

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8603

УДК 630*375

Статья

Особенности взаимодействия двигателя лесной машины при маневрировании на склоне криолитозоны при циклических нагрузках

Шапиро Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), shapiro54vlad@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Новиков Марат Семенович

аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), 715888@bk.ru

Перфильев Павел Николаевич

кандидат технических наук, доцент, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Российская Федерация), p.perfilev@narfu.ru

Друзьянова Варвара Петровна

доктор технических наук, профессор, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова (Российская Федерация), druzvar@mail.ru

Макуев Валентин Анатольевич

доктор технических наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация), makevvalentin@gmail.com

Получена: 25 апреля 2025 / Принята: 24 июня 2025 / Опубликовано: 30 июня 2025

Аннотация: Выполнение лесосечных и лесохозяйственных работ в лесных массивах на склонах на многолетней мерзлоте в тёплое время года сопряжено с повышенными нагрузками на лесные экосистемы. Прежде всего, они связаны с воздействием на почвогрунты. Нормальные и касательные напряжения, передаваемые от двигателей лесных машин массиву оттаявшего слоя сезонной

мерзлоты, приводят к сдвиговым деформациям, вызывающим образование колеи и уплотнение почвогрунта. В свою очередь, эти явления негативно сказываются на корневых системах подроста и оставляемых на доращивание деревьях, могут вызывать эрозионные процессы. Таяние слоя сезонной мерзлоты приводит к повышению влажности верхнего слоя почвогрунта и, соответственно, резкому снижению его несущей способности. В результате интенсивность роста глубины колеи возрастает. Для того чтобы компенсировать быстрый рост глубины колеи и не исчерпать возможности проходимости машины по высоте клиренса, операторы лесных машин вынуждены маневрировать. И чем интенсивнее рост колеи, тем интенсивнее маневрирование. На практике можно наблюдать, как по слабонесущему почвогрунту (трелёвочному волоку или технологическому коридору) лесная машина или трелёвочная система движется галсами, находясь в режиме маневрирования до 70 % времени движения. В результате изначально запланированные прямые трассы движения лесных машин оказываются подверженными циклическим касательным напряжениям от поворотов движителя машины. В настоящей работе показано, что для повышения работоспособности сети трелёвочных волоков (технологических коридоров), оптимизации трасс движения лесных машин и трелёвочных систем и снижения отрицательных последствий их воздействия на корневую систему подроста и оставляемых на доращивание деревьев, при циклических нагрузках на краевую часть массива оттаивающего почвогрунта на склонах на многолетней мерзлоте с высоким показателем влажности, при выборе трасс движения лесных машин и трелёвочных систем на их базе и вида движителя с заданной нагрузкой на почвогрунт необходимо давать прогнозную оценку как абсолютных значений углов маневрирования, так и допустимых диапазонов их изменения в конкретных геотехнических условиях выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ.

Ключевые слова: леса на склонах; леса на многолетней мерзлоте; маневрирование лесных машин; почвогрунты; лесосечные работы; лесохозяйственные работы

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8603

Article

Interaction features of a forest vehicle propulsion when maneuvering on a cryolithozone slope under cyclic loads

Vladimir Shapiro

D. Sc. in engineering, professor, Saint Petersburg State Forestry University named after S. M. Kirov (Russian Federation), shapiro54vlad@mail.ru

Igor Grigorev

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inboxl.ru

Marat Novikov

Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), 715888@bk.ru

Pavel Perfiliev

Ph. D. in engineering, associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Russian Federation), p.perfilev@narfu.ru

Varvara Druzyanova

D. Sc. in engineering, professor, Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov (Russian Federation), druzvar@mail.ru

Valentin Makuev

D. Sc. in engineering, professor, Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University (Russian Federation), makuevvalentin@gmail.com

Received: 25 April 2025 / Accepted: 24 June 2025 / Published: 30 June 2025

Abstract: Logging and forestry operations in forests on slopes on permafrost in the warm season cause increased stress on forest ecosystems. Mainly, they have an impact on soils. Normal and tangential stresses transmitted from a forest vehicle propulsion to the thawed layer of seasonal permafrost result in shear deformations that lead to formation of a track and compaction of the soil. In turn, these phenomena negatively affect the root systems of undergrowth and the trees left to grow and may cause erosion processes. The melting of the seasonal permafrost layer leads to an increase in the moisture content of the upper soil layer, and, consequently, a sharp decrease in its bearing capacity. As a result, the intensity of the track depth rate increases. To

compensate for the rapid increase in track depth growth, and to maintain the vehicle's cross-country capability in terms of ground clearance operators of forest vehicles have to maneuver. Therefore the more intense the track growth rate is, the more intense the maneuvering becomes. In practice, it is possible to observe how a forestry machine or a skidding system tacks along a weakly bearing soil (along a skidding portage or technological corridor), and maneuvering takes up to 70% of the driving time. Therefore, the routes of forest vehicles movement preplanned in straight lines result in cyclic tangential stresses from turns of the vehicle's propulsion. This paper shows that it is necessary to make a predictive assessment of both the absolute values of maneuvering angles and the permissible ranges of their change in specific geotechnical conditions for cutting or forestry work. This assessment may allow increasing the efficiency of the network of skidding lines (technological corridors) and optimizing the routes of movement of forest vehicles and skidding systems. Also it may reduce the negative effects of their impact on the root system of undergrowth and trees left for rearing. The assessment should be done when cyclic loads are applied on the marginal part of the thawing soil mass on slopes on permafrost with a high humidity index, when choosing routes for forest vehicles and skidding systems based on them and the type of propulsion with a given load on the soil.

Keywords: forests on slopes; forests on permafrost; maneuvering of forest machinery; soils; logging operations; forestry operations

1. Введение

Маневрирование движителя лесной машины или трелёвочной системы на её базе при выполнении лесосечных и/или лесохозяйственных работ на склоне оттаивающего почвогрунта на многолетней мерзлоте является вынужденной и необходимой технической операцией, как и при работе лесных машин в большей части других природно-производственных условий, в теплое время года — на равнине, не в криолитозоне [1], [2].

В Республике Саха (Якутия) значительное количество высокотоварной древесины распложено в её южной части, имеющей сложный пересечённый рельеф, что часто вынуждает выполнять работы на склонах на многолетней мерзлоте [3], [4].

Рубки лесных насаждений на склонах, в подавляющем большинстве случаев, проводятся в формате выборочных, различной интенсивности. При этом негативные последствия воздействия движителей используемых лесных машин на почвогрунты достаточно хорошо заметны [5—9].

По мере износа ездовой поверхности трассы движения в процессе многократного прохода лесной машины или трелёвочной системы по одному и тому же участку трелёвочного волока или технологического коридора наблюдается снижение их работоспособности вследствие увеличения глубины колеи h до 0,25—0,3 м [10—12]. Такая глубина колеи значительно превосходит нормативную величину $h_n = 0,1$ м, при которой работоспособность трелёвочного волока максимальная [13], [14].

Отметим, что с ростом глубины колеи вынужденное маневрирование возрастает, вследствие чего растёт угол θ отклонения лесной машины или трелёвочной системы от заданного по технологической карте на разработку лесосеки прямолинейного направления движения [15], [16]. Если первые 1—3 рейса лесной машины или трелёвочной системы проходят практически по прямой, то затем с ростом числа N циклов проходов движение всё чаще происходит галсами и значения углового параметра возрастают, достигая в ряде случаев 20—30° и более [17—21].

2. Материалы и методы

В процессе циклических нагрузок на почвогрунт под действием лесной машины или трелёвочной системы происходит его уплотнение, вследствие чего показатель его плотности ρ существенно возрастает по сравнению с исходной (природной) плотностью ρ_0 , называемой также плотностью естественного сложения.

Относительная плотность, равная $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$, является индикативным показателем процесса деформирования почвогрунта под действием статической или динамической циклической нагрузки от лесной машины или трелёвочной системы.

С ростом числа циклов N возрастают глубина колеи h и, как отмечалось, угол маневрирования θ , что в сочетании с увеличением относительной плотности $\bar{\rho}$ отрицательно влияет на состояние среды в зоне корневой системы подроста. Переуплотнение почвогрунта,

вытеснение из его объёма воздуха и влаги при интенсификации процессов фильтрации, развитие сдвиговых разрушающих деформаций [22] существенно ухудшают условия для успешного развития корневых систем подроста и оставляемых на доращивание деревьев.

При работе на склонах оттаивающих почвогрунтов на многолетней мерзлоте вблизи с водонепроницаемыми слоями многолетнемёрзлого грунта и зоной вечной мерзлоты отмеченные факторы дополняются особыми условиями распределения влаги вдоль трассы движения лесных машин (трелёвочных волоков, технологических коридоров) [23], [44].

Как установлено, показатель общей влажности W почвогрунта на нижних участках склона существенно (на 30—50 %, а в ряде случаев кратно) превышает W на верхних участках, что оказывает существенное влияние на физико-механические свойства краевой части массива почвогрунта. В этой связи актуальной является задача установления границ диапазона допустимых отклонений угла маневрирования лесной машины или трелёвочной системы, в пределах которых обеспечивается стабилизация работоспособности трелёвочного волока или технологического коридора при циклических нагрузках с целью достижения эффективности и безопасности проведения лесосечных и лесохозяйственных работ.

В работе [23] на основании моделирования процесса разрушения почвогрунта, с учётом маневрирования движителя, установлено соотношение для определения глубины колеи h :

$$h = a \sqrt{\frac{q}{2\tau} (1 - \gamma)(1 + \sin 2\theta)}, \quad \gamma = \nu/(1-\nu), \quad (1)$$

где a — радиус пятна контакта, q — вертикальное давление движителя на почвогрунт, τ — величина предельного касательного напряжения на площадках сдвига в рамках модели Кулона — Мора, которая зависит от величины давления q , величины сцепления C и угла внутреннего трения φ , ν — коэффициента Пуассона.

Выразим угол поворота θ из соотношения (1):

$$\theta = 0,5 \arcsin \left[2\tau \frac{(h/a)^2}{q(1-\nu)} - 1 \right]. \quad (2)$$

Таким образом, действительно, с ростом относительной глубины колеи $\bar{h} = h/a$ и сдвиговых напряжений τ угол θ увеличивается.

Влияние величины давления q движителя требует детального исследования, поскольку этот параметр присутствует в зависимости $\tau = C + qtg\varphi$ и оказывает влияние на \bar{h} .

При циклических нагрузках с ростом числа N относительная глубина колеи \bar{h} растёт в соответствии с установленным увеличением относительного уплотнения $\bar{\rho}$ [22], т. е. величину \bar{h} определим как

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{q}{2\tau} (1 - \gamma)(1 + \sin 2\theta)} (1 + \lg N), \quad (3)$$

которую будем использовать в соотношении (2) при определении угла θ .

В соотношении (3) упругопластические свойства почвогрунта характеризуются коэффициентом Пуассона ν , а прочностные свойства — предельной величиной сдвига τ .

Исследования [23], [24] показали, что параметры ν и τ существенно зависят от влажности почвогрунта W , причём эти зависимости прямо противоположные: с ростом W коэффициент ν растёт, а τ снижается. В совокупности это отражается как на глубине колеи h , так и уровне значений угла θ . Очевидно, что чем больше W , тем более глубокая образуется колея и тем больше значения угла маневрирования θ .

3. Результаты

Для количественных оценок были выполнены расчёты, которые показали следующее. При фиксированных $a = 0,22$ м, $q = 25,11$ кПа ($Q = 14$ т) и $\theta = 20^\circ$ (рисунок 1) изменение влажности W , % обуславливает линейный рост глубины колеи h , м.

Как следует из рисунка 1, маневрирование с углом поворота 20° допускается на почвогрунтах умеренной влажности с показателем W ниже своего предела пластичности $W_{II} = 25—27$ %, если необходимо выполнить условие, что глубина колеи не превысит нормативный уровень $h_n = 0,1$ м.

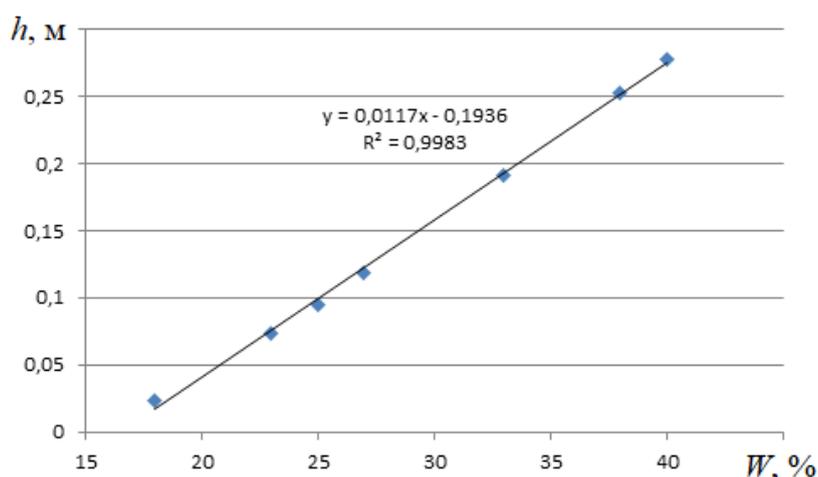


Рисунок 1. Влияние влажности почвогрунта на глубину колеи [рисунок авторов]

Figure 1. Effect of soil moisture on track depth

При более высокой влажности, особенно по мере приближения к своему пределу текучести $W_T = 40—45$ %, указанное маневрирование движителя с грузом 14 т и давлением на почвогрунт более 25 кПа приводит к кратному увеличению глубины колеи до $h = 0,25—0,3$ м. Это позволяет заключить, что показатель общей влажности почвогрунта W является фактором существенного снижения работоспособности трелёвочного волока (технологического коридора) и существенно сказывается на эксплуатационной и экологической эффективности лесных машин на лесосечных и лесохозяйственных работах.

Зафиксируем W на уровне 36 % и оценим (рисунок 2) влияние вертикального давления q , кПа движителя на глубину колеи h , м. Логарифмический характер установленной зависимости свидетельствует о том, что максимальный рост глубины колеи наблюдается в диапазоне давлений до 30 кПа, после чего имеет место асимптотический рост h .

Таким образом, снижение q до уровней 20 кПа обусловит существенное снижение h , вплоть до нормативной величины 0,1 м, что с учётом соотношения (2) и квадратичной степени влияния h на угол θ обеспечит минимальные значения угла маневрирования лесной машины или трелёвочной системы.

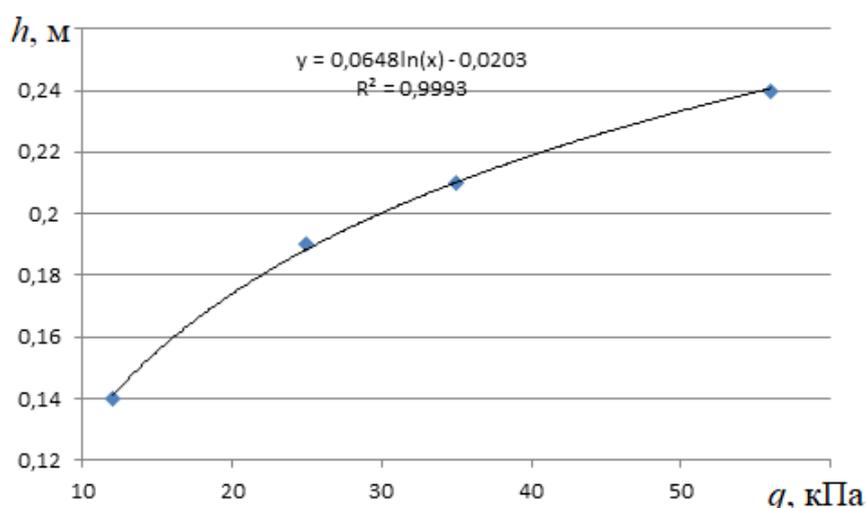


Рисунок 2. Влияние давления движителя на глубину колеи [рисунок авторов]

Figure 2. Effect of propulsor pressure on track depth

При разработке технологической карты, проектировании сети трелёвочных волоков и/или технологических коридоров, с учётом возможных их отклонений от заданного направления движения при перемещении лесных машин, расчёты должны базироваться на информации о влажности почвогрунта на конкретных участках склона. Это требует от гидрогеологических (технических) служб оперативного мониторинга распределения влаги в краевой части массива почвогрунта. Мониторинг необходимо проводить в натуральных условиях с использованием специальных портативных влагомеров и/или температурных зондов.

О необходимости мониторинга свидетельствуют данные рисунка 3, где представлена графическая зависимость угла маневрирования θ ,^o от показателя общей влажности W , %.

Расчёты выполнены для оттаивающего суглинка при использовании колёсного движителя при значениях: $Q = 14$ т, $q = 25,11$ кПа, $\tau = 8,83$ кПа, $\nu = 0,36$. Радиус пятна контакта $a = 0,22$ м, $N = 1$ (первый проход лесной машины или трелёвочной системы).

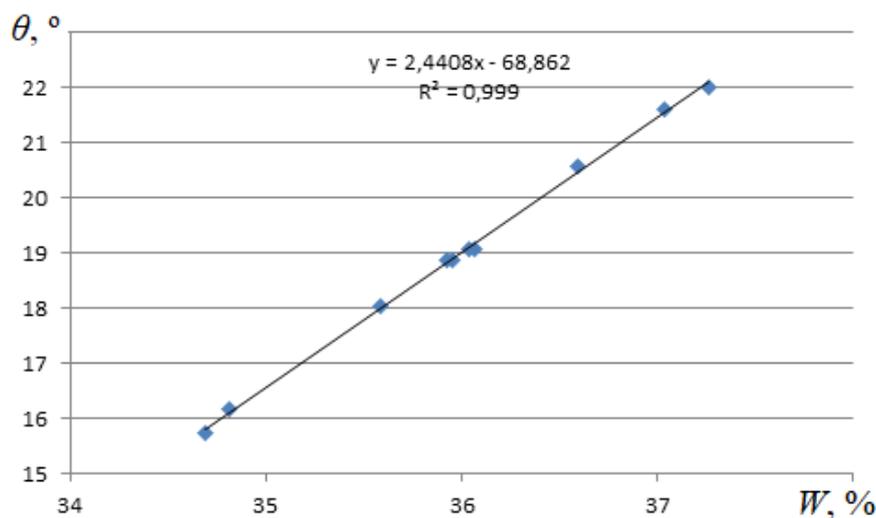


Рисунок 3. Влияние влажности почвогрунта на угол маневрирования [рисунок авторов]

Figure 3. The effect of soil moisture on the maneuvering angle

Представленная на рисунке 3 зависимость $\theta(W)$, как и зависимость $h(W)$, подчиняется линейному закону, что является дополнительным аргументом необходимости оперативного мониторинга влажности W как фактора сильного влияния как на глубину колеи, так и на угол и частоту вынужденного маневрирования в процессе движения лесной машины или трелёвочной системы.

Так, судя по графическим результатам рисунка 3, увеличение W на 6 % с 35 до 37 % приводит к росту угла вынужденного маневрирования на 24 % — с 17 до 21°. Показатель W является весьма вариативной величиной, зависящей от целого ряда геотехнических условий. К таким условиям отнесём многообразие почвогрунтов, слагающих краевую часть массива склона, их различные фильтрационные и водопроницаемые свойства.

Наряду с этим влажность почвогрунта в пределах конкретного участка волока зависит от его удалённости от подошвы склона, мощности слоёв оттаявшего и оттаивающего почвогрунтов, их удалённости от границы мёрзлого слоя и ряда других факторов [25].

Учесть влияние всех отмеченных случайных факторов на величину W затруднительно, в связи с чем показатель влажности сам является величиной случайной, зависящей от степени изменчивости (коэффициента вариации) η , процента отмеченных геотехнических условий работы лесных машин или трелёвочных систем.

Допустим, что лесосечные или лесохозяйственные работы на склоне на многолетней мерзлоте осуществляются при различных вариациях (изменчивости) геотехнических условий, которые на экспертном уровне разделим на три категории: I — слабая ($\eta = 5\%$), II — средняя ($\eta = 10\%$) и III — сильная ($\eta = 15\%$) изменчивость. Для каждой из указанных категорий целесообразно установить значения коэффициентов вариации и допустимых

диапазонов изменения показателей влажности почвогрунта, глубины колеи и угла маневрирования лесной машины или трелёвочной системы. С этой целью реализован метод статистических испытаний, суть которого заключается в следующем.

Будем считать, что показатель влажности W почвогрунта на конкретном участке склона является случайной величиной, которая образует случайную выборку значений W_i , влияющих на распределения значений глубины колеи h_i и угла поворота θ_i . Принимаем, что значения величины W_i равномерно распределены вокруг своего математического ожидания $M(W)$ с заданным параметром вариативности η геотехнических условий:

$$W_i = M(W) (1 + \eta \psi_i), \quad (4)$$

где ψ_i — случайные числа на отрезке $[-1, 1]$.

Статистическое моделирование на базе соотношения (4) предусматривает программную выработку $i = 1, 2, \dots, 10$ случайных независимых величин W_i . Условие независимости подтверждается нулевой корреляцией поля значений W_i . Вычисления производят 10 раз с последующим усреднением числовых характеристик выборки. Таким образом, общий объём генеральной совокупности равен 100.

Далее формируются две выборки случайных величин — глубины колеи h_i и угла поворота движителя θ_i с использованием полученных корреляционных соотношений, представленных на рисунках 1 и 2:

$$h_i = 0,0117 W_i - 0,1936, \quad (5)$$

$$\theta_i = 0,0314 e^{0,1798 W_i}. \quad (6)$$

Статистическая обработка сформированных выборок позволила определить числовые характеристики случайных величин — математических ожиданий $M(\mu_i)$, среднеквадратических отклонений $\sigma(\mu_i)$ и коэффициентов вариаций $\eta(\mu_i)$, где аргументами μ_i являются: μ_1 — W , μ_2 — h , μ_3 — θ .

На рисунке 4 для первой (слабой) категории изменчивости геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ приведено корреляционное поле угловых значений $\theta_i, ^\circ$ для одной из выборок $i = 1, 2, \dots, 10$ при $M(\theta) = 19^\circ$. Практически нулевой коэффициент детерминации $R^2 = 0,0009$ свидетельствует о том, варианты выборки являются независимыми. Достигнутое значение $M(\theta) = 19^\circ$ соответствует математическим ожиданиям: $M(W) = 36\%$ и $M(h) = 0,23$ м.

На первом этапе статистическое моделирование осуществлялось для условий первого прохода лесной машины или трелёвочной системы по участку волока ($N = 1$). Результаты статистического анализа представлены на рисунке 5, где отражены влияние вариативности η , процентов исходных геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ на коэффициенты вариации $\eta(W)$ и $\eta(h)$, %.

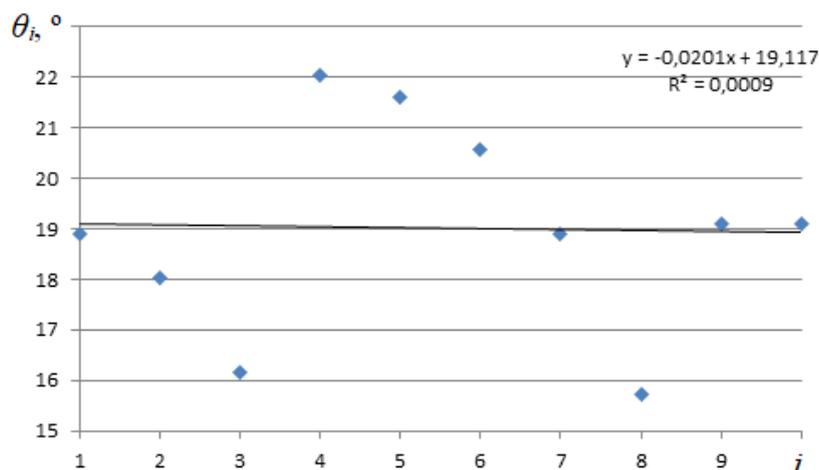


Рисунок 4. Корреляционное поле угловых значений выборки [рисунок авторов]

Figure 4. Correlation field of angular values of the sample

Сравнительный анализ значений угловых коэффициентов прямых (первых производных соответствующих функций) позволяет заключить, что по мере роста изменчивости геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ интенсивность изменения углового параметра θ более чем в 7 и 3,5 раз выше интенсивности изменения соответственно глубины колеи h и влажности почвогрунта W . Таким образом, наиболее вариативным параметром в процессе выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ на склоне является угол вынужденного маневрирования лесной машины или трелёвочной системы, что негативно отразится как на работоспособности трелёвочного волока (технологического коридора), так и на сохранности корневой системы подроста и оставляемых на доращивание деревьев.

На втором этапе исследований изучено влияние циклического характера нагрузок на абсолютные значения и числовые характеристики случайной величины — углового параметра θ для трёх категорий изменчивости геотехнических условий. Результаты статистического моделирования сведены в таблицу.

Таблица. Результаты статистического моделирования вариативности угла поворота θ

Table. Results of statistical modeling of rotation angle variability θ

N	M(θ), $^\circ$	Коэффициент вариации $\eta(\theta)$, процент для категорий изменчивости		
		I	II	III
1	19	10,25	20,48	30,76
2	33	7,60	15,19	22,80
3	41	6,90	13,78	20,69

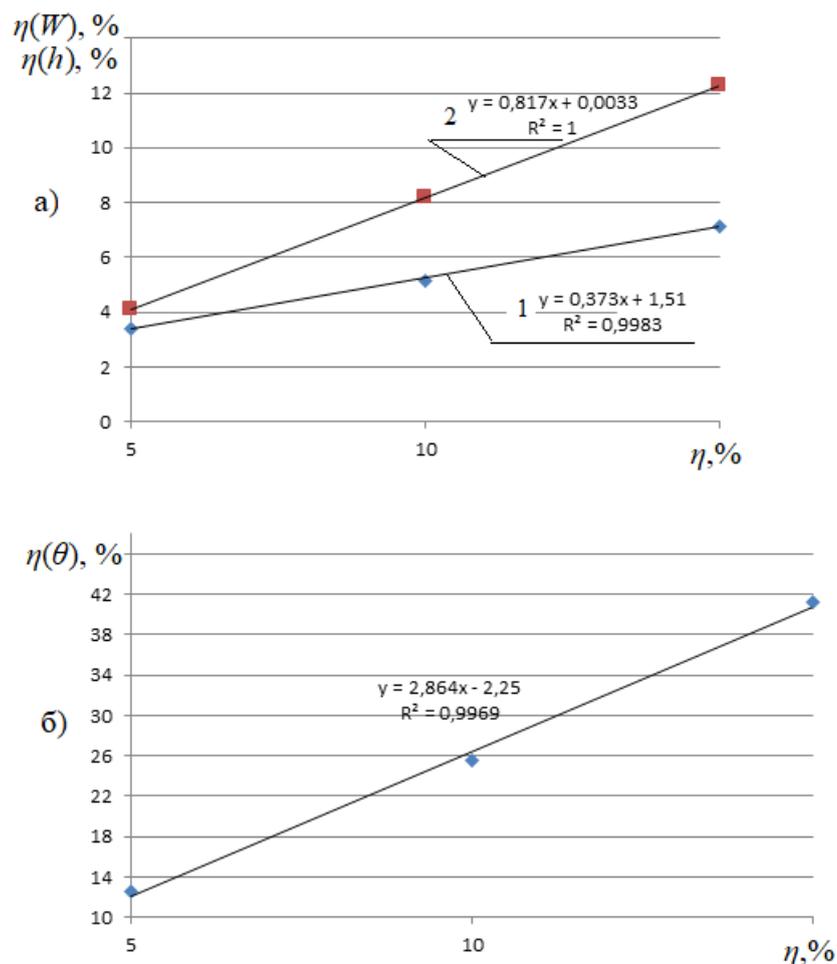


Рисунок 5. Влияние вариации геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ на вариации влажности почвогрунта, глубины колеи и угла поворота движителя: а — зависимости: 1 — $\eta(W)$, 2 — $\eta(h)$; б — зависимость $\eta(\theta)$ [рисунок авторов]

Figure 5. The effect of variations in geotechnical conditions of logging or forestry work on variations in soil moisture, track depth and angle of rotation of the propulsor: (a) dependencies: 1 — $\eta(W)$, 2 — $\eta(h)$; (b) dependence of $\eta(\theta)$

Как следует из анализа данных таблицы, с ростом цикличности величина $M(\theta)$ существенно возрастает, а её вариативность асимптотически снижается для всех трёх категорий условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ. Это означает, что при высокой влажности почвогрунта следует в максимальной степени избегать маневрирования движителя даже на первых циклах проходов лесной машины или трелёвочной системы по одному и тому же участку трелёвочного волока (технологического коридора). При этом актуальным является вопрос установления допустимых пределов изменения угла поворота при циклических нагрузках на почвогрунт.

Полученные значения математических ожиданий угла поворота и коэффициентов вариации, с учётом цикличности проходов, позволили установить значения среднеквадратических отклонений $\sigma(\theta)$ и диапазоны изменения угла θ от его минимума θ_{min} до максимума θ_{max} с размахом $\Delta\theta$, равным «двум сигмам»:

$$\theta_{min} = M(\theta) - \sigma(\theta); \quad \theta_{max} = M(\theta) + \sigma(\theta); \quad \Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{min}. \quad (7)$$

На рисунке 6 для трёх категорий изменчивости геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ представлены зависимости $\theta_{min}(\theta)$ и $\theta_{max}(\theta)$. Рисунок 6 иллюстрирует характер расширения границ допустимого диапазона вынужденного маневрирования движителя с ростом цикличности при различной изменчивости условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ: с 4—6° для I категории до 12—16° и более для III категории.

Таким образом, при многократных проходах лесной машины или трелёвочной системы увеличивается не только угол возможного их манёвра, но и границы его допустимого диапазона. Эта тенденция возрастает по мере снижения стабильности и роста вариативности геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ.

Зависимость (рисунок 7) величины размаха $\Delta\theta,^\circ$ от N для трёх категорий условий изменчивости геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ: I — линия 1, II — линия 2 и III — линия 3 наглядно подчёркивает сделанный вывод. Данные рисунков 6 и 7 свидетельствуют о существенных показателях угла маневрирования и величины его размаха, особенно достигаемых на третьем проходе движителя.

Этот вывод соответствует статической нагрузке $Q = 14$ т при вертикальном давлении $q = 25,11$ кПа на участок трелёвочного волока (технологического коридора), где почвогрунт имеет весьма высокую влажность $W = 36\%$ и низкое сопротивление сдвигу $\tau = 8,83$ кПа.

Снижение маневрирования без уменьшения веса груза Q и, соответственно, производительности работ достигается понижением давления на почвогрунт q , о чём было сказано выше и подтверждается данными рисунка 2 в контексте прямых связей $q \rightarrow h \rightarrow \theta$.

Величины нормальных и касательных напряжений, передаваемых от лесной машины или трелёвочной системы к поверхности склона, зависят от вида движителя, площади пятна контакта, тягового усилия, скорости движения и других факторов. У самых распространённых в настоящее время — колёсных лесных машин наряду с фактором давления имеет значение и вид шины.

Кроме того, шина может иметь различные формы и поверхности грунтозацепов, при работе на склонах в сложных геотехнических условиях в шины в ряде случаев наливают соляной раствор с целью повышения устойчивости лесной машины или трелёвочной системы и снижения центра тяжести [26]. В дополнение к сказанному следует отметить и возможность при необходимости оснащения тандемных мостов колёсных лесных машин моногусеницами.

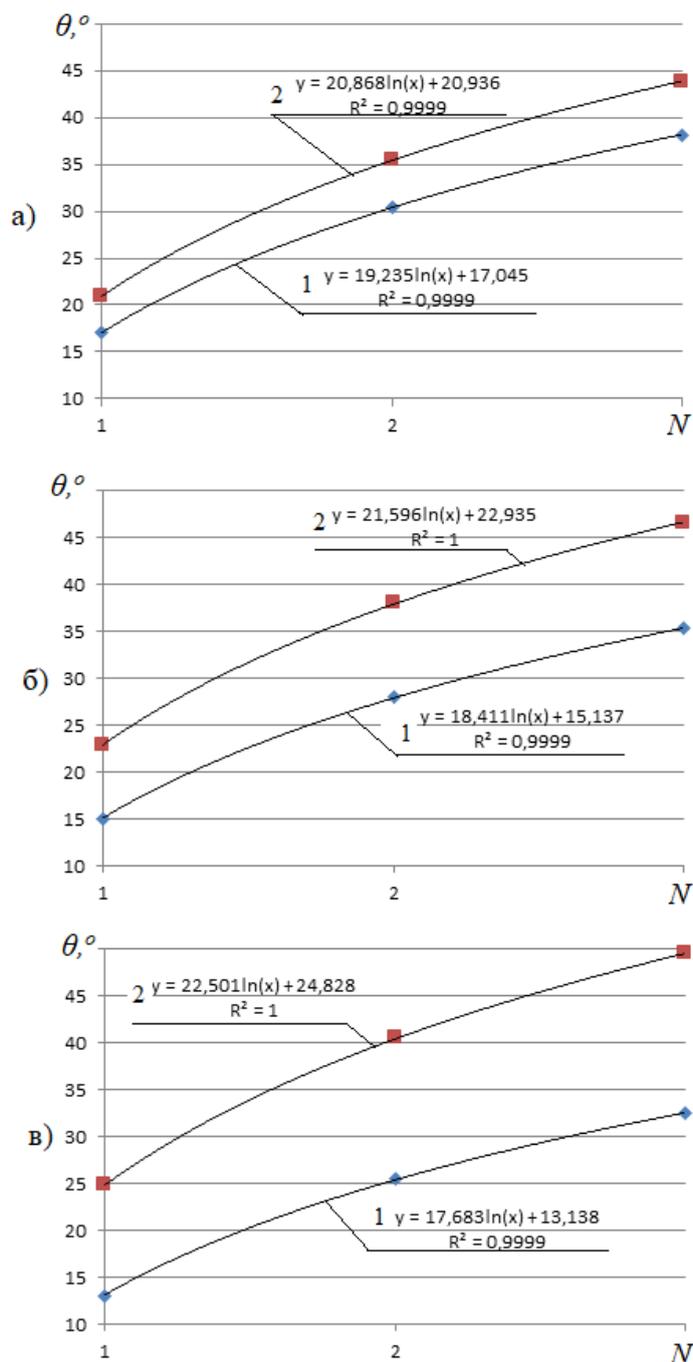


Рисунок 6. Зависимость границ диапазона изменения угла θ от цикла N для трёх категорий изменчивости геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ: а — I; б — II; в — III; 1 — $\theta_{min}(\theta)$; 2 — $\theta_{max}(\theta)$ [рисунок авторов]

Figure 6. Dependence of the boundaries of the angle range θ on the cycle N for three categories of variability of geotechnical conditions for logging or forestry work: (a) I; (b) II; (c) III; 1 — $\theta_{min}(\theta)$; 2 — $\theta_{max}(\theta)$

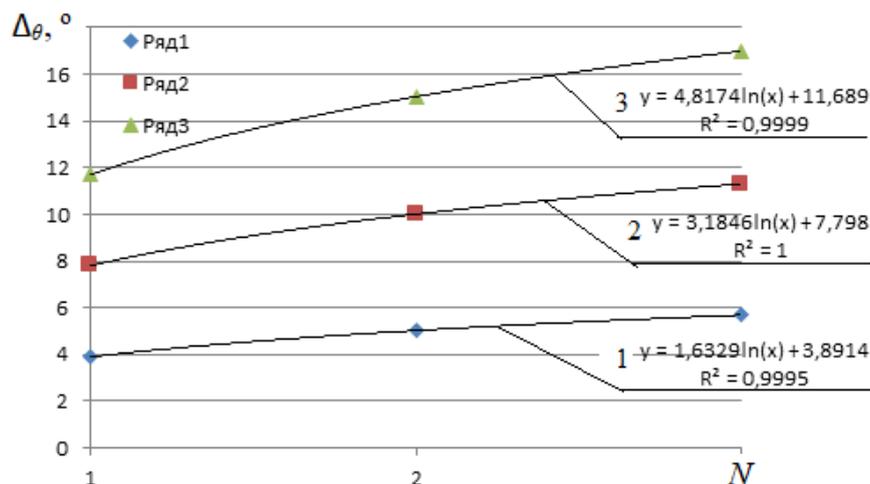


Рисунок 7. Зависимость размаха углового параметра от количества циклов для трёх категорий условий изменчивости геотехнических условий выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ: 1 — I; 2 — II; 3 — III [рисунок авторов]

Figure 7. Dependence of the angular parameter range on the number of cycles for three categories of conditions of variability of geotechnical conditions for logging or forestry work: 1 — I; 2 — II; 3 — III

Перечисленные технические мероприятия призваны существенно снизить величину давления на почвогрунт с уровней 30—50 до 10—20 кПа. Низкое давление на почвогрунт обусловит также и более низкие касательные сдвиговые напряжения τ , что способствует снижению угла маневрирования θ . Иными словами, снижение давления на почвогрунт является компенсаторным фактором отрицательных последствий от вынужденного маневрирования лесной машины или трелёвочной системы в границах трелёвочного волока (технологического коридора). При высоком уровне давления (до 30—35 кПа и более) в сложных условиях выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ необходимо снизить до минимума маневрирование движителя — движение машины галсами.

Этот вывод подтверждается данными рисунка 8, где на оси абсцисс — q , кПа, оси ординат — угол θ , ° при двух состояниях влажности почвогрунта: линия 1 — при $W = 36\%$ → к пределу текучести W_T , линия 2 — при $W = 27\%$ → к пределу пластичности W_{II} .

Сравнительный анализ полученных результатов свидетельствует о том, что оба параметра — влажность почвогрунта W и давление на него q — по мере роста своих значений существенно влияют на угол вынужденного маневрирования, причём при W более 35% и давлении q свыше 25 кПа маневрирование желательно минимизировать до углов поворота не более 5°. Тогда как при умеренной влажности даже применение колёсных движителей с давлением свыше 27 кПа допускает маневрирование с углами поворота до 20—30°.

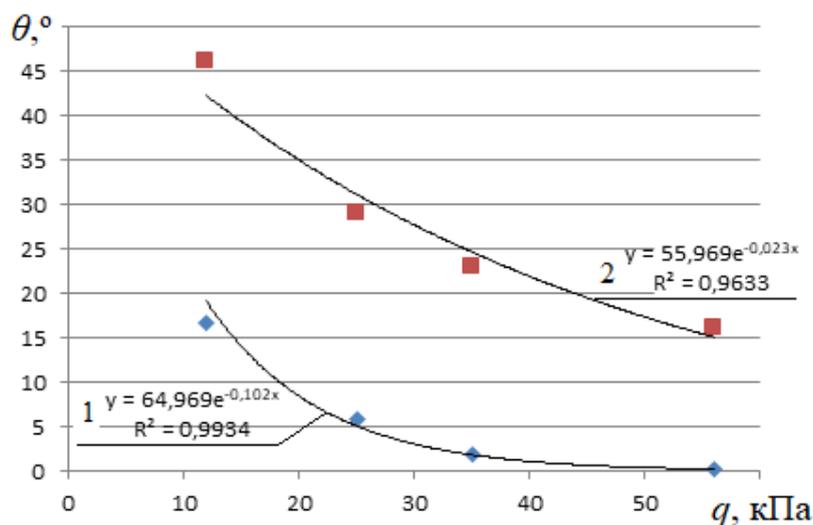


Рисунок 8. Влияние давления движителя на почвогрунт на процесс маневрирования в различных состояниях влажности почвогрунта: 1 — при $W = 36\%$ → к пределу текучести W_T ; 2 — при $W = 27\%$ → к пределу пластичности W_{II} [рисунок авторов]

Figure 8. The effect of the propulsor pressure on the soil on the maneuvering process in various soil moisture conditions: 1 — at $W = 36\%$ → to the yield strength of W_T ; 2 — at $W = 27\%$ → to the ductility limit of W_{II}

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, проектирование сети трелёвочных волоков и/или технологических коридоров на участках с высокой влажностью и низкой несущей способностью почвогрунтов целесообразно осуществлять преимущественно по прямым участкам при минимальных отклонениях от заданного направления движения. В первую очередь это относится к работам на нижних участках склонов оттаивающих почвогрунтов на многолетней мерзлоте, вблизи их подошв.

Результаты выполненных исследований позволяют заключить, что при циклических нагрузках на краевую часть массива оттаивающего почвогрунта на склонах на многолетней мерзлоте с высоким показателем влажности при выборе трасс движения лесных машин и трелёвочных систем на их базе и вида движителя с заданной нагрузкой на почвогрунт необходимо давать прогнозную оценку как абсолютных значений углов маневрирования, так и допустимых диапазонов их изменения в конкретных геотехнических условиях выполнения лесосечных или лесохозяйственных работ.

Это позволит повысить работоспособность сети трелёвочных волоков (технологических коридоров), оптимизировать трассы движения лесных машин и трелёвочных систем и снизить отрицательные последствия их воздействия на корневую систему подроста и оставляемых на доращивание деревьев.

Работа выполнена в рамках деятельности научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Список литературы

1. Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на производительность форвардера / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просужих, Е. Г. Хитров [и др.] // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2021. № 1. С. 3—16.
2. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просужих, Е. Г. Хитров [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2021. № 3 (381). С. 101—116.
3. *Никитина Е. И., Куницкая О. А., Николаева Ф. В.* Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // *Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2020» (29—30 сент. 2020 г., Якутск) и Междунар. науч. онлайн летней школы — 2020 (6—20 июля 2020 г., Якутск)*. Ставрополь, 2020. С. 138—148.
4. *Куницкая О. А., Никитина Е. И., Николаева Ф. В.* Особенности лесозаготовки в Республике Саха Якутия // *Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий*. Якутск, 2021. С. 308—313.
5. *Рудов С. Е., Куницкая О. А.* Теоретические исследования экологической совместимости колёсных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // *Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф.* / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 323—326.
6. *Куницкая О. А., Никитина Е. И.* Экологические аспекты выборочных рубок леса // *Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации: Сб. ст. III Междунар. научно-техн. конф. «Минские научные чтения — 2020»: В 3 т. / Белорус. гос. технол. ун-т, Представительство Федер. агентства по делам СНГ, соотечественников, проживающих за рубежом, и по междунар. гуманитар. сотрудничеству (Россотрудничество) в Республике Беларусь*. Минск, 2021. С. 286—291.
7. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек / В. А. Каляшов, А. До Туан, Е. Г. Хитров [и др.] // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19, № 2. С. 1—47.
8. *Рудов С. Е., Григорьева О. И., Григорьев И. В.* Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием)*. Минск, 2022. С. 38—41.
9. *Григорьева О. И.* Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 25—29.

10. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию / А. И. Никифорова, Е. Г. Хитров, А. А. Пелымский [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2 (139). С. 87—91.
11. *Никифорова А. И., Григорьева О. И.* Моделирование воздействия двигателей лесных машин на почвы лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4 (16-4). С. 320—323.
12. Оценка экологической безопасности работы лесных машин / А. И. Никифорова, О. И. Григорьева, Д. С. Киселев [и др.] // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: Материалы Междунар. научно-практич. форума. Хабаровск, 2013. С. 134—138.
13. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East / P. B. Ryabukhin, O. A. Kunitskaya, A. M. Burgonutdinov [et al.] // Forest Science and Technology. 2022. Vol. 18, no. 4. P. 190—200.
14. *Рябухин П. Б., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 2 (392). С. 88—105.
15. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Свердловской области / Э. Ф. Герц, О. А. Куницкая, В. А. Макуев [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 1. С. 52—63.
16. Forest preservation techniques in the Urals / E. F. Gerts, O. A. Kunitskaya, E. M. Runova [et al.] // International Journal of Environmental Studies. 2023. Vol. 80, no. 4. P. 1055—1064.
17. *Rego G. E., Voronov R. V., Grigoreva O. I.* Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Series «II All-Russian Scientific-Technical Conference "Digital Technologies in Forest Sector"». IOP Publishing Ltd., 2021. P. 012025.
18. *Бурмистрова О. Н., Тетеревлева Е. В., Куницкая О. А.* Моделирование взаимодействия колёсного двигателя сверхнизкого давления со слабонесущей опорной поверхностью // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4 (44). С. 95—101.
19. *Куницкая О. А., Щетнева Я. А.* Снижение экологического ущерба от работы лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Третьей Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2017. С. 140—143.
20. *Куницкая О. А., Просужих А. А., Каляшов В. А.* Эколого-экономическая эффективность эксплуатации форвардеров // Вестник АГАТУ. 2021. № 2 (2). С. 44—53.
21. *Каляшов В. А., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Современные технологии и системы машин для заготовки древесины на склонах // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 46—49.
22. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелёвочного волока с учётом изменчивости трассы движения / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Д. В. Лепилин [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6 (111). С. 61—64.
23. Исследование процесса разрушения мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелёвочной системы / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 2 (374). С. 101—117.
24. Особенности учёта состояния массива мёрзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелёвочной системой // С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 1 (33). С. 116—128.

25. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 6 (384). С. 121—134.
26. Вернер Н. Н., Швецова В. В. Оценка надёжности лесозаготовительного харвестера / А. П. Мохирев, О. А. Куницкая, Г. А. Калита [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 5. С. 93—101.

References

1. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Kalita O. N. Influence of variable coefficients of motion resistance and adhesion on forwarder performance. *The woodworking industry*, 2021, no. 1, pp. 3—16. (In Russ.)
2. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G., Kunitskaya O. A., Luneva E. N. Theoretical studies of forwarders' productivity under restrictions of impact on soils. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2021, no. 3 (381), pp. 101—116. (In Russ.)
3. Nikitina E. I., Kunitskaya O. A., Nikolaeva F. V. A project for the organization of logging in the conditions of the Aldan forestry using multi-operational logging complexes. *Modern problems and achievements of agricultural science in the Arctic: Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Student Scientific and Practical Conference with international participation within the framework of the Northern Forum 2020 (September 29—30, 2020, Yakutsk) and the International Scientific Online Summer School 2020 (July 6—20, 2020, Yakutsk)*. Stavropol, 2020, pp. 138—148. (In Russ.)
4. Kunitskaya O. A., Nikitina E. I., Nikolaeva F. V. Features of logging in the Republic of Sakha Yakutia. *Land management, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects of development: Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 255th anniversary of the Land Management of Yakutia and the Year of Science and Technology*. Yakutsk, 2021, pp. 308—313. (In Russ.)
5. Rudov S. E., Kunitskaya O. A. Theoretical studies of the ecological compatibility of wheeled forest vehicles and permafrost soils of cryolithozone forests. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Editor-in-chief N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 323—326. (In Russ.)
6. Kunitskaya O. A., Nikitina E. I. Ecological aspects of selective logging. *Ecological, economic and technological aspects of sustainable development of the Republic of Belarus and the Russian Federation: Collection of articles of the III International Scientific and Technical Conference «Minsk Scientific Readings 2020»: In 3 volumes. Belarusian State Technological University, Representative Office of the Federal Agency for CIS Affairs, Compatriots Living Abroad, and International Humanitarian Cooperation (Rossotrudnichestvo) in the Republic of Belarus*. Minsk, 2021, pp. 286—291. (In Russ.)
7. Kalyashov V. A., Do Tuan A., Khitrov E. G., Grigoreva O. I., Guryev A. Yu., Novgorodov D. V. Modern machine systems and technologies for harvesting wood and reforestation in mountain logging areas. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1—47. (In Russ.)
8. Rudov S. E., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Effective restoration of forests on permafrost. *Forest engineering, materials science and design. Proceedings of the 86th Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 38—41. (In Russ.)

9. Grigoreva O. I. Features of natural reforestation in cryolithozone conditions. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 25—29. (In Russ.)
10. Nikiforova A. I., Khitrov E. G., Pelymsky A. A., Grigoreva O. I. Determination of precipitation during movement of a logging machine on a two-layer base. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2014, no. 2 (139), pp. 87—91. (In Russ.)
11. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Modeling of the impact of forest machinery propellers on the soils of logging areas. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 5-4 (16-4), pp. 320—323. (In Russ.)
12. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kiselev D. S., Khakhina A. M., Rudov M. E. Environmental safety assessment of forest machinery. *Natural resources and ecology of the Far Eastern region: Materials of the International Scientific and Practical Forum*. Khabarovsk, 2013, pp. 134—138. (In Russ.)
13. Ryabukhin P. B., Kunitskaya O. A., Burgonutdinov A. M., Makuev V. A., Sivtseva T. V., Zadrauskaite N. O., Gerts E. F., Markov O. B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East. *Forest Science and Technology*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 190—200.
14. Ryabukhin P. B., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Substantiation of technological processes and systems of machines for logging operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine*, 2023, no. 2 (392), pp. 88—105. (In Russ.)
15. Hertz E. F., Kunitskaya O. A., Makuyev V. A., Dmitriev A. S., Tikhonov E. A., Grigorieva O. I. Environment-sparing technologies for cutting areas in the Sverdlovsk region. *The woodworking industry*, 2023, no. 1, pp. 52—63. (In Russ.)
16. Gerts E. F., Kunitskaya O. A., Runova E. M., Tikhonov E. A., Timokhov R. S., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P. N. Forest conservation techniques in the Urals. *International Journal of Environmental Studies*, 2023, vol. 80, no. 4, pp. 1055—1064.
17. Rego G. E., Voronov R. V., Grigoreva O. I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Series «II All-Russian Scientific-Technical Conference "Digital Technologies in Forest Sector"»*. IOP Publishing Ltd., 2021, p. 012025.
18. Burmistrova O. N., Teterevleva E. V., Kunitskaya O. A. Modeling the interaction of an ultra-low pressure wheeled propulsion system with a low-bearing support surface. *Systems. Methods. Technologies*, 2019, no. 4 (44), pp. 95—101. (In Russ.)
19. Kunitskaya O. A., Shchetneva Ya. A. Reducing environmental damage from the operation of forest machinery. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the third All-Russian Scientific and Practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2017, pp. 140—143. (In Russ.)
20. Kunitskaya O. A., Prosuzhikh A. A., Kalyashov V. A. Ecological and economic efficiency of forwarder operation. *Bulletin of AGATU*, 2021, no. 2 (2), pp. 44—53. (In Russ.)
21. Kalyashov V. A., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Modern technologies and systems of machines for harvesting wood on slopes. *Forest engineering, materials science and design: Proceedings of the 86th Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 46—49. (In Russ.)
22. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Lepilin D. V., Zhukova A. I. Modeling soil compaction in the lateral lanes of a skidding portage, taking into account the variability of the route. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2010, no. 6 (111), pp. 61—64. (In Russ.)
23. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Investigation of the process of destruction of frozen and thawing soils under the influence of a skidding

- system. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2020, no. 2 (374), pp. 101—117. (In Russ.)
24. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Puchnin A. N. Features of accounting for the state of a frozen soil mass during cyclic interaction with a skidding system. *Lesotechnical journal*, 2019, vol. 9, no. 1 (33), pp. 116—128. (In Russ.)
25. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorieva O. I. Modeling the interaction of forest machines with soil when working on slopes. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2021, no. 6 (384), pp. 121—134. (In Russ.)
26. Mohirev A. P., Kunitskaya O. A., Kalita G. A., Werner N. N., Shvetsova V. V. Evaluation of the reliability of a logging harvester. *Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93—101. (In Russ.)

© Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Новиков М. С., Перфильев П. Н.,
Друзьянова В. П., Макуев В. А., 2025