

Научная статья

УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-120-132

Работоспособность трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на многолетней мерзлоте

В.Я. Шапиро¹, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-9658-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

О.А. Куницкая², *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-9568-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

В.А. Каляшов³, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: ABA-9692-2021*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

И.С. Должиков^{3✉}, *канд. техн. наук*; *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>*

В.П. Друзьянова⁴, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAG-2463-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

Е.А. Тихонов⁵, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: E-9342-2014*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; shapiro54vlad@mail.ru

²Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; ola.ola07@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; vit832@yandex.ru, idolzhikov222@mail.ru✉

⁴Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, г. Якутск, Россия, 677000; druzvar@mail.ru

⁵Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; tihonov@petsu.ru

Поступила в редакцию 17.11.24 / Одобрена после рецензирования 03.02.25 / Принята к печати 06.02.25

Аннотация. Площадь, занимаемая многолетней мерзлотой в Российской Федерации, составляет более 10 млн км², или свыше 60 % всей территории страны. Многолетняя мерзлота в Сибири и на Дальнем Востоке заходит далеко на юг и распространяется более чем на 30 % лесопокрытых земель страны. Произрастающие здесь лесные насаждения относятся к хвойным бореальным, в которых сосредоточены большие запасы ценных спелых и перестойных лесов. Их значительная часть располагается на сильно пересеченной местности, относимой к крутым и очень крутым склонам. В качестве примера можно привести южную Якутию, характеризующуюся большими запасами спелых и перестойных насаждений, при этом находящихся на склонах Верхоянского хребта, Алданского нагорья и т. д. Нормативная документация в области лесопользования запрещает разработку лесосек на многолетней мерзлоте в теплый период года. Но помимо основных лесосечных работ в лесных насаждениях необходимо выполнять различные лесохозяйственные мероприятия (уходы, санитарные, противопожарные), а также очистку лесосек и т. д., которые проводятся только в бесснежный период с использованием лесных машин. В этой связи возникает потребность в поиске модели поддержки принятия организационно-технологических решений по размещению

и эксплуатации первичных транспортных путей в таких природно-производственных условиях с целью минимизации негативного воздействия движителей лесных машин на почвогрунты. При этом следует учитывать, что, несмотря на общие условия многолетней мерзлоты, геотехнические факторы склонов могут достаточно существенно различаться. Прежде всего это связано с наклоном плоскости склона к линии горизонта, влажностью почвогрунта, наклоном плоскости анизотропии и дилатансии почвогрунта к плоскости склона. Представлены результаты теоретического анализа влияния геотехнических факторов и параметров лесной машины на степень воздействия ее движителя на почвогрунты лесосек на склонах.

Ключевые слова: леса на склонах, леса на многолетней мерзлоте, колееобразование, трелевка, разработка горных лесосек, работоспособность трелевочных волоков

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства», за счет гранта РНФ № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Для цитирования: Шапиро В.Я., Куницкая О.А., Каляшов В.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П., Тихонов Е.А. Работоспособность трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на многолетней мерзлоте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 120–132. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-120-132>

Original article

Operability of Skidding Trails and Technological Corridors on Permafrost

*Vladimir Ya. Shapiro*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

*Olga A. Kunitskaya*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

*Vitalii A. Kalyashov*³, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

*Ilya S. Dolzhikov*³✉, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

*Varvara P. Druzyanova*⁴, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

*Evgeny A. Tikhonov*⁵, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-9342-2014](https://orcid.org/0000-0003-2136-3268),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, per. Institutsky, 5, Saint Petersburg, 191014, Russian Federation; shapiro54vlad@mail.ru

²Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; ola.ola07@mail.ru

³Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; vit832@yandex.ru, idolzhikov222@mail.ru ✉

⁴North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russian Federation; druzvar@mail.ru

⁵Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; tikhonov@petsu.ru

Received on November 17, 2024 / Approved after reviewing on February 3, 2025 / Accepted on February 6, 2025

Abstract. The area occupied by permafrost in the Russian Federation is more than 10 million km², or over 60 % of the entire territory of the country. Permafrost in Siberia and the Far East extends far to the south, and spreads over more than 30 % of the forested lands of our country. The forest plantations growing here belong to the boreal coniferous forests, which contain large reserves of valuable mature and overmature forests. A significant portion of them is located on highly rugged terrain, classified as steep and very steep slopes. As an example, southern Yakutia is characterized by large reserves of mature and overmature plantations, while located on the slopes of the Verkhoyansk Ridge, the Aldan Highlands, etc. The regulatory documentation in the field of forest management prohibits the development of cutting areas on permafrost during the warm season. But in addition to the basic logging operations in forest plantations, it is necessary to carry out various forestry activities (maintenance, sanitary, fire-preventive), as well as clearing of cutting areas, etc., which are performed only during the snow-free period using forestry machinery. In this regard, there is a need to find a model to support the adoption of organizational and technological decisions on the placement and operation of primary transport routes in such natural and industrial conditions in order to minimize the negative impact of forestry machinery propellers on soils. It should be taken into account that, despite the general conditions of permafrost, the geotechnical factors of the slopes can vary quite significantly. First of all, this is associated with the inclination of the slope plane to the horizon line, the moisture content of the soil, the inclination of the anisotropy plane and the dilatancy of the soil to the slope plane. The results of theoretical analysis of the influence of geotechnical factors and parameters of a forestry machine on the degree of impact of its propeller on the soils of cutting areas on the slopes are presented.

Keywords: forests on the slopes, forests on permafrost, rutting, skidding, development of mountain cutting areas, efficiency of skidding trails

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative Developments in the Field of Logging Industry and Forestry” at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Shapiro V.Ya., Kunitskaya O.A., Kalyashov V.A., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P., Tikhonov E.A. Operability of Skidding Trails and Technological Corridors on Permafrost. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 120–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-120-132>

Введение

Некоторые лесосечные работы и большинство лесохозяйственных работ, выполняемые при помощи различных машинно-тракторных агрегатов приходится осуществлять только в бесснежный период года [17, 18]. При проведении работ в теплый период года движители лесных машин могут наносить существенный вред, переуплотнения почвогрунты и образовывая глубокие колеи [8]. Воздействие движителей лесных машин на почвогрунты лесосек ухудшает лесорастительные свойства освоенных участков лесного фонда, темпы лесовозобновления и таксационные характеристики последующих генераций леса [5, 19].

При проведении таких работ на склонах в лесах на многолетней мерзлоте в теплый период года природно-производственные условия осложняются не только экологическими и техническими ограничениями по использованию тяжелой техники в горных лесах, но и особенностями строения и физико-механических свойств мерзлотных почвогрунтов [4, 5, 7, 9, 10].

Теоретическим и экспериментальным исследованиям взаимодействия движителей лесных машин и трелевочных систем на их базе посвящено зна-

чительное количество трудов отечественных и зарубежных ученых, при этом использованы различные методы научного проникновения – теоретические, эмпирические и полуэмпирические [2, 11, 12, 16, 20]. Однако взаимодействие движителей лесных машин с мерзлотными почвогрунтами на склонах изучено недостаточно, поскольку представляет собой чрезвычайно сложный процесс, особенности которого обусловлены состоянием краевой части массива почвогрунта, подверженного чередующимся промерзаниям и оттаиваниям.

Кроме этого, наличие мерзлого скользящего подстилающего водонепроницаемого слоя многолетней мерзлоты способствует концентрации влаги, особенно в зоне подошвы склона, что приводит к росту влажности (W , %) почвогрунта до уровней, достигающих предела его текучести (W_p , %), а в ряде случаев превосходящих это значение.

Отмеченные факторы являются причиной существенного снижения прочности почвогрунта – величины сцепления C и угла внутреннего трения φ , что приводит к уменьшению работоспособности трасс трелевочных волоков и технологических коридоров как при однократном, так и при циклическом статическом и динамическом воздействиях движителей на почвогрунты [13, 14].

Наиболее сложные условия перемещения лесных машин по склонам в лесах на многолетней мерзлоте формируются при проявлении эффекта солифлюкции почвогрунта – медленного вязкопластического течения, которое начинается даже при небольших уклонах поверхности склона, с $2\text{--}3^\circ$. Наиболее активный эффект солифлюкции наблюдается с $8\text{--}10^\circ$.

Этот эффект сопровождается попеременным промерзанием переувлажненного почвогрунта и, как следствие, резким снижением сцепления частиц почвогрунта вдоль оттаявшего слоя при контакте с промерзшим. Это приводит к потере устойчивости краевой части массива и оползневым процессам.

Особенности образования колеи в данных условиях рассмотрены в работе [9], в которой предложена математическая модель равновесного состояния краевой части массива почвогрунта при эксплуатации лесных машин (тракторов), использующих лебедки – как отдельные агрегаты и как интегрированные в трансмиссию машин.

Целью исследования является теоретический анализ влияния геотехнических факторов сложения почвогрунтов склонов на многолетней мерзлоте на работоспособность трасс для лесных машин с установлением значимости этих факторов для показателей рассматриваемого процесса.

Объектом исследования являются геотехнические факторы взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесов криолитозоны на склонах. Применялись численные методы решения уравнений и аппроксимации данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Итогом моделирования [9] стало установление предельного соотношения на ограничение мощности (N) силы тяги трактора при движении к вершине склона с необходимым использованием силы тяги лебедки:

$$N \leq Sv \left[p_s \sqrt{\frac{h_k}{r_k}} + C + q \operatorname{tg} \varphi - \frac{Q}{S} (\sin \alpha + \chi \cos \alpha) \right], \quad (1)$$

где S, r_k – площадь и радиус пятна контакта движителя с участком поверхности склона соответственно; v – скорость движения трактора; p_s – несущая способность почвогрунта; h_k – глубина образованной колеи; q – давление движителя трактора на почвогрунт в направлении, перпендикулярном поверхности склона; Q – вес лесной машины или трелевочной системы на ее базе; α – угол наклона склона к линии горизонта; χ – коэффициент трения движителя о влажный почвогрунт.

Из соотношения (1) выразим явно h_k через другие параметры:

$$h_k \geq \sqrt{\frac{S}{\pi}} \left\{ \frac{1}{p_s} \left[\frac{N}{vS} + q(\sin\alpha + \chi\cos\alpha - \operatorname{tg}\varphi) - C \right] \right\}^2. \quad (2)$$

Под работоспособностью трассы трелевочного волокна или технологического коридора будем понимать такое его физическое состояние, когда h_k не превосходит нормативное значение $h_n = 0,1$ м.

Для оценок введем коэффициент $K_h = \frac{h_k}{h_n}$, который характеризует меру превышения глубины колеи нормативного уровня.

Как следует из анализа соотношений (1) и (2), в них присутствуют параметры прочности почвогрунта C , φ и p_s , зависящие от его влажности [1, 3, 15].

В работе [1] для 3 видов связных грунтов: легкого суглинка, суглинка и глины – предложено выделять 5 состояний (категорий) по влажности: I – $W < W_n \approx 45\text{--}50\ \% W_t$; II – $W \approx W_n$; III – $W = 55\text{--}75\ \% W_t$; IV – $W \approx W_t$; V – $W > W_t$, где W_n – предельная влажность.

Для всех 5 категорий грунтов в [1] представлены диапазоны изменений абсолютных значения p_s , C и φ .

Введем коэффициент влажности $K_W = \frac{W}{W_t}$. В соответствии с предложенной классификацией состояние, в частности, сухого суглинка (I категория) характеризуется коэффициентом $K_W = 0,30\text{--}0,35$, а диапазон $K_W = 1,15\text{--}1,25$ соответствует сверхвлажному состоянию грунта V категории.

Примем показатели p_{sc} , C_c и φ_c сухого суглинка за масштабную единицу.

На рис. 1 медианные абсолютные величины p_s , C и φ представлены в безразмерном виде и отложены по оси ординат, коэффициент K_W – на оси абсцисс.

Как следует из анализа линий на рис. 1, относительные зависимости несущей способности грунта p_s и его сцепления C от коэффициента влажности K_W практически совпадают, несмотря на то, что их абсолютные значения существенно отличаются – кратно, в т. ч. и на порядок.

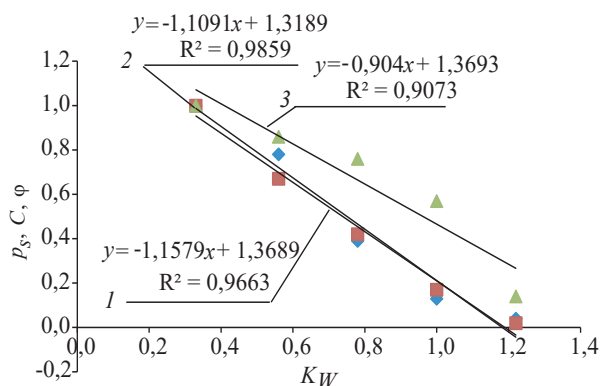
Этот результат носит принципиальный характер в контексте рассмотрения влияния эффекта солифлюкции на работоспособность трасс трелевочных волоков и технологических коридоров в лесах на склонах на многолетней мерзлоте.

При проявлении эффекта солифлюкции абсолютная величина сцепления C стремится к 0 вдоль контакта оттаявшего почвогрунта с мерзлым подстилающим слоем. Идентичность линий 1 и 2 на рис. 1 свидетельствует о единой природе влияния влажности почвогрунта на его сцепление и несущую способность, т. е. предельное состояние $C \rightarrow 0$ будет обуславливать и состояние

$p_s \rightarrow 0$, что отразится на работоспособности трассы трелевочного волока или технологического коридора.

Рис. 1. Зависимость прочности грунта от коэффициента влажности K_W : 1 – p_s ; 2 – C ; 3 – φ

Fig. 1. The dependence of soil strength on the moisture coefficient K_W : 1 – p_s ; 2 – C ; 3 – φ



В итоге получены корреляционные соотношения с высокими коэффициентами детерминации:

$$p_s = p_{sc} (-1,1579 K_W + 1,3689);$$

$$C = C_c (-1,1091 K_W + 1,3189);$$

$$\varphi = \varphi_c (-0,904 K_W + 1,3693).$$

Рассмотрим влияние следующих факторов на процесс образования колеи при перемещении лесной машины на склоне на многолетней мерзлоте с применением сил тяги трактора и лебедки: углового параметра α наклона плоскости склона к линии горизонта; влажности W почвогрунта; мощности N силы тяги трактора; углового параметра β наклона плоскости анизотропии к плоскости склона, когда показатели почвогрунта, в первую очередь прочность, отличаются в различных направлениях; углового параметра ψ наклона плоскости дилатансии почвогрунта к плоскости склона, которая при внешних нагрузках вызывает в краевой части массива рост средних напряжений, что обуславливает увеличение сопротивления сдвигу и повышение несущей способности почвогрунта; веса Q лесной машины или трелевочной системы на ее базе и давления q движителя на почвогрунт.

Остановимся подробнее на учете влияния отмеченных факторов на формирование глубины колеи и работоспособности трелевочного волока или технологического коридора.

Фактор угла наклона поверхности склона. На рис. 2 показано влияние угла $\alpha, \dots^\circ$ на коэффициент K_h . Расчеты произведены для суглинка с характеристиками прочности в сухом состоянии: $p_{sc} = 96$ кПа, $C_c = 20$ кПа и $\varphi_c = 24^\circ$. Предел текучести $W_t = 45\%$, $K_W = 0,78$ ($W = 35\%$), нормативная глубина колеи $h_n = 0,1$ м. В расчетах используется трактор с номинальной мощностью $N_t = 419$ кВт, весом 5,8 т и максимальной нагрузкой до 9,072 т, т. е. суммарный вес лесной машины и трелевочной системы на ее базе (Q) изменялся в расчетах от 5,8 до 14,872 т, давление движителя на грунт q – от 10,76 до 27,6 кПа. В данном примере расчета для рис. 2 приняты $Q = 10$ т и $q = 18,56$ кПа.

Скорость движения трактора $v = 1$ м/с, площадь пятна контакта движителя с почвогрунтом $S = 5,3884$ м², коэффициент трения $\chi = 0,05$. Для оценки относительной величины допустимой, обеспечивающей равновесное состояние

краевой части массива почвогрунта, мощности силы тяги трактора введен коэффициент $K_N = \frac{N}{N_T}$. Абсолютное значение допустимой мощности силы тяги трактора принято в данном примере $N = 83,85$ кВт ($K_N = 0,2$).

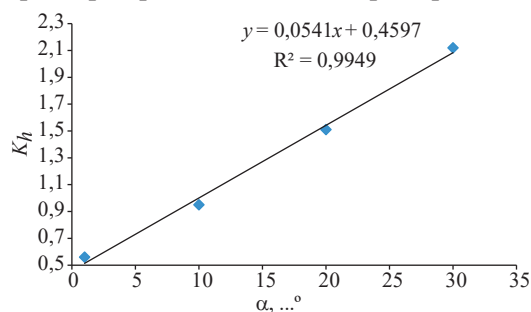


Рис. 2. Влияние угла наклона склона на глубину колеи

Fig. 2. The influence of slope angle on the track depth

Как следует из анализа полученной линейной зависимости на рис. 2 для таких условий движения лесной машины при пологих склонах (α не более 10°) глубина колеи не превышает нормативного значения ($K_h \leq 1$). На более крутых склонах установленная глубина колеи больше 0,1 м ($K_h > 1$).

Фактор влажности грунта. Зафиксируем угловой параметр $\alpha = 10^\circ$ и исследуем влияние коэффициента влажности K_w на коэффициент $K_h = \frac{h_k}{h_n}$. Результаты расчетов представлены на рис. 3, где по оси абсцисс отложены значения K_w , по оси ординат – K_h .

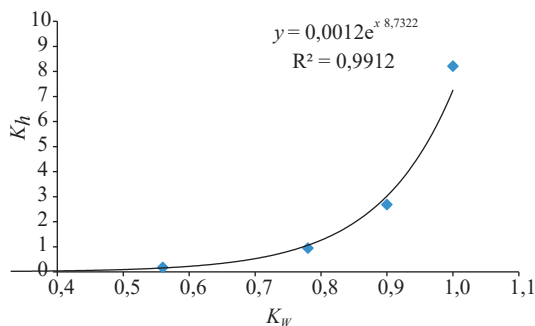


Рис. 3. Влияние влажности почвогрунта на глубину колеи

Fig. 3. The influence of soil moisture on the track depth

Как видим, наблюдается сильное экспоненциальное влияние влажности на глубину колеи и при таком уровне использования мощности силы тяги трактора ($K_N = 20\% N_T$) достичь нормативного значения $K_h = 1$ возможно только для почвогрунтов I–III категорий влажности.

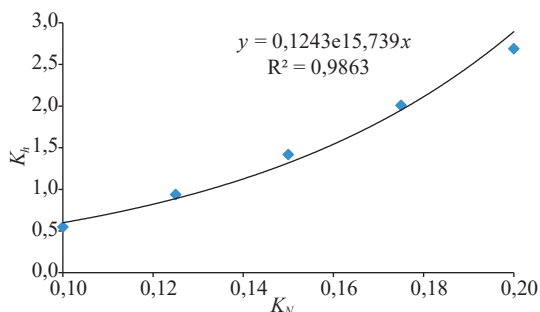
На графике полученной зависимости можно выделить 2 участка экспоненциальной кривой: асимптотический при $K_w \leq 0,8$ и круто восходящий вверх при превышении данного показателя.

Если $K_w \rightarrow 1$ и возможно проявление эффекта солифлюкции, глубина колеи более 0,5 м и работоспособность трассы трелевочного волока или технологического коридора резко снижается.

Можно сделать вывод о том, что для переувлажненных почвогрунтов IV и V категорий влажности одним из факторов повышения работоспособности трассы трелевочного волока или технологического коридора будет являться снижение реализуемой двигателем мощности силы тяги трактора.

Фактор мощности силы тяги трактора. Зафиксируем $K_W = 0,9$ ($W = 35\%$) и оценим (рис. 4) влияние коэффициента K_N (ось абсцисс) на показатель K_h (ось ординат).

Рис. 4. Влияние мощности силы тяги трактора на глубину образуемой колеи
Fig. 4. The influence of tractor traction power on the depth of the formed track



Как видим, если параметр K_N не превосходит 12–14 % (N не более 50–60 кВт), то возможно достижение глубины колеи, близкой к нормативному значению при обеспечении дополнительно необходимой силы тяги лебедки для перемещения лесной машины или трелевочной системы на ее базе вверх по склону.

Работа трактора с показателем $K_N > 18–20\%$ приводит к тому, что глубина колеи h превышает 0,20–0,25 м, что можно считать неудовлетворительным результатом в контексте оценки работоспособности трассы трелевочного волокна или технологического коридора.

Результаты данного этапа исследования при весе лесной машины или трелевочной системы на ее базе $Q = 10$ т позволяют заключить, что при работе на крутых склонах ($\alpha = 25–30^\circ$) с влажностью почвогрунта близкой к пределу текучести необходимо отказаться от использования мощности силы тяги от двигателя трактора в пользу силы тяги лебедки. В этом случае теоретически возможно достижение глубины колеи в диапазоне 0,085–0,130 м при математическом ожидании h вблизи нормативного уровня в 0,1 м.

Факторы анизотропии и дилатансии. Рассмотрим при постоянном параметре $N = 83,85$ кВт ($K_N = 0,2$) и давлении двигателя на почвогрунт $q = 18,56$ кПа ($Q = 10$ т) влияние анизотропии и дилатансии на распределение сил тяги трактора и лебедки для благоприятных условий перемещения лесной машины: пологого склона ($\alpha = 5^\circ$) и умеренной влажности почвогрунта ($K_W = 0,73$, $W = 33\%$).

Оценка основана на методических положениях [6, 7, 10] о влиянии анизотропии свойств и дилатансии грунта на его прочность. Эти положения могут быть использованы при оценке устойчивости краевой части массива оттаивающего почвогрунта на склонах лесов на многолетней мерзлоте.

На рис. 5 представлены результаты расчетов, где по оси абсцисс – угловые параметры $\beta(\psi)$, ...° и по оси ординат – коэффициент K_h . При оценке влияния одного углового параметра другой параметр принимался равным 0, т. е. оценка производилась последовательно.

Анализ полученных результатов и графических линейных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что оба фактора с ростом их угловых параметров способствуют снижению глубины колеи, при этом, судя по значениям угловых коэффициентов, данное влияние существенно (более чем 2,5 раза) от-

личается в пользу анизотропии. При заданной мощности силы тяги трактора $N = 83,85$ кВт коэффициент K_h значительно ниже 1.

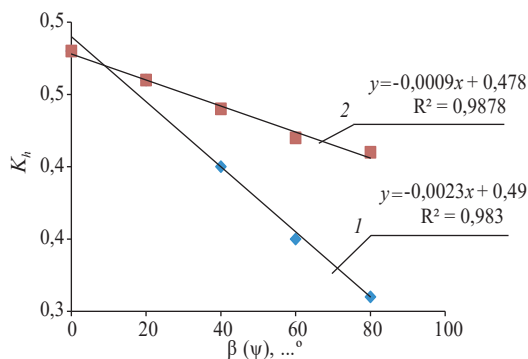


Рис. 5. Влияние анизотропии и дилатансии на глубину образуемой лесной машиной колеи:

1 – анизотропия; 2 – дилатансия

Fig. 5. The influence of anisotropy and dilatancy on the depth of the track formed by a forestry machine:

1 – anisotropy; 2 – dilatancy

Такая тенденция имеет место и при увеличении уровня мощности силы тяги трактора в 1,5 раза (до 125 кВт), однако достичь нормативной глубины колеи в этом случае не представляется возможным даже при плоскостях анизотропии и дилатансии, ориентированных перпендикулярно к поверхности склона. В частности, при росте углов β и ψ от 0 до 80° коэффициент K_h снижается почти на 40 % – с 1,57 до 1,13, но, тем не менее, превосходит нормативный уровень.

При повышении влажности W до 35 % и более учет факторов анизотропии и дилатансии практического значения не имеет, поскольку глубина колеи превосходит нормативный уровень. При таких условиях, как отмечено выше, необходимо существенно снижать мощности силы трактора в соответствии с данными рис. 4 или вес лесной машины (трелевочной системы на ее базе) Q и, как следствие, давление движителя на почвогрунт q .

Фактор веса лесной машины или трелевочной системы на ее базе и давления движителя на почвогрунт. Исследуем возможность достижения нормативной глубины колеи при наиболее типовых условиях движения лесной машины: $\alpha = 15^\circ$, $K_w = 0,78$ ($W = 35\%$), $K_N = 0,2$ при изменении веса Q от 5,8 до 12 т и давления движителя q – от 10,76 до 22,27 кПа.

На рис. 6 представлены результаты расчетов влияния q на K_h .

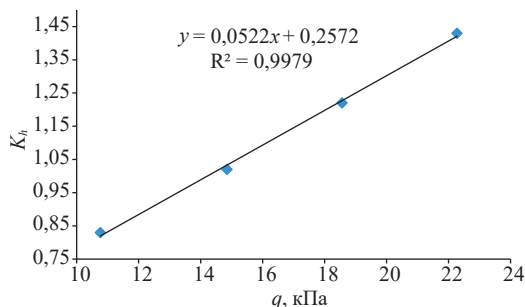


Рис. 6. Зависимость глубины образуемой лесной машиной колеи от давления движителя

Fig. 6. The dependence of the depth of the track formed by a forestry machine on the pressure of the propeller

При весе лесной машины (трелевочной системы на ее базе) до 8 т и давлении движителя не более 14 кПа возможно обеспечение нормативных значений глубины колеи при данном уровне мощности силы тяги трактора. Любые другие изменения в сторону роста указанных параметров влекут за собой повышение глубины колеи по линейному закону.

Таким образом, к сложным условиям перемещения лесных машин на склонах лесов на многолетней мерзлоте следует отнести крутизну склона и влажность краевой части массива почвогрунта, близкую к пределу текучести. В этих условиях достижение нормативной глубины колеи возможно за счет как снижения мощности силы тяги трактора, так и веса лесной машины или трелевочной системы на ее базе, приводящего к уменьшению давления движителя на почвогрунт.

Изучим (рис. 7) совместное влияние абсолютных значений параметров q , кПа, и N , кВт, на глубину образуемой лесной машиной колеи h , м. Расчеты произведены при $\alpha = 15^\circ$ и $K_w = 0,78$ ($W = 35\%$). Анализ результатов расчетов показывает, что в 68 % от общего объема области определения аргументов (параметров) q и N глубина образуемой движителем лесной машиной колеи h укладывается в нормативный уровень 0,1 м. Еще 12 % совокупного объема аргументов обеспечивает достижение двукратного норматива глубины в 0,2 м, что можно считать предельным (оценкой сверху) результатом для указанных условий перемещения лесной машины по склону. При этом мощность силы тяги трактора не должна превышать 15 % номинальной величины, а вес лесной машины или трелевочной системы на ее базе – 15 т при давлении движителя на почвогрунт не более 28 кПа.

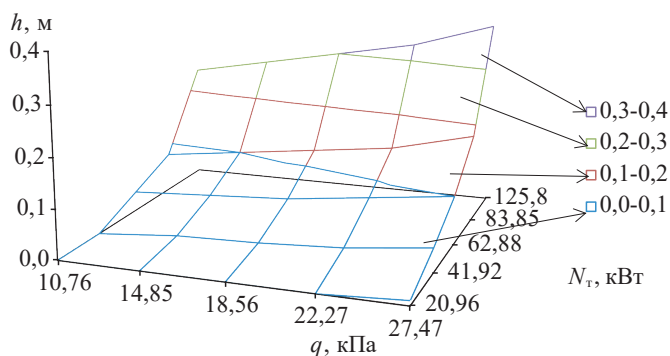


Рис. 7. Совместное влияние давления движителя на почвогрунт и мощности силы тяги трактора на глубину образуемой колеи

Fig. 7. The combined effect of the propeller pressure on the soil and the tractor traction power on the depth of the formed track

Заключение

Выполненные исследования позволили при реализации лесосечных и лесохозяйственных работ на склонах лесов на многолетней мерзлоте оценить влияние на процесс образования колеи и работоспособность трассы трелевочного волока или технологического коридора ряда геотехнических, технических и геомеханических факторов.

К этим факторам (по мере снижения значимости) отнесены:

- влажность почвогрунта;
- мощность силы тяги движителя трактора;
- вес лесной машины или трелевочной системы на ее базе и давление движителя на краевую часть массива почвогрунта;
- ориентация поверхности склона к линии горизонта;

- ориентация плоскости анизотропии свойств массива в направлениях параллельном и перпендикулярном поверхности склона;
- ориентация плоскости дилатансии почвогрунта.

Установлены функциональные и корреляционные соотношения, количественно позволяющие произвести расчет глубины образующейся под воздействием движителя лесной машины колеи с учетом всех выявленных факторов.

Определение таких параметров, как мощность силы тяги движителя трактора, вес лесной машины или трелевочной системы и ориентация поверхности склона к линии горизонта, не вызывает затруднений: они либо заданы, либо легко корректируются в процессе выполнения работ.

Наиболее трудоемкой операцией является мониторинг влажности почвогрунтов, слагающих массив склона вдоль трассы движения, с учетом расположения машины относительно основания склона, длины трассы, сезонно-климатических особенностей, показателей гидрогеологии – мощности слоя оттаивающего почвогрунта (сезонной мерзлоты) и удаленности волока от границы вечной мерзлоты и др.

Учет анизотропии свойств и дилатансии почвогрунта способствует повышению качества прогноза работоспособности трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на 5–10 %, однако практическая реализация этого учета пока является сложной. Вместе с тем принятие во внимание этих факторов повышает адекватность прогноза устойчивости краевой части массива грунта на 20–30 %, что следует признать значимым результатом при комплексной оценке его геомеханического состояния.

Результаты исследования выдвигают в разряд наиболее актуальных проблем определение работоспособности трасс трелевочных волоков и технологических коридоров при проведении лесосечных и лесохозяйственных работ на крутых склонах оттаивающих почвогрунтов криолитозоны с использованием лесных машин, оснащенных лебедками. Прогнозирование работоспособности трасс трелевочных волоков и технологических коридоров будет служить качественной поддержкой принятия организационно-технологических решений по их оптимальному размещению на лесосеке (вырубке).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агеев Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
Ageev Ya.S. *All-Terrain Wheeled and Combined Propellers*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1972. 184 p. (In Russ.).
2. Божбов В.Е., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Тетеревлева Е.В., Чемишкова Ю.М. Анализ подходов к описанию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек // *Resources and Technology*. 2019. Т. 16, № 2. С. 13–35.
Bozhbov V.E., Grigorev I.V., Rudov S.E., Teterevleva E.V., Chemshikova Yu.M. Analysis of Approaches to the Description of Processes of Interaction of the Propulsion of Forest Machines with the Soil of the Cutting Area. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 13–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4482>
3. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М.: Недра, 1980. 270 с.
Bulychev N.S. *Mechanics of Underground Structures in Examples and Problems*. Moscow, Nedra Publ., 1980. 270 p. (In Russ.).

4. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. школа, 1979. 447 с.
Vyalov S.S. *Rheological Principles of Soil Mechanics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 447 p. (In Russ.).

5. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4(40). С. 25–29.

Grigoreva O.I. Features of Natural Reforestation in the Conditions of the Cryolithozone. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2018, vol. 6, no. 4(40), pp. 25–29. (In Russ.).

6. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженер. изыскания. 2013. № 9. С. 44–50.

Zerkal O.V., Fomenko I.K. Assessment of Anisotropy Effect of Rock Properties on Slope Stability. *Inzhenernye izyskaniya*, 2013, no. 9, pp. 44–50. (In Russ.).

7. Калабина М.В., Царапов М.Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: материалы Всерос. конф. с междунар. участием. 2017. С. 542–546.

Kalabina M.V., Tsarapov M.N. Strength Properties of Thawing Soils. *Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otraslevoj nauki*: Materials of the All-Russian Conference with International Participation, 2017, pp. 542–546. (In Russ.).

8. Калистратов А.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. О важности исследований экологической эффективности процесса трелевки // Наука, образование, инновации в приграничном регионе: материалы республиканск. науч.-практ. конф. Петрозаводск: Петрозаводск. гос. ун-т, 2015. С. 7–9.

Kalistratov A.V., Grigoreva O.I., Grigorev G.V., Dmitrieva I.N. On the Importance of Research into the Environmental Efficiency of the Skidding Process. *Science, Education, Innovations in the Border Region*: Materials of the Republican Scientific and Practical Conference. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2015, pp. 7–9. (In Russ.).

9. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 140–152.

Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Druz'yanova V.P. The Formation of a Track by the Propulsion of a Forestry Machine on the Slope of the Thawing Soil in the Permafrost Zone, Taking into Account the Effect of Solifluction. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 140–152. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-140-152>

10. Мирный А.Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы ее количественной оценки // Инженер. геология. 2019. Т. XIV, № 2. С. 34–43.

Mirnyy A.Yu. Disperse Soils Dilatancy Studies and the Methods of its Quantitative Assessment. *Inzhenernaya geologiya* = Engineering Geology World, 2019, vol. XIV, no. 2, pp. 34–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2019-14-2-34-43>

11. Никифорова А.И., Григорьева О.И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4(16-4). С. 320–323.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Modeling of the Influence of Propulsion of Forest Machines on the Soil of the Cutting Area. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2015, vol. 3, no. 5-4(16-4), pp. 320–323. (In Russ.).
<https://doi.org/10.12737/16269>

12. Никифорова А.И., Григорьева О.И., Киселев Д.С., Хахина А.М., Рудов М.Е. Оценка экологической безопасности работы лесных машин // Природные ресурсы и

экология Дальневосточного региона: материалы Междунар. науч.-практ. форума. Хабаровск: ТОГУ, 2013. С. 134–138.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kiselev D.S., Khakhina A.M., Rudov M.E. Environmental Safety Assessment of Forest Machinery. *Prirodnye resursy i ekologiya Dal'nevostochnogo regiona*: Materials of the International Scientific and Practical Forum. Khabarovsk, Pacific National University Publ., 2013, pp. 134–138. (In Russ.).

13. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 101–117.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. The Study of the Destruction Process of Frozen and Thawing Soils Exposed to the Skidding System. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 2, pp. 101–117. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-101-117>

14. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Пучнин А.Н. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 116–128.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'ev M.F., Puchnin A.N. Features of Taking into Account the Condition of Frozen Soils Solid Mass in Cyclic Interaction with the Skidding System. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 1(33), pp. 116–128. (In Russ.).

https://doi.org/10.12737/article_5c92016f49c838.40242030

15. Царанов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2007. № 6. С. 31–34.

Tsarapov M.N. Formation of Strength Characteristics of Soils during Thawing. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya* = Moscow University Bulletin. Series 4: Geology, 2007, no. 6, pp. 31–34. (In Russ.).

16. Grigorev I., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhiev A., Egipko S., Perfiliev P., Savvateeva I. The Experimental Study of Logging Residue Stock on Logging Sites Following Clear-Cutting Using a Sorting Machine System. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 267–275.

<https://doi.org/10.1504/IJSPM.2023.10062370>

17. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Ivanov V., Shadrina S., Grigorev I. Influence of Different Forest Management Techniques on the Quality of Wood. *Journal of Renewable Materials*, 2021, vol. 9, no. 12, pp. 2175–2188.

<https://doi.org/10.32604/jrm.2021.016387>

18. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Savchenkova V., Hertz E., Voronova A., Ivanov V., Shvetsova V., Grigorev I., Lavrov M. Comparative Analysis of Thinning Techniques in Pine Forests. *Journal of Forestry Research*, 2022, vol. 33, pp. 1145–1156.

<https://doi.org/10.1007/s11676-021-01415-8>

19. Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for Calculating Schemes of Transport Routes in a Felling Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. no. 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012025>

20. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Z., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical Approaches to Logging Trail Network Planning: Increasing Efficiency of Forest Machines and Reducing Their Negative Impact on Soil and Terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 61–75. <https://doi.org/10.3233/AJW190049>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article