



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ КОЛЕИ И ЕЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ РАБОТЕ ЛЕСНЫХ МАШИН И ТРЕЛЕВОЧНЫХ СИСТЕМ НА СКЛОНАХ МАССИВА ОТТАИВАЮЩЕГО ПОЧВОГРУНТА

Виталий А. Каляшов¹ ✉, vit832@yandex.ru, 0000-0002-8145-7058

Владимир Я. Шапиро², shapiro54vlad@mail.ru, 0000-0002-6344-1239

Игорь В. Григорьев³, silver73@inbox.ru, 0000-0002-5574-1725

Ольга А. Куницкая³, ola.ola07@mail.ru, 0000-0001-8542-9380

Ольга И. Григорьева², grigoreva_o@list.ru, 0000-0001-5937-0813

Тамара Н. Стородубцева⁴, tamara-tns@yandex.ru, 0000-0002-4925-8542

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
2-я Красноармейская ул., 4, г. Санкт-Петербург, 190005, Россия

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»,
Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Россия

³ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Республика Саха
(Якутия), шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Россия

⁴ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»,
ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

Значительная часть спелых и перестойных эксплуатационных лесных массивов Российской Федерации сосредоточена в Дальневосточном федеральном округе. Большая часть лесов Дальнего Востока характеризуется неудобным для работы традиционных систем машин лесосечных работ рельефом – крутыми и очень крутыми склонами. Кроме этого, значительная часть лесов Дальнего Востока произрастает на вечной мерзлоте. Известно, что леса на склонах относятся к одним из наиболее ранимых в экологическом плане, то же можно сказать и о лесах на вечной мерзлоте. В результате леса криолитозоны, произрастающие на склонах, можно отнести к одним из самых ранимых лесных экосистем. В связи с этим требования по экологической эффективности лесных машин и трелевочных систем при заготовке древесины в лесах криолитозоны, произрастающих на склонах, являются одними из самых жестких. Данное обстоятельство весьма важно, например, для развития лесозаготовок в Республике Саха (Якутия). О негативном влиянии движителей лесных машин на почвогрунты лесосек хорошо известно, этот вопрос изучался и изучается большим количеством ученых. Негативное воздействие на почвогрунты, прежде всего, заключается в переуплотнении и образовании колеи, которая в дальнейшем является центром возникновения водной и ветровой эрозии. Решение проблемы экологической совместимости современных лесных машин и трелевочных систем с почвогрунтами лесосек криолитозоны, произрастающих на склонах, позволит увеличить эффективное освоение расчетной лесосеки в лесах на вечной мерзлоте. Наиболее оптимальным путем повышения экологической совместимости машин и лесной экосистемы является обоснование оптимальных для конкретных условий параметров машин и показателей их работы.

Ключевые слова: мерзлотные почвогрунты, образование колеи, лесные машины, лесозаготовки, леса на склонах.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исследование процесса образования колеи и ее устойчивости при работе лесных машин и трелевочных систем на склонах массива оттаивающего почвогрунта / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева, Т. Н. Стородубцева // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 2 (42). – С. 121–132. – Библиогр.: с. 129–131 (14 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/12>.

Поступила: 12.05.2021 *Принята к публикации:* 26.06.2021 *Опубликована онлайн:* 01.07.2021

INVESTIGATION OF THE TRACK FORMATION PROCESS AND ITS STABILITY DURING THE OPERATION OF FOREST MACHINES AND SKIDDING SYSTEMS ON THE SLOPES OF THE THAWED SOIL

Vitaly A. Kalyashov¹ ✉, vit832@yandex.ru,  0000-0002-8145-7058

Vladimir Y. Shapiro², shapiro54vlad@mail.ru,  0000-0002-6344-1239

Igor V. Grigoriev³, silver73@inbox.ru,  0000-0002-5574-1725

Olga A. Kunitskaya³, ola.ola07@mail.ru,  0000-0001-8542-9380

Olga I. Grigorieva², grigoreva_o@list.ru,  0000-0001-5937-0813

Tamara N. Storodubtseva⁴, tamara-tns@yandex.ru,  0000-0002-4925-8542

¹St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation

²Saint Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, 5, Institutskiy per., St. Petersburg, 194021, Russian Federation

³Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye highway, 3 km, 3, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, 677007, Russian Federation

⁴Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva street, Voronezh, 394087, Russian Federation

A significant part of mature and over-mature commercial forests of the Russian Federation are concentrated in the Far Eastern Federal District. Most of the forests of the Far East are characterized by a relief that is inconvenient for the operation of traditional machine systems for logging operations (steep and very steep slopes). In addition, a significant part of the forests of the Far East grows on permafrost. It is known that the forests on the slopes are among the most vulnerable from the ecological point of view, the same can be said about the forests on the permafrost. As a result, the permafrost forests growing on the slopes can be attributed to one of the most vulnerable forest ecosystems. In this regard, the requirements for the environmental efficiency of forest machines and skidding systems when harvesting wood in the forests of the permafrost zone growing on the slopes are one of the most stringent. This circumstance is very important, for example, for the development of logging in the Republic of Sakha (Yakutia). It is well known about the negative impact of forest machine propellers on the soils of cutting areas; this issue has been studied and is being studied by a large number of scientists. The negative impact on soils, first of all, consists in overconsolidation and the formation of a track, which in the future is the center of water and wind erosion. Solving the problem of ecological compatibility of modern forest machines and skidding systems with soils of permafrost cutting areas growing on the slopes will increase the effective development of the allowable cut in forests on permafrost. The most optimal way to increase the environmental compatibility of machines and forest ecosystem is to substantiate the optimal machine parameters and performance indicators for specific conditions.

Keywords: permafrost soils, rutting, forest machines, logging, slope forests.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Kalyashov V. A., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I., Storodubtseva T. N. (2021) Investigation of the track formation process and its stability during the operation of forest machines and skidding systems on the slopes of the thawed soil. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 2 (42), pp. 121-132 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/12>.

Received: 12.05.2021 **Accepted for publication:** 26.06.2021 **Published online:** 01.07.2021

Введение

Особые условия эксплуатации лесных машин и трелевочных систем отмечаются при производстве лесосечных работ на склонах, содержащих в своем составе массив оттаивающего почвогрунта на границе с зоной вечной мерзлоты [1-4].

О сложном состоянии таких почвогрунтов, их прочностных характеристиках наглядно свидетельствуют результаты экспериментальных исследований [5, 6]. Установлено, что поровое давление P_n вдоль склона в оттаивающем слое массива является величиной переменной и может отличаться от величины нормального давления как в большую, так и в меньшую сторону. Если граница зоны оттаивания является ледяной водонепроницаемой прослойкой, то возникает избыток P_n и, как следствие, высокая концентрация воды. Склон в этом случае наименее устойчив, поскольку возможен сдвиг участка массива вдоль этой прослойки.

Однако уклон склона обеспечивает и процесс интенсивного оттока воды, обуславливает значительный коэффициент ее фильтрации из оттаивающего почвогрунта, что приводит к существенному снижению величины P_n (его рассеиванию) по мере приближения к подошве склона.

Так, в работе [7] подчеркивается, что поровое давление прямо пропорционально толщине H_T слоя оттаявшего почвогрунта на вершине склона и толщине H_e слоя воды в его основании (подошве), в связи с чем влажность (W , %) почвогрунта не постоянна, принимая соответственно минимальные значения на вершине и максимальные значения на подошве склона. Между указанными слоями находится слой оттаивающего грунта толщиной $H_{от}$.

Указанные процессы изменения влажности в массивах сплошной среды происходят более интенсивно при наличии внешней статической нагрузки, создаваемой лесной машиной или трелевочной системой.

Материалы и методы

Современные лесные машины, трелевочные системы на их базе, в частности форвардеры, имеют до трех колесных пар, т. е. один и тот же участок массива подвергается многократной (циклической) статической нагрузке. Наряду с дополнительными проходами системы это приводит к росту плотности почвогрунта [6] и, как следствие, для мерзлых и оттаивающих почвогрунтов – к увеличению рассеивания порового давления и оттоку влаги в нижележащие слои [7].

В том случае, когда оттаивающий участок массива непосредственно контактирует с мерзлым почвогрунтом, процесс фильтрации воды и ее переход из жидкого состояния в твердое носит вероятностный характер.

В работе [8] изучены указанные особенности циклической трансформации влаги в слое оттаивающего массива на основе матриц переходных состояний и цепей Маркова.

При работе на склонах указанные обстоятельства приобретают особое значение, поскольку в этом случае устойчивость участка массива и его физико-механические свойства также будут зависеть от меры рассеивания порового давления и изменения параметра влажности почвогрунта W .

Исследования [5, 6] показали, что минимальная влажность почвогрунта (на верхних участках склона) после оттока влаги будет стремиться к нижнему пределу пластичности или величине на

границе раскатывания (W_p), тогда как максимальная влажность на нижних участках склона будет стремиться к верхнему пределу пластичности или величине на границе текучести (W_T).

При этом следует отличать состояния оттаившего и оттаивающего участков массива склона.

Прочностные характеристики оттаивающего почвогрунта существенно (на 20-50 %) меньше аналогичных характеристик оттаявшего почвогрунта, поскольку при оттаивании почвогрунт успевает консолидироваться и нивелируется действие источника избыточного порового давления – переувлажненного слоя почвогрунта в зоне контакта со слоем воды на границе с зоной мерзлоты.

В том случае, если граница оттаивания проходит через уплотненную грунтовую прослойку, величина $P_n \rightarrow 0$ и участок склона более устойчив.

Таким образом, наиболее сложные условия взаимодействия лесной машины или трелевочной системы с массивом почвогрунта при работе на склонах возникают при наличии слоя оттаивающего почвогрунта вблизи с устойчивой водонепроницаемой границей зоны мерзлоты.

Результаты и обсуждение

Надежность прогноза устойчивости склона, сложенного участком оттаивающего почвогрунта, зависит от достоверности определения его прочности, т. е. величин сцепления C и угла внутреннего трения φ .

Как отмечалось в работе [10], по мере увеличения показателя влажности W до уровня $0,75W_T$ и

более наблюдается существенное снижение параметров C и φ по сравнению с аналогичными показателями C_c и φ_c , соответствующими состоянию почвогрунта, влажность которого примерно равна пределу пластичности и не превосходит 50 % предела текучести.

Так, величина C для почвогрунтов в диапазоне изменения влажности от уровня ниже предела пластичности до 75 % предела текучести W_T снижается с 75-150 до 10-15 кПа, а угол φ – с 25 до 7°. При этом величина модуля общей деформации E для указанного диапазона W снижается с уровня 25-50 МПа до 1-3 МПа. При $W > 0,75W_T$ величина E достигает значений 0.3-0.5 МПа.

Введем показатель относительной влажности грунта в виде $K_W = \frac{W}{W_m}$.

Для оттаивающих грунтов в работах [5, 6] получены опытные данные об изменении характеристик E , C и φ в диапазоне изменения K_W от 0,5 до 0,9 для четырех образцов оттаивающих грунтов – супеси легкой, песка пылеватого, суглинка и супеси тяжелой.

В табл. 1 представлены значения указанных характеристик для одного вида оттаивающего грунта – супеси легкой.

Сравнение данных табл. 1 с результатами исследований [10] показывают удовлетворительное соответствие по показателю сцепления C и существенное количественное расхождение для модуля E и угла φ в сторону больших значений, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики оттаивающего грунта в зависимости от K_W

Table 4

Characteristics of the thawing soil depending on the K_W

Грунт Ground	Характеристики Specifications	Показатель Indicator K_W						
		0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,90
Супесь легкая Light sandy loam	Модуль Module E , МПа	70	56	49	45	43	42	41
	Сцепление adhesion C , кПа	15	14	12	11	10	9	8
	Угол Corner φ , °	37	36	35	34	34	34	33

Для конкретных условий работ необходимо на месте отбирать образцы слагающих массив виды почвогрунтов и определять их физико-механические свойства.

Для более достоверного анализа и сопоставления приведенных в табл. 1 характеристик, приняв для каждой из них данные при $K_W = 0,75$ за единицу, на рис. 1 в безразмерном виде представлены зависимости коэффициентов K_E , K_C и K_ϕ , характеризующих снижение абсолютных значений E , C и ϕ в зависимости от коэффициента K_W .

Анализ графических данных свидетельствует о практически идентичном характере относительного снижения значений модуля E (кривая 1) и сцепления C (кривая 2), несмотря на существенные отличия их абсолютных значений. Иной, более плавный вид относительного снижения наблюдается для показателей угла внутреннего трения ϕ (кривая 3).

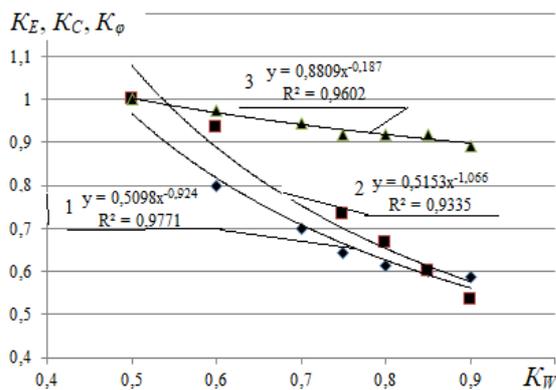


Рис. 1. Снижение характеристик оттаивающего грунта с ростом показателя K_W :

1 – K_E ; 2 – K_C ; 3 – K_ϕ

Figure 1. Decrease in the characteristics of thawing soil with an increase in the K_W index:

1 – K_E ; 2 – K_C ; 3 – K_ϕ

Источник: собственные расчеты авторов

Source: authors' own calculations

Полученные степенные зависимости с достаточно высокими коэффициентами детерминации (R^2 превышает 0,93) позволяют произвести корректировку характеристик оттаивающего грунта по сравнению с их данными E_c , C_c и ϕ_c , соответствующими состоянию влажности при $K_W \leq 0,5$:

$$E = (0,8809 K_W^{-0,187}) E_c,$$

$$C = (0,5153 K_W^{-1,066}) C_c,$$

$$\phi = (0,5098 K_W^{-0,924}) \phi_c. \quad (1)$$

Вопросы, связанные с образованием колеи, глубина которой h_k может превысить нормативное значение, тесно связаны с проблемами устойчивости и прочности краевой части массива на склоне в пределах волока, когда внешняя нагрузка может привести к его разрушению и переходу в неравновесное состояние.

Требования по ограничению грузоподъемности лесной машины или трелевочной системы и снижению усилий сопротивления ее движению обуславливают нормативно допустимую глубину колеи (h_k) после первого прохода в пределах $h_k \leq 0,10$ м.

Если в мерзлых почвогрунтах это ограничение в большинстве случаев выполняется, то в оттаивающих грунтах наблюдается существенное его превышение с достижением значений $h_k = 0,25-0,3$ м, а в некоторых случаях – до 0,4-0,5 м.

Рассмотрим склон с углом наклона α к линии горизонта (рис. 2), сложенный участком оттаявшего почвогрунта 1 высотой H_T и участком оттаивающего грунта 2 высотой H_{OT} . В основании склона присутствует слой воды 3 высотой H_w , граничащий со слоем мерзлого почвогрунта 4.

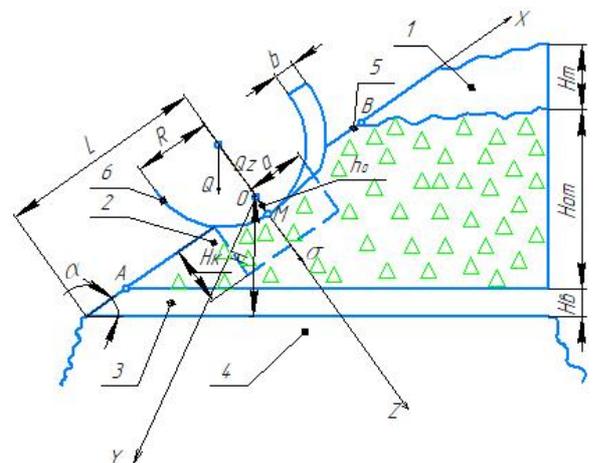


Рис. 2. Схема воздействия штампа на оттаивающий массив на склоне

Figure 2. Diagram of the impact of the stamp on the thawing array on the slope

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

На поверхности 5 склона массив испытывает статическое воздействие лесной машины или трелевочной системы весом Q , передаваемое почвогрунту через колесо (штамп) b радиусом R и шириной b .

Поместим центр декартовой системы координат $xOyz$ в точку O приложения силы $Q_z = Q \cdot \cos\alpha$, действующей перпендикулярно к поверхности 5 при удалении точки O от подошвы склона на расстоянии L . Таким образом, штамп отстоит от мерзлого массива почвогрунта 4 на расстоянии $H = L \cdot \sin\alpha$.

Если принять, что реализуются отмеченные выше механизмы фильтрации воды вследствие линейного рассеивания порового давления, и допустить, что в точке B поверхности склона на границе зон оттаявшего и оттаивающего массива влажность близка к значениям $0,9W_T$, а в точке A на границе оттаявшего почвогрунта со слоем воды – $0,5W_T$, то для оценки величины K_W вдоль поверхности склона можно использовать линейное соотношение

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin\alpha}{H_{om}} \quad (2)$$

Таким образом, при перемещении штампа по поверхности склона и изменении расстояния L определяем с помощью соотношения (2) коэффициент K_W , после чего, основываясь на корреляционных зависимостях (1), находим абсолютные значения характеристик оттаивающего почвогрунта как функции аргумента K_W – его модуль общей деформации $E(K_W)$, величину сцепления $C(K_W)$ и угол внутреннего трения $\varphi(K_W)$.

Установленные характеристики являются определяющими при реализации механизма разрушения оттаивающего почвогрунта сдвигом.

Максимальная тяга и обусловленная этим сила поверхностного трения оказывают влияние на величину сопротивления почвогрунта сдвигу τ , которая зависит от действующей нормальной (вертикальной) нагрузки σ , величин C и φ и в соответствии с обобщенным уравнением Кулона-Мора равна

$$\tau(K_W) = C(K_W) + \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi(K_W) \quad (3)$$

Показатели σ_o начального давления штампа на почвогрунт при различном числе колесных пар

для трелевочных систем заданного веса Q приведены в табл. 2.

Для определения параметров контактного разрушения грунта [11] и оценки глубины h_k образованной в нем колеи воспользуемся математическими моделями [12], разработанными для оценки напряженно-деформированного состояния ряда сплошных сред с заданными свойствами при их взаимодействии со штампами (инденторами) различной геометрической формы.

Т а б л и ц а 2

Характеристики трелевочных систем и величина их давления на почвогрунт

Table 2

Characteristics of skidding systems and the amount of their pressure on the soil

Трелевочная система Skidding system	Вес Q, т	σ_o , кПа	
		Штамп stamp 1/ число колесных пар number of wheel pairs	Штамп stamp 2/ число колесных пар number of wheel pairs
I. 4- колесная 4-wheel	15	68 / 1	84 / 1
II. 6- колесная 6-wheel	16	72 / 1	40+40; 27 / 3
III. 8- колесная 8-wheel	19	35 / 2	56 / 2
IV. 10- колесная 10-wheel	20	35 / 2	37 / 3

Под действием силы Q_z в точке M контактной площадки радиусом a и глубиной h_o (рис. 2) действует начальное давление σ_o , которое определяет радиальную (нормальную) σ_r и тангенциальную σ_θ (ортогональную σ_r) компоненты тензора напряжений в соответствии с соотношениями

$$\sigma_r = \frac{\sigma_o}{(r/a)^n}; \quad \sigma_\theta = \gamma \sigma_r, \quad \gamma = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (4)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радиальная координата, γ – коэффициент бокового распора, ν – коэффициент Пуассона, $n = k - \frac{\gamma}{2}$ – коэффициент затухания напряжений, зависящий от формы поверхности контакта штампа с краевой частью массива почвогрунта. Для штампа сферической формы $k = 3$, цилиндрической – 2, для плоского штампа – 1.

Основываясь на положениях [9], с учетом коэффициента K_W контактные параметры a и h_0 определим в виде

$$a = \sqrt[3]{\frac{3Q\cos\alpha(1-\nu^2)R}{4E(K_W)}}, \quad h_0 = a^2/R, \quad (5)$$

где R – радиус колеса, м, ν – коэффициент Пуассона.

Тогда главное касательное напряжение (напряжение сдвига) в главных осях равно

$$\sigma_s = 0,5(\sigma_r - \sigma_\theta), \quad (6)$$

которое при сравнении с величиной предела прочности на сдвиг τ в соответствии с (3) определяет условие выполнения критерия разрушения.

В итоге получено соотношение для определения глубина колеи после однократного воздействия штампа:

$$h_k = a(\alpha, K_W) \left\{ \sigma_0 \frac{(1-\nu)-2tg\varphi(K_W)}{2C(K_W)} \right\}^{1/n}. \quad (7)$$

Соотношение (7), в отличие от аналогичного в [10], полученного для условий движения по горизонтальной поверхности почвогрунта, учитывает параметры склона, местоположение штампа на его поверхности и изменение уровня влажности в зависимости от расстояния удаления от границы с зоной мерзлоты.

Рассмотрим задачу при двух значениях глубины зоны оттаивания: $H_{OT} = 7$ м и $H_{OT} = 3$ м при постоянной толщине слоя воды $H_e = 0,5$ м.

На рис. 3 представлены результаты расчетов глубины колеи h_k от расстояния L . Расчеты соответствуют следующим исходным данным:

$R = 0.63$ м, $b = 0.28$ м, $Q = 19$ т, $k = 3$, $\nu = 0.25$,
 $C_c = 30$ кПа, $\varphi_c = 15^\circ$, $E_c = 1$ МПа, $W_T = 40\%$, $\alpha = 20^\circ$ (8)

Параметр L изменялся от 2 до 20 м, коэффициент K_W – от 0.5 до 0.9, величина начального давления $\sigma_0 = 27$ кПа.

Анализ полученных результатов показывает, что при таком незначительном начальном давлении штампа на почвогрунт в основном удастся выдержать глубину колеи в нормативных пределах, за исключением случаев приближения штампа к подошве склона на близкие расстояния $L = 6-13$ м в зависимости от размеров слоя оттаивания.

Зафиксируем параметр $L = 15$ м и исследуем влияние начального давления на процесс образования колеи на склоне (рис. 4).

Как видим, даже при значительном удалении штампа от подошвы склона и, следовательно, от зоны переувлажненного слоя почвогрунта и слоя воды на границе с зоной мерзлоты обеспечить нормативные показатели глубины колеи при значениях начального давления $\sigma_0 \geq 35$ кПа не представляется возможным как при $H_{OT} = 3$ м, так и при $H_{OT} = 7$ м. В этом случае необходимо либо снижать вес пачки Q , либо регулировать давление в шинах.

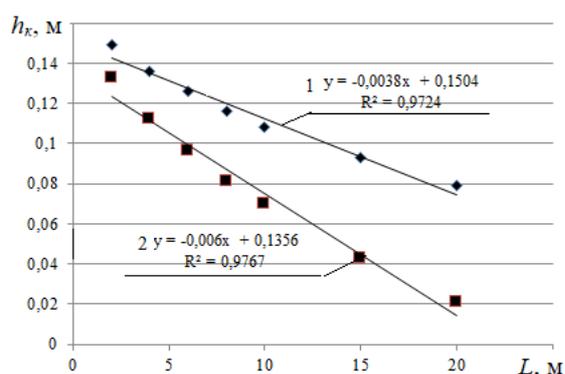


Рис. 3. Зависимость h_k от L :

1 – $H_{OT} = 7$ м; 2 – $H_{OT} = 3$ м

Figure 3. Dependence of h_k on L

1 – $H_{OT} = 7$ м; 2 – $H_{OT} = 3$ м

Источник: собственные расчеты авторов

Source: authors' own calculations

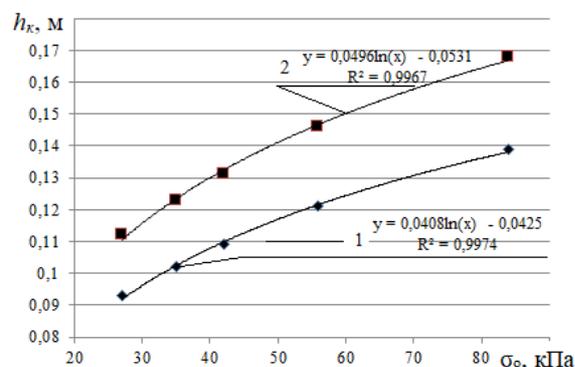


Рис. 4. Влияние начального давления штампа на глубину образования колеи в оттаивающем массиве почвогрунта:

1 – $H_{OT} = 7$ м; 2 – $H_{OT} = 3$ м

Figure 4. Influence of the initial pressure of the stamp on the depth of the formation of the track in the thawing mass of the soil:

1 – $H_{OT} = 7$ м; 2 – $H_{OT} = 3$ м

Источник: собственные расчеты авторов

Source: authors' own calculations

Как показали расчеты, угол наклона склона α является одним из определяющих факторов влияния на процесс образования колеи в оттаивающем слое массива.

На рис. 5 представлены зависимости h_k (ось ординат, м) от угла α (ось абсцисс, °) при $L = 15$ м и двух значениях $\sigma_o = 35$ кПа и $\sigma_o = 56$ кПа.

Представленные на рис. 5 кривые являются практически равноудаленными друг от друга (эквидистантными), и имеет место пропорциональность $h_k \sim \frac{1}{\sqrt[3]{\alpha}}$, причем величина приращения ординат (дистанция между кривыми) пропорциональна корню кубическому из величины σ_o , т. е. повторяет закон снижения глубины колеи с ростом начального давления.

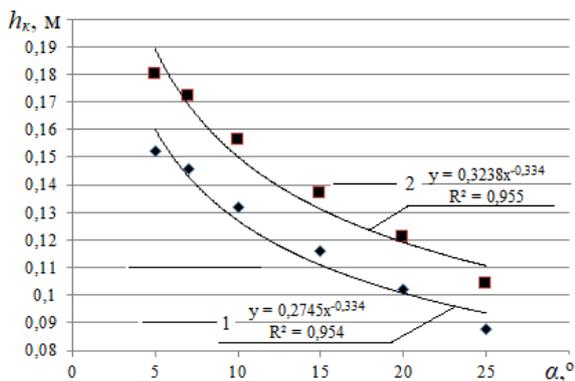


Рис. 5. Зависимость глубины колеи от угла наклона склона:

1 – $\sigma_o = 35$ кПа; 2 – $\sigma_o = 56$ кПа

Figure 5. Dependence of the track depth on the slope angle:

1 – $\sigma_o = 35$ кПа; 2 – $\sigma_o = 56$ кПа

Источник: собственные расчеты авторов
Source: authors' own calculations

Практически во всем исследованном диапазоне изменения угла α от 5 до 25° выдержать нормативное значение глубины колеи не представляется возможным. Исключение составляет работа трелевочной системы на крутых склонах ($\alpha \geq 20^\circ$) при низком начальном давлении, т. е. при достаточном удалении от границы с зоной мерзлоты.

При работах на склонах наряду с проблемой образования колеи в пределах нормативных значений существует задача обеспечения устойчивости разрушенной краевой части оттаивающего массива в границах волока.

В работе [7] этот вопрос рассмотрен достаточно подробно и для определения критерия устойчивости K оттаивающего массива используется соотношение:

$$K = \frac{tg\varphi}{tg\alpha} (1 - f) + \frac{c}{\sigma tg\alpha}, \quad (9)$$

где $f = \frac{\rho_w}{\rho} (1 + \frac{H_B}{H_{OT}})$, σ – нормальное давление, ρ_w – плотность воды.

При $K > 1$ оттаивающий массив признается устойчивым.

Подойдем к оценке критерия устойчивости с позиций равновесного состояния участка массива в пределах образованной колеи и границ контактной площадки.

Сила сдвига F_{cd} , стремящаяся сдвинуть разрушенный участок колеи вдоль поверхности склона в направлении его подошвы, равна $F_{cd} = Q \sin \alpha$.

Вес P этого участка почвогрунта составляет величину $P = g \rho a b h_k$, тогда удерживающая сила F_{y0} как сила реакции с учетом трения равна

$$F_{y0} = P \cos \alpha \cdot tg\varphi. \quad (10)$$

Введем критерий K_c как отношение удерживающей силы F_{y0} к силе сдвига F_{cd} . Тогда состояние устойчивости почвогрунта также будет соответствовать значениям $K_c > 1$.

На рис. 6 при $L = 10$ м, $H_e = 0,5$ м, $H_{OT} = 7$ м, $\sigma = \sigma_o = 84$ кПа представлены зависимости критериев K_c и K от угла α .

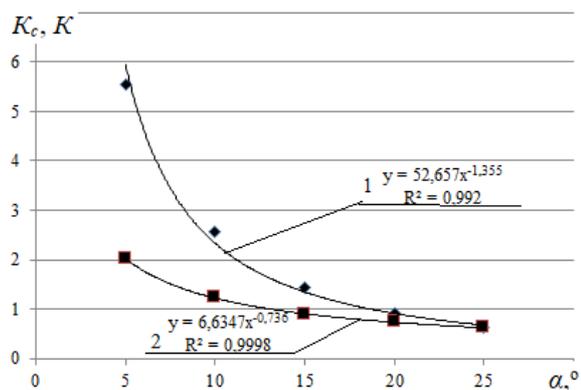


Рис. 6. Влияние угла наклона склона на устойчивость краевой части оттаивающего массива почвогрунта: 1 – K_c ; 2 – K

Figure 6. Influence of the slope angle on the stability of the edge part of the thawing soil mass: 1 – K_c ; 2 – K

Источник: собственные расчеты авторов
Source: authors' own calculations

Несмотря на количественные отличия критериев K_c и K для устойчивого состояния массива, при их значениях меньше единицы, т. е. в состоянии неустойчивости, полученные оценки критериев количественно хорошо совпадают, причем для крутых склонов ($\alpha \geq 15-20^\circ$) погрешность расчетов не превышает 10 %.

На этом основании можно сделать вывод о правомерности оценки устойчивости разрушенного участка колеи глубиной h_k по критерию равновесного состояния и баланса сил сдвига и удерживания.

Выводы

Таким образом, на примере склона, содержащего участок оттаивающего массива легкой супеси, полученные результаты подтверждают возможность прогноза глубины образованной колеи и устойчивости почвогрунта в границах волока в

процессе статического воздействия лесной машины или трелевочной системы.

Глубина образующейся колеи является важной характеристикой воздействия лесных машин на почвогрунты лесосек [13, 14].

Разработанная математическая модель учитывает параметры склона и размеры слагающих его слоев почвогрунта, величину начального давления на него лесной машины или трелевочной системы, параметры механики контактного разрушения массива, его основные упругие и прочностные характеристики, переменное состояние влажности для различных участков трассы. В совокупности это позволяет на стадии проектирования вносить обоснованные корректировки в технологические схемы транспортного освоения лесосеки (размещения трелевочных волоков) и трелевки лесоматериалов в сложных условиях лесосечных работ на склонах оттаивающих почвогрунтов.

Список литературы

1. Abbas D., Di Fulvio F., Spinelli R. European and United States perspectives on forest operations in environmentally sensitive areas. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2018; 33 (2): 188-201.
2. Budnik P., Shegelman I., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryazha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment. *Central European Forestry Journal*. 2020; 66 (1): 12-22.
3. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*. 2015; 338: 124-138.
4. Cambi M., Grigolato S., Neri F., Picchio R., Marchi E. Effects of forwarder operation on soil physical characteristics: a case study in the Italian Alps. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*. 2016; 37 (2): 233-239.
5. Калабина М. В., Царапов М. Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов. Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки : Матер. Всерос. конференции с междунар. участием. 2017. С. 542–546.
6. Царапов М. Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания. *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2007.; 6: 31-34.
7. Роман Л. Т., Царапов М. Н. Оценка устойчивости откосов, сложенных оттаивающими грунтами. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2011; 1: 58-62.
8. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействие м лесных машин и трелевочных систем. *Системы. Методы. Технологии*. 2018; 3 (39): 73-78. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-73-78.
9. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой // С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // *Лесотехнический журнал*. –2019. Т. 9. № 1 (33). С. 116–128. DOI: 10.12737/article_5c92016f49c838.40242030.

10. Агейкин Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Москва : Машиностроение, 1972. 184 с.

11. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. Москва : ЛИБРОКОМ, 2010. 544 с.

12. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Вариационный метод расчета параметров взаимодействия трелевочной системы с массивом мерзлых и оттаивающих почвогрунтов. Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68-77. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-68-77.

13. Marra E., Cambi M., Fernandez-Lacruz R. (et al.) Photogrammetric estimation of wheel rut dimensions and soil compaction after increasing numbers of forwarder passes. Scandinavian Journal of Forest Research. 2018; 33 (6): 613-620.

14. Marusiak M., Neruda J. Dynamic soil pressures caused by travelling forest machines. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2018; 39 (2): 233-245.

References

1. Abbas D., Di Fulvio F., Spinelli R. European and United States perspectives on forest operations in environmentally sensitive areas. Scandinavian Journal of Forest Research. 2018; 33 (2): 188-201.

2. Budnik P., Shegelman I., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryazha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment. Central European Forestry Journal. 2020; 66 (1): 12-22.

3. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. Forest Ecology and Management. 2015; 338: 124-138.

4. Cambi M., Grigolato S., Neri F., Picchio R., Marchi E. Effects of forwarder operation on soil physical characteristics: a case study in the Italian Alps. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2016; 37 (2): 233-239.

5. Kalabina M. V., Carapov M. N. Prochnostnye svoystva ottaivayushchih gruntov [Strength properties of thawing soils]. Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otraslevoj nauki. Materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [The current state, problems and prospects of development of branch science. Materials of the All-Russian conference with international participation]. 2017: 542-546 (In Russian).

6. Carapov M. N. Formirovanie prochnostnyh harakteristik gruntov v processe ottaivaniya [Formation of strength characteristics of soils during thawing]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya = Bulletin of the Moscow University. Series 4: Geology. 2007; 6: 31-34 (In Russian).

7. Roman L. T., Carapov M. N. Ocenka ustojchivosti otkosov, slozhennyh ottaivayushchimi gruntami [Assessment of the stability of slopes formed by thawing soils]. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya = Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. 2011; 1: 58-62 (In Russian).

8. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunickaya O. A., Grigoreva O. I. Matematicheskoe modelirovanie processa uplotneniya merzlogo pochvogrunta pod vozdejstvie m lesnyh mashin i trelevchnykh sistem [Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of forest machines and skidding systems]. Sistemy. Metody. Tekhnologii = The systems. Methods. Technologies. 2018; 3 (39): 73-78 (In Russian). DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-73-78.

9. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V. (et al.) (2019) Osobennosti ucheta sostoyaniya massiva merzlykh gruntov pri ciklicheskom vzaimodejstvii s trelevchnoj sistemoj [Features of accounting for the state of the frozen soil mass during cyclic interaction with the skidding system]. Lesotekhnicheskij zhurnal [Forest Engineering Journal], Vol. 9, No. 1 (33), pp. 116-128 (In Russian). DOI: 10.12737/article_5c92016f49c838.40242030.

10. Agejkin Ya. S. Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli [All-terrain wheeled and combined propellers]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 184 p. (In Russian).

11. Morozov E. M., Zernin M. V. Kontaknyye zadachi mekhaniki razrusheniya [Contact problems of fracture mechanics]. Izd. 2-e [2nd ed.]. Moscow: LIBROKOM, 2010. 544 p. (In Russian).
12. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunickaya O. A., Grigoreva O. I. Variacionnyj metod rascheta parametrov vzaimodejstviya trevechohnoj sistemy s massivom merzlyh i ottaivayushchih pochvogrunтов [Variational method for calculating the parameters of the interaction of the skidding system with the array of frozen and thawing soils]. Sistemy. Metody. Tekhnologii = The systems. Methods. Technologies. 2019; 1 (41): 68-77 (In Russian). DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-68-77.
13. Marra E., Cambi M., Fernandez-Lacruz R. (et al.) Photogrammetric estimation of wheel rut dimensions and soil compaction after increasing numbers of forwarder passes. Scandinavian Journal of Forest Research. 2018; 33 (6): 613-620.
14. Marusiak M., Neruda J. Dynamic soil pressures caused by travelling forest machines. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2018; 39 (2): 233-245.

Сведения об авторах

✉ *Каляшов В.А.* – доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., 4, г. Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, e-mail: vit832@yandex.ru.

Шапиро В. Я. – профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Григорьев И.В. – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Республика Саха (Якутия), шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

Куницкая О.А. – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Республика Саха (Якутия), шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Григорьева О.И. – доцент кафедры Лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, e-mail: grigoreva_o@list.ru.

Стородубцева Т.Н. – доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>, e-mail: tamara-tns@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Vitaly A. Kalyashov* – Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeyskaya str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, e-mail: vit832@yandex.ru.

Vladimir Ya. Shapiro – Professor of the Department of Higher mathematics, Saint Petersburg state forest engineering University named after S.M. Kirov, 5, Institutsky lane, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Igor V. Grigoryev – Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", Arctic state agrotechnological university, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d. 3, 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru

Olga A. Kunitskaya – Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex" Arctic state agrotechnological university, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d. 3, 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru

Olga I. Grigoreva – Associate Professor of the Department of Forestry, Saint Petersburg state forest engineering university named after S.M. Kirov, Institutsky lane, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, e-mail: grigoreva_o@list.ru.

Tamara N. Storodubtseva – Dr. Sci. (engineerin), head of the department of industrial transport, construction and geodesy, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4925-8542>, e-mail: tamara-tns@yandex.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author