпуском древесных плит и мебели, что связано с наличием достаточной ресурсной базы, развитой логистической системы и близостью рынков Санкт-Петербурга и Москвы. Однако эта доля (25 %) с течением времени может уменьшиться, если обеспеченность лесотранспортной инфраструктурой в других субъектах повысится, а на Северо-Западе останется на прежнем уровне. Например, по причине низкой обеспеченности транспортной инфраструктурой доход от использования лесов в Дальневосточном

федеральном округе, в котором сосредоточено около 13 % расчётной лесосеки России, не превышает 10 % от общего объёма поступлений в бюджетную систему Российской Федерации (значение указанного выше индикатора равно $10 / 13 = 0,77$). Необходимо, однако, заметить, что в данном округе значительную часть запасов древесины составляет лиственница (85 % в Якутии, 76 % в Амурской области, 56 % в Хабаровском крае), промышленное использование которой в настоящее время ограничено [1].

В настоящее время большая часть объёмов лесозаготовок и вывозки древесины приходится на зимний период [2]. Влияние погодных условий на объёмы вывозки древесины по временным снежно-ледяным и ледяным дорогам в условиях Республики Карелия исследовано в работе [3], в которой подтверждено доминирование объёмов зимней вывозки древесины, однако прогнозируется, что изменения климата могут стать одной из причин ускоренного развития транспортной инфраструктуры круглогодичного действия. Тем не менее, с учётом экономической целесообразности и технической возможности, в настоящее время и на ближайшую перспективу остаются актуальными проблемы совершенствования лесовозных дорог всех известных видов [4], в т. ч. зимних снежно-ледяных и грунтовых дорог.

Эффективность использования зимних лесных дорог в составе лесотранспортной инфраструктуры подтверждает опыт их использования в Республике Карелия. Так, по данным за 2016 г., расчётная лесосека по республике составляла 11,5 млн куб. м, в т. ч. сплошные рубки — 8,1 млн куб. м, выборочные рубки — 3,4 млн куб. м. Годовой отпуск древесины по всем видам рубок в 2016 г. превысил уровень 2015 г. и составил 8,1 млн куб. м, т. е. 70 % от расчётной лесосеки по республике [<http://lesregion.ru/main/3138-lesopromyshlennyy-kompleks-respubliki-kareliya-v-2016-godu.html>].

Вместе с тем следует принимать во внимание, что «применение зимних лесовозных дорог — это временное решение доступности лесных ресурсов. Опыт соседней и похожей на Карелию по природно-климатическим условиям Финляндии показывает, что наличие развитой сети лесных дорог круглогодичного пользования позволяет не только эффективно осваивать лесные ресурсы, но и сберегать их от пожаров. Однако при ограниченных финансовых возможностях арендаторов лесного фонда и сокращении площади лесов в пределах существующей дорожной сети в ближайшей перспективе роль временных зимних дорог для обеспечения древесиной деревообрабатывающих и целлюлозно-бумажных производств будет возрастать. А вместе с ней будет возрастать влияние климатического фактора на функционирование всего лесного комплекса, что и произошло в Карелии из-за теплых декабрей в 2006, 2008, 2011, 2014 и 2015 годах» [5].

Таким образом, совершенствование лесной инфраструктуры, прежде всего обеспечение достаточной плотности лесных дорог, является необходимым условием развития лесного комплекса в целях рационального использования и воспроизводства лесов. Как следствие, является актуальной комплексная проблема технологических решений строительства лесных автомобильных дорог с учётом экономической целесообразности, технических

возможностей и экологической безопасности. В этой связи появляется ряд задач, для обоснования решений которых необходимы исследования, ориентированные на совершенствование технологических решений строительства лесных дорог. Цель статьи — обзор работ в затронутой области, включая краткий анализ известных результатов, поиск и обоснование новых возможностей решения сформулированной выше проблемы с учётом опыта предшествующих исследований в данной области. При этом, по причине сложности и комплексного характера проблемы, внимание фокусируется на ограниченном числе вопросов, которые относятся к актуальным и перспективным, но их изучение, если и проводилось, то в недостаточном объёме и требует продолжения экспериментальных и теоретических исследований, в т. ч. с применением методов математического моделирования.

2. Материалы и методы

С методологической точки зрения выбор материалов и методов исследования зависит от объекта и предмета изучения. Кроме того, выбор материалов и методов ограничен современными условиями технической возможности и экономической целесообразности.

Объектом исследования в данной статье являются известные по данным литературы результаты исследований, ориентированные на обоснование технологических решений строительства лесных дорог преимущественно из местных материалов и обеспечение их функциональной надёжности в зимний и межсезонный периоды. Предмет исследования — закономерности функционирования временных лесных дорог в зимний и межсезонные периоды. Для обоснования технологических решений предусмотрено использование методов математического моделирования и результатов экспериментальных исследований. При подготовке статьи использованы следующие методологические приёмы: сбор, систематизация и анализ результатов прикладных исследований в затронутой области; анализ тенденций в развитии соответствующих методов; оценка возможностей адаптации наиболее перспективных научных результатов к решению сформулированной выше проблемы; обоснование рекомендаций для дальнейших исследований, ориентированных на решение данной проблемы.

3. Результаты

К результатам в данной статье относятся анализ, обобщение и обоснование выводов о состоянии и способах решения сформулированной выше комплексной проблемы совершенствования технологии строительства лесных дорог с учётом современных условий. В работе использованы также новые результаты исследований, которые получены авторами статьи.

3.1. Организационно-технологические и технико-экономические аспекты

Особенности функционирования временных дорог в зимний период зависят от технологии их строительства. Технологии строительства лесных дорог, в т. ч. зимних лесовозных дорог, регламентируются в России сводом правил СП 288.1325800.2016. Характеризуя масштаб проблемы, отметим следующее. Документом, предшествующим процитированной выше Стратегии [1], является «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года», в которой, в частности, приведены данные о лесотранспортной инфраструктуре. Согласно этим данным, до 2010 г. доля дорог круглогодочного действия с твёрдым покрытием в общем объёме лесных дорог России составляла примерно 11 % (181 тыс. км), на грунтовые дороги круглогодочного действия приходилось 32% (514 тыс. км), примерно 57 % доля временных дорог. Таким образом, доля грунтовых и временных дорог, включая зимние дороги, составляет 89 %. Возможности использования грунтовых и зимних лесных дорог, прежде всего грунтовых, существенно зависят от погодных условий. По состоянию на 2011 г. продолжительность функционирования зимних лесовозных дорог с покрытием из уплотнённого снега, снежно-ледяных и ледяных дорог определена в работе [6] и составляла в условиях Республики Карелия 100—130 дней в год. Для сравнения: по состоянию на 2017 г. в условиях одного из районов Красноярского края продолжительность функционирования составила 158 дней в год для дороги с покрытием из снега и 188 дней для ледяной дороги [7].

Продолжая анализ закономерностей функционирования лесных дорог, рассмотрим статистические данные по виду деятельности «Лесозаготовки» по Республике Карелия за период с января 2018 г. по февраль 2019 г. включительно (рисунки 1, 2 и 3). Средний за месяц объём лесозаготовки в 2018 г. составил 554,2 тыс. плотных куб. м.

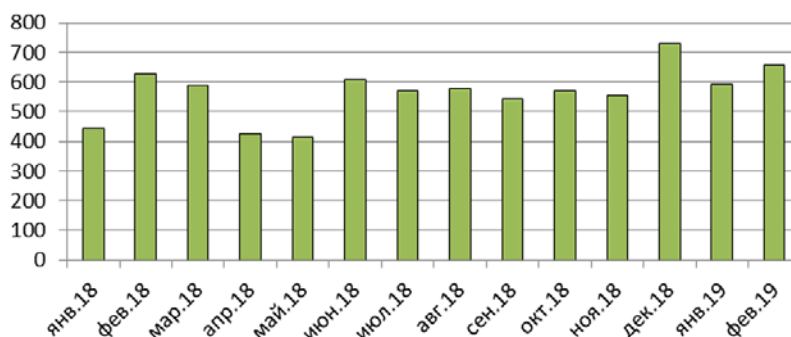


Рисунок 1. Заготовки, лесоматериалы необработанные, тыс. плотных куб. м [Источник: Карелиястат, krl.gks.ru]

Figure 1. Logging, round timber, thousand solid cubic meters [Data source: Kareliastat, krl.gks.ru]

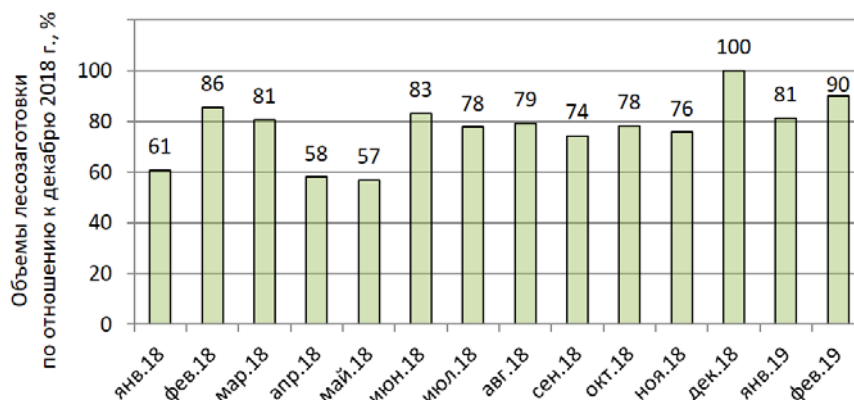


Рисунок 2. Объёмы лесозаготовки по отношению к декабрю 2018 г., %

Figure 2. The volume of round wood logging, in relation to December 2018, %

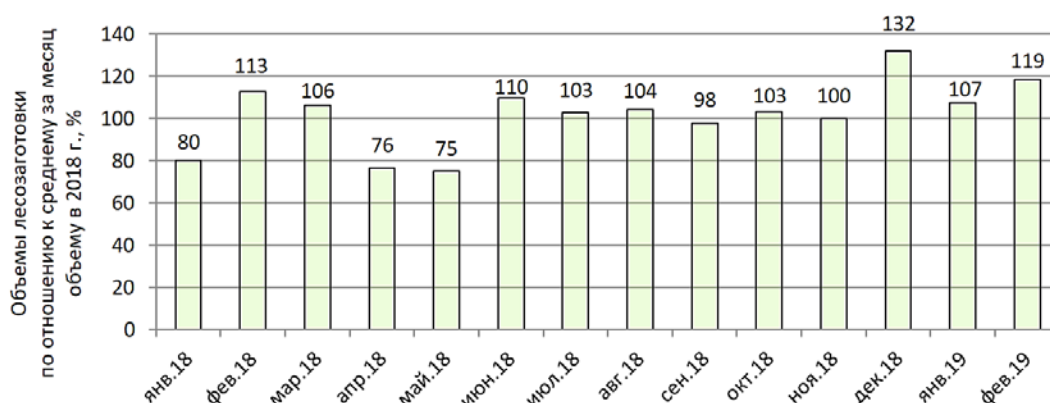


Рисунок 3. Объёмы лесозаготовки по отношению к среднему за месяц объёму в 2018 г., %

Figure 3. Logging volumes in relation to the monthly average in 2018, %

Наибольший объём лесозаготовок (730,8 тыс. плотных куб. м) выполнен в декабре (рисунок 1), что составляет 132 % от среднего за месяц объёма в 2018 г. (рисунок 3).

Наибольшее снижение зафиксировано в межсезонный период; в мае объём лесозаготовок составил 57 % по отношению к декабрю (рисунок 2) и 75 % по отношению к среднемесячному объёму лесозаготовок в 2018 г. Почти такая же ситуация зафиксирована в апреле (рисунок 3).

Соотношение наибольшего (декабрь) и наименьшего (май) объёмов равно: $730,8 / 415,0 = 1,76$.

Отношение наибольшего объёма к среднемесячному объёму равно: $730,8 / 554,2 = 1,32$.

Заметим, что рост объёмов лесозаготовки в декабре по отношению к январю можно объяснить влиянием объективных (наличие зимних лесных дорог) и субъективных (стремление успешно завершить календарный год) факторов. Кроме того, в январе относительно много официально установленных нерабочих дней.

Таким образом, использование зимних дорог позволяет повысить объём лесозаготовок в декабре на 32 % по отношению к среднему за месяц значению данного показателя и на 76 % по отношению к маю (рисунок 3).

Объёмы лесозаготовок в марте и апреле равны, соответственно 19,64 и 14,11 тыс. плотных куб. м в день (если считать, что в месяце 30 рабочих дней). Таким образом, с увеличением продолжительности функционирования зимней дороги на один день вывозка в межсезонный период возрастает на 5,53 тыс. плотных куб. м.

Это значение согласуется с результатами работы [8], в которой с использованием математических моделей было выявлено, что один день работы зимника в Карелии прибавляет к месячной вывозке от 7,89 до 9,86 тыс. куб. м. Если пересчитать эти данные в плотные кубические метры, учитывая коэффициент полндревесности, который равен примерно 0,65 [ГОСТ 32594-2013, Таблица 3], то получим границы интервала и среднее значение соответственно 5,13; 6,41 и 5,77 тыс. плотных куб. м. Расхождение с приведённым выше значением (5,53) невелико и равно: $(5,77 - 5,53) \cdot 100 \% / 5,53 = 4,32 \%$, что можно объяснить неточностью коэффициента полндревесности, базовые значения которого могут находиться в интервале от 0,63 до 0,67. Таким образом, полученные оценки можно считать достаточно достоверными, а методики их определения адекватными.

Приведённые выше данные и их анализ необходимы для прогнозирования продолжительности эксплуатации зимних лесовозных автодорог и планирования сроков начала и завершения лесозаготовок. Для решения этих задач следует использовать вероятностно-статистические методы обработки информации, что показано в работах [2], [6—8]. Например, в статье [9] для Сегежского района (Республика Карелия) был составлен прогноз, что с вероятностью 70 % снежные, снежно-ледяные и ледяные дороги начнут разрушаться соответственно 5, 7 и 27 марта. Поскольку разрушение дороги происходит постепенно, то начиная с 1 марта вывозка может продолжаться с той же вероятностью 15 дней по снежным дорогам, 21 день по снежно-ледяным и 39 дней по ледяным дорогам. Таким образом, ледяная дорога позволяет увеличить продолжительность вывозки на 18 дней по сравнению со снежно-ледяной дорогой и на 24 дня по сравнению со снежной.

В отмеченных выше работах рассмотрены преимущественно организационно-технологические аспекты, что является необходимым, но недостаточным условием обеспечения надёжности функционирования рассматриваемых лесных дорог. Необходимо также анализ физических и механических аспектов функционирования временных лесных дорог в зимний и, прежде всего, в межсезонный период, поскольку именно в межсезонный период существенно снижается несущая способность дорог и, как следствие, уменьшается объём лесозаготовок (рисунки 1—3).

3.2. Физические и механические аспекты функционирования зимних лесных дорог

Опыт строительства, ремонта и эксплуатации зимних автомобильных лесовозных дорог в условиях Северо-Запада России по состоянию на 1976 г. обобщён в обзоре [10]. Прикладные исследования в данной области остаются актуальными и в настоящее время.

В работе [11] исследованы особенности формирования уплотнённого слоя на проезжей части зимней лесной дороги в зависимости от количества выпадающих осадков в виде снега. Изучено влияние интенсивности движения автопоездов, влажности воздуха и температуры на плотность снега в верхнем слое зимней лесной дороги. Предложена методика определения толщины уплотнённого слоя снега к окончанию зимнего периода и рекомендованы значения предельной глубины колеи для зимних лесовозных магистральных автомобильных дорог, лесовозных усов и лесовозных веток.

Как известно, в регионах с холодным климатом распространены морозобойные трещины, которые появляются в верхнем слое мёрзлого грунта. Такие же трещины образуются в верхних слоях лесовозных дорог при их промерзании [12]. Физические и механические условия появления морозобойных трещин в грунтах исследованы в работе [13]. Анализ данных литературы показал, что основное внимание в работах по этой теме фокусируется на деформациях растяжения, которые появляются в верхнем слое временной дороги при понижении температуры, например в осенне-зимний период. Однако в дальнейшем, при переходе от зимы к лету, температура повышается, но если в межсезонный период остаётся отрицательной, то в верхнем слое лесной дороги появятся деформации сжатия, которые могут привести к потере устойчивости условно плоской формы равновесия сжатого слоя и к переходу данного слоя в искривлённое состояние (по аналогии с потерей устойчивости прямолинейной формы равновесия сжатого стержня в известной задаче Эйлера). Тогда на поверхности дороги появятся неровности (выпучивания), а в верхней их части — растягивающие напряжения и трещины (при достаточно больших значениях растягивающих напряжений).

Соответствующая задача рассмотрена в работе [14] на примере модели участка автомобильной дороги. С точки зрения механики модель представляет собой идеализированную двухслойную конструкцию, в которой верхний слой мёрзлого грунта опирается на основание, т. е. на грунт с неотрицательной температурой. Рассмотрен случай, когда температура верхнего слоя повышается от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к увеличению размеров данного слоя и появлению деформаций сжатия в горизонтальном направлении, вследствие чего возможны потеря устойчивости плоской формы равновесия слоя и его искривление. Для решения задачи в работе [14] предложено использовать аналогию рассматриваемой модели с известной по данным литературы механической системой «плёнка — подложка» под действием сжимающих напряжений [15], [16], [17]. Геометрические аспекты рассматриваемой задачи представлены на рисунке 4.

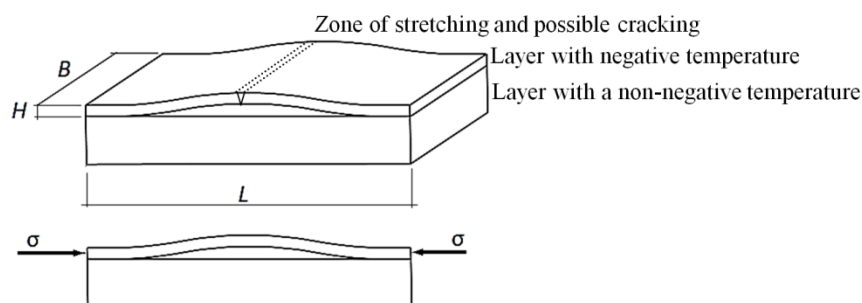


Рисунок 4. Фрагмент верхнего слоя под действием сжимающих напряжений

Figure 4. Fragment of the upper layer under the action of compressive stresses

Обозначим $\Delta t = t - t_0$ — изменение температуры верхнего слоя (в рассматриваемой задаче $\Delta t > 0$); k — коэффициент, имеющий размерность Н/м³ и характеризующий силу трения и адгезии, распределённую по площади контакта слоёв [18]; B , H и L — соответственно ширина, толщина и длина верхнего слоя сегмента (рисунок 4); α — коэффициент теплового расширения, его зависимость от температуры рассмотрена в работе [19]. В работе [20] показано, что изменение температуры и сжимающее напряжение связаны соотношением $\sigma_{max} = -k \alpha \Delta t L^2 / 8H$. С увеличением Δt напряжения возрастают и могут достигать критического значения σ_c , когда плоская форма равновесия становится неустойчивой; устойчивой становится искривлённая форма равновесия (рисунок 4). В этом случае, с учётом ограничений на прочность, правомерно прогнозировать появление трещин в верхнем слое грунтовой автомобильной дороги. Рассмотрим данный случай более подробно.

Известно, что разрушению твёрдомёрзлого грунта и появлению морозобойных трещин предшествует упругое состояние [13]. Поэтому достаточно корректным является использование формул теории упругости для определения указанного выше критического значения сжимающих напряжений σ_c . Предполагая, что нижележащий слой грунта с неотрицательной температурой достаточно податлив и не может накапливать упругую энергию, воспользуемся результатами работ [15, с. 25] и [16, с. 958], согласно которым критическое напряжение может быть определено по формуле $\sigma_c = -\pi^2 H^2 E / 3L^2$, где E — модуль упругости материала верхнего слоя (по правилу знаков сжимающее напряжение принято отрицательным). В данной формуле L интерпретируется как длина волны складки (рисунок 4). В цитируемых работах [15], [16] показано, что могут формироваться складки с любой длиной волны, превышающей критическое значение $L_c = \pi H (-E / 3\sigma)^{0.5}$. Увеличение амплитуды складок происходит с различной скоростью. На начальной стадии деформирования скорость роста амплитуды максимальна для складок с длиной волны $L_c = \pi H (-E / \sigma)^{0.5}$, при этом $\sigma_c = -\pi^2 H^2 E / 3L^2$ [15], [16].

Как отмечено выше, выпучивание сжатого слоя (рисунок 4) может приводить к появлению трещин и разрушению материала верхнего слоя дороги. Исходя из физического смысла задачи, можно утверждать, что расстояние между трещинами определяется величиной L_c . Найдём зависимость L_c от указанных выше характеристик верхнего слоя Δt , k , H , α и E . Искомую зависимость определим из условия $\sigma_c = \sigma_{max}$. Используя приведённые выше формулы, получим: $L_c = (8\pi^2 E H^3 / 3k \alpha \Delta t)^{0,25}$. Соответственно, на указанной выше начальной стадии деформирования верхнего слоя $L_c = (8\pi^2 E H^3 / k \alpha \Delta t)^{0,25}$ [21]. Следует заметить, что данная формула используется, если $\alpha > 0$; если $\alpha < 0$, то рассматриваемый слой растянут и выпучивание невозможно; если $\alpha \rightarrow 0$, то $L_c \rightarrow \infty$, что соответствует плоской поверхности.

Следует принимать во внимание, что в общем случае характеристики верхнего слоя k , H , α и E зависят от температуры, влажности и других факторов. Например, влияние температуры на значения коэффициента α для глинистого грунта показано на рисунке 5 [19]. Аналогичные зависимости характерны для других грунтов [19].

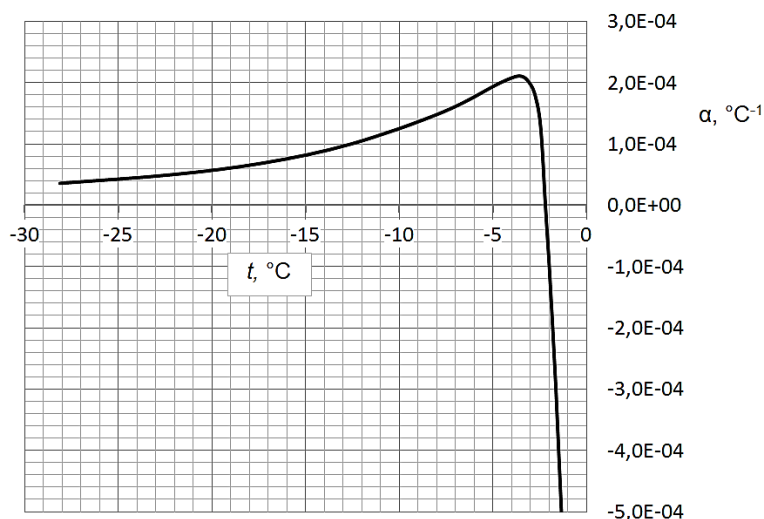


Рисунок 5. Зависимость коэффициента теплового расширения глинистого грунта от температуры [19]

Figure 5. Dependence of coefficient of thermal expansion of clay soil on temperature [19]

Для оценки прочности дорожного покрытия в межсезонный период важно обратить внимание на то обстоятельство, что в интервале температур от $-2,2$ °C до нуля коэффициент теплового расширения отрицателен (рисунок 5). Это означает, что повышение температуры от $-2,2$ °C до нуля будет вызывать уменьшение размеров сегмента верхнего слоя дороги. Тогда если данный сегмент представляет собой часть сплошного покрытия дороги, то уменьшению горизонтальных размеров сегмента будут сопротивляться соседние сегменты. Как следствие, в рассматриваемом сегменте появятся растягивающие силы. При

температурах в окрестности нуля (по Цельсию), как хорошо известно, прочность мёрзлых грунтов, а также льда и уплотнённого снега при растяжении незначительна, поэтому материал верхнего слоя дороги разрушится. Отсюда следует, что ограничивать движение по лесным дорогам следует, если температура равна -3°C и выше (точнее — $-2,2^{\circ}\text{C}$ и выше).

Другие физические и механические аспекты функционирования зимних лесных дорог рассмотрены в статье [22].

4. Обсуждение и заключение

Практика показала, что наиболее перспективным типом покрытия зимних лесных дорог является ледяное покрытие, обеспечивающее функционирование временной дороги в течение всего зимнего сезона. Однако в настоящее время даже ледяные покрытия дорог не в полной мере соответствуют современным условиям, что можно связать с истощением запасов древесины в зонах транспортной доступности. Для полного освоения указанных выше объёмов расчётной лесосеки необходимо максимально продлить срок действия зимних дорог. В данном случае ключевая роль принадлежит экономическим аспектам, поскольку существующих дорог круглогодичного действия недостаточно [1—9], а стоимость вывозки леса зимой существенно меньше, чем летом. Поэтому продление срока службы зимних дорог является актуальной задачей, что обосновано выше с использованием статистических данных (рисунки 1—3). При этом адекватность количественных оценок при анализе закономерностей изменения объёмов лесозаготовки подтверждена их согласованностью с известными по литературе результатами математического моделирования, в т. ч. с учётом изменений климата [3], [5], [7].

Представленный выше анализ показал, что комплексная проблема создания достаточно плотной сети лесных дорог остаётся актуальной и требует решения ряда задач, из которых к наиболее важным относятся задачи совершенствования технологических и технических решений, относящихся к заготовке и вывозке леса.

Определённый вклад в решение указанной комплексной проблемы может внести совершенствование технологии строительства лесных дорог с максимальным использованием местных материалов [4]. Наиболее сложной задачей является повышение надёжности функционирования лесных дорог в межсезонные периоды, прежде всего в весенний период (рисунки 1—3), когда имеет место наибольшее снижение объёмов лесозаготовок вследствие недостаточной несущей способности временных дорог.

Таким образом, внимание разработчиков должно быть сфокусировано на разрешении существующего противоречия: с одной стороны, необходимо увеличивать плотность лесных дорог круглогодичного действия и объёмы освоения расчётной лесосеки, с другой — необходимо эффективное использование существующих ресурсов, в т. ч. технически возможных и экономически целесообразных для использования при строительстве лесных дорог. Разрешение данного противоречия приводит к необходимости более детального исследования особенностей функционирования лесных дорог. Выше затронуты недостаточно

изученные в настоящее время вопросы анализа причин повреждений временных дорог при повышении отрицательной температуры в межсезонный период. В качестве заключения отметим следующее:

Предложена оценка критической длины волны при изгибе сжатого верхнего мёрзлого слоя дороги с повышением температуры в интервале отрицательных значений (рисунок 4).

Выполнен анализ некоторых причин разрушения верхнего слоя временной лесной дороги при повышении отрицательной температуры с учётом известных по литературе [19] изменений коэффициента теплового расширения в зависимости от температуры (рисунок 5). Обосновано, что ограничивать движение по лесным дорогам следует, если температура равна -3°C и выше.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности их использования при обосновании новых технических решений в дорожном строительстве [4], [23—25].

Перспективы исследования могут быть ориентированы на уточнение модуля упругости материала временных лесных дорог от температуры и влажности с учётом региональных почвенно-климатических условий.

Список литературы

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 20.09.2018 № 1989-р.
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. 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 : Изд-во ПетрГУ, 2014. — 92 с.
5. Прокопьев, Е. А. Последствия влияния глобального изменения климата на сезонную транспортную инфраструктуру в Республике Карелия: постановка проблемы / Е. А. Прокопьев, Н. А. Рослякова, П. А. Рязанцев // Эколого-экономические проблемы развития регионов и страны (устойчивое развитие, управление, природопользование) : материалы 14-й Международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики. — Петрозаводск, 2017. — С. 445—449.
6. Шегельман, И. Р. Оценка сезонности при подготовке лесозаготовительного производства / И. Р. Шегельман, В. М. Лукашевич // Фундаментальные исследования. — 2011. — № 12—3. — С. 599—603.
7. Мохирев, А. П. 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.

8. Сбор данных для моделирования влияния климата на экономику (на примере лесозаготовок в Республике Карелия) / Е. А. Прокопьев, Н. В. Крутских, П. А. Рязанцев, Н. А. Рослякова // ИнтерКарто / ИнтерГИС. — 2018. — Т. 24, № 1. — С. 273—284.
9. Шегельман, И. Р. Обоснование периода эксплуатации зимних лесовозных дорог / И. Р. Шегельман, Л. В. Щеголева, В. М. Лукашевич // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2007. — № 2. — С. 54—57.
10. Горбов, А. Ф. Строительство, содержание и эксплуатация зимних автомобильных лесовозных дорог в северо-западных районах страны: (Обзор) / А. Ф. Горбов, Э. Н. Савельев, Ю. Г. Яковенко. — Москва: ВНИПИЭИлеспром, 1976. — 44 с.
11. Кручинин, И. Н. Нормирование основных транспортно-эксплуатационных качеств зимних лесовозных автомобильных дорог / И. Н. Кручинин, О. Н. Бурмистрова // Лесотехнический журнал. — 2017. — Т. 7, № 4 (28). — С. 134—140.
12. Бурмистрова, О. Н. Механизм образования морозобойных трещин на автомобильных дорогах, эксплуатируемых в умеренно-континентальном климате / О. Н. Бурмистрова, А. М. Бургонутдинов, Ю. Н. Пильник // Лесотехнический журнал. — 2016. — Т. 6, № 4 (24). — С. 133—138.
13. Merzlyakov, V. P. Physical and mechanical conditions for primary frost crack formation / V. P. Merzlyakov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2016. — Vol. 53, № 4. — P. 221—225.
14. Гаврилов, Т. А. Деформации верхнего слоя зимней лесовозной дороги при изменении отрицательной температуры / Т. А. Гаврилов, К. В. Хорошилов, Г. Н. Колесников // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2018. — № 11. — С. 109—112.
15. Шугуров, А. Р. Механизмы периодической деформации системы «пленка — подложка» под действием сжимающих напряжений / А. Р. Шугуров, А. В. Панин // Физическая мезомеханика. — 2009. — Т. 12, № 3. — С. 23—32.
16. Im, S. H. Evolution of wrinkles in elastic-viscoelastic bilayer thin films / S. H. Im, R. Huang // Journal of applied mechanics. — 2005. — Vol. 72. — P. 955—961.
17. Huang, Q. A. An unconditionally energy stable scheme for simulating wrinkling phenomena of elastic thin films on a compliant substrate / Q. A. Huang, W. Jiang, J. Z. Yang // Journal of Computational Physics. — 2019. — Vol. 388. — P. 123—143.
18. 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, № 6. — P. 595—602.
19. Мерзляков, В. П. Коэффициент теплового расширения как характеристика мерзлых грунтов / В. П. Мерзляков // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. — 2012. — № 2. — С. 159—167.
20. Колесников, Г. Н. Моделирование условий появления низкотемпературных трещин в асфальтобетонном слое автомобильной дороги / Г. Н. Колесников, Т. А. Гаврилов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2018. — № 56. — С. 57—66.
21. Gavrilov, T. Cracks in upper road layer at negative temperature change: modelling and forecasting / T. Gavrilov, G. Kolesnikov // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 239. — 05013 (2018).
22. Гаврилов, Т. А. Сезонное промерзание лесовозной грунтовой дороги: моделирование условий появления поперечных трещин / Т. А. Гаврилов, К. В. Хорошилов, Г. Н. Колесников // Resources and Technology. — 2018. — Т. 15, № 3. — С. 29—42.

23. Соколов, А. П. Логистический подход к обоснованию технологий и параметров процессов комплексного освоения лесосырьевых баз / А. П. Соколов, В. С. Сюнёв // Системы. Методы. Технологии. — 2017. — № 3 (35). — С. 100—106.
24. Соколов, А. П. Оптимизационная модель синтеза транспортного плана перевозок древесины / А. П. Соколов, В. С. Сюнёв // Resources and Technology. — 2016. — Т. 13, № 1. — С. 1—22.
25. 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.

References

1. Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossijskoj Federacii do 2030 goda. Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 20.09.2018 № 1989-r.
2. Moxirev, A. P. Metodika vy'bora lesozagotovitel'ny'x mashin pod prirodno-klimaticheskie usloviya / A. P. Moxirev // Lesotexnicheskij zhurnal. — 2016. — Т. 6, № 4 (24). — С. 208—215.
3. Prokop`ev, E. A. Vliyanie klimata na ob`yomy` vy`vozki drevesiny` v Respublike Kareliya / E. A. Prokop`ev, N. A. Roslyakova, P. A. Ryazancev // Drukerovskij vestnik. — 2017. — № 5. — С. 173—185.
4. Proektirovanie, stroitel'stvo, sodержание i remont lesny'x dorog : uchebnoe posobie / V. K. Katarov, N. V. Kovalyova, A. N. Kochanov, V. I. Markov, A. N. Petrov, E. I. Rat`kova, D. V. Rozhin, A. V. Stepanov, A. P. Sokolov, V. S. Syunyov. — Petrozavodsk : Izd-vo PetrGU, 2014. — 92 s.
5. Prokop`ev, E. A. Posledstviya vliyaniya global'nogo izmeneniya klimata na sezonnyuyu transportnyuyu infrastrukturu v Respublike Kareliya: postanovka problemy` / E. A. Prokop`ev, N. A. Roslyakova, P. A. Ryazancev // E`kologo-e`konomicheskie problemy` razvitiya regionov i strany` (ustojchivoe razvitie, upravlenie, prirodnopol'zovanie) : materialy` 14-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Rossijskogo obshhestva e`kologicheskoy e`konomiki. — Petrozavodsk, 2017. — С. 445—449.
6. Shegel`man, I. R. Ocenka sezonnosti pri podgotovke lesozagotovitel'nogo proizvodstva / I. R. Shegel`man, V. M. Lukashevich // Fundamental'ny'e issledovaniya. — 2011. — № 12—3. — С. 599—603.
7. Moxirev, A. P. Planirovanie srokov e`kspluatscii zimnix lesovozny'x dorog na osnove analiza statistiki klimaticheskix dannyx / A. P. Moxirev, E. V. Goryaeva, M. P. Moxirev, A. V. Ivshina // Lesotexnicheskij zhurnal. — 2018. — № 2 — С. 176—185.
8. Sbor dannyx dlya modelirovaniya vliyaniya klimata na e`konomiku (na primere lesozagotovok v Respublike Kareliya) / E. A. Prokop`ev, N. V. Krutskix, P. A. Ryazancev, N. A. Roslyakova // InterKarto / InterGIS. — 2018. — Т. 24, № 1. — С. 273—284.
9. Shegel`man, I. R. Obosnovanie perioda e`kspluatscii zimnix lesovozny'x dorog / I. R. Shegel`man, L. V. Shhegoleva, V. M. Lukashevich // Izvestiya vy`sshix uchebny'x zavedenij. Lesnoj zhurnal. — 2007. — № 2. — С. 54—57.
10. Gorbov, A. F. Stroitel'stvo, sodержание i e`kspluatsciya zimnix avtomobil'ny'x lesovozny'x dorog v severo-zapadny'x rajonax strany` : (Obzor) / A. F. Gorbov, E. N. Savel`ev, Yu. G. Yakovenko. — Moskva : VNIPIE`Ilesprom, 1976. — 44 s.
11. Kruchinin, I. N. Normirovanie osnovny'x transportno-e`kspluatscionny'x kachestv zimnix lesovozny'x avtomobil'ny'x dorog / I. N. Kruchinin, O. N. Burmistrova // Lesotexnicheskij zhurnal. — 2017. — Т. 7, № 4 (28). — С. 134—140.

12. *Burmistrova, O. N.* Mexanizm obrazovaniya morozobojny`x treshhin na avtomobil`ny`x dorogax, e`kspluatiruemy`x v umerenno-kontinental`nom climate / O. N. Burmistrova, A. M. Burgonutdinov, Yu. N. Pil`nik // Lesotexnicheskij zhurnal. — 2016. — T. 6, № 4 (24). — S. 133—138.
13. *Merzlyakov, V. P.* Physical and mechanical conditions for primary frost crack formation / V. P. Merzlyakov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2016. — Vol. 53, № 4. — P. 221—225.
14. *Gavrilov, T. A.* Deformacii verxnego sloya zimnej lesovoznoj dorogi pri izmenenii otriczatel`noj temperatury` / T. A. Gavrilov, K. V. Xoroshilov, G. N. Kolesnikov // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2018. — № 11. — S. 109—112.
15. *Shugurov, A. R.* Mexanizmy` periodicheskoj deformacii sistemy` «plenka — podlozhka» pod dejstviem szhimayushhix napryazhenij / A. R. Shugurov, A. V. Panin // Fizicheskaya mezomexanika. — 2009. — T. 12, № 3. — S. 23—32.
16. *Im, S. H.* Evolution of wrinkles in elastic-viscoelastic bilayer thin films / S. H. Im, R. Huang // Journal of applied mechanics. — 2005. — Vol. 72. — P. 955—961.
17. *Huang, Q. A.* An unconditionally energy stable scheme for simulating wrinkling phenomena of elastic thin films on a compliant substrate / Q. A. Huang, W. Jiang, J. Z. Yang // Journal of Computational Physics. — 2019. — Vol. 388. — P. 123—143.
18. *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, № 6. — P. 595—602.
19. *Merzlyakov, V. P.* Koe`fficient teplovogo rasshireniya kak xarakteristika merzly`x gruntov / V. P. Merzlyakov // Geo`kologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. — 2012. — № 2. — S. 159—167.
20. *Kolesnikov, G. N.* Modelirovanie uslovij poyavleniya nizkotemperaturny`x treshhin v asfal`tobetonnom sloe avtomobil`noj dorogi / G. N. Kolesnikov, T. A. Gavrilov // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mexanika. — 2018. — № 56. — S. 57—66.
21. *Gavrilov, T.* Cracks in upper road layer at negative temperature change: modelling and forecasting / T. Gavrilov, G. Kolesnikov // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 239. — 05013 (2018).
22. *Gavrilov, T. A.* Sezonnoe promerzanie lesovoznoj gruntovoj dorogi: modelirovanie uslovij poyavleniya poperechny`x treshhin / T. A. Gavrilov, K. V. Xoroshilov, G. N. Kolesnikov // Resources and Technology. — 2018. — T. 15, № 3. — S. 29—42.
23. *Sokolov, A. P.* Logisticheskij podxod k obosnovaniyu texnologij i parametrov processov kompleksnogo osvoeniya lesosy`r`evy`x baz / A. P. Sokolov, V. S. Syunyov // Sistemy`. Metody`. Texnologii. — 2017. — № 3 (35). — S. 100—106.
24. *Sokolov, A. P.* Optimizacionnaya model` sinteza transportnogo plana perevozok drevesiny` / A. P. Sokolov, V. S. Syunyov // Resources and Technology. — 2016. — T. 13, № 1. — S. 1—22.
25. *Rat`kova, E. I.* Vozdejstvie ciklov «zamorazhivanie — ottaivanie» na deformacionny`e svojstva lesny`x pochvo-gruntov Karelii / E. I. Rat`kova, V. S. Syunyov, V. K. Katarov // Resources and Technology. — 2013. — T. 10, № 1. — S. 73—89.