

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8903

УДК 630.36

Статья

Взаимодействие колёсного движителя с почвогрунтом на склоне, с учётом эффекта буксования

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

Федоров Валерий Иннокентьевич

доктор биологических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), vfedorov_09@mail.ru

Задраускайте Наталья Олеговна

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

Египко Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент, Донской государственный аграрный университет (Российская Федерация), egipko_s@mail.ru

Дьячковский Дмитрий Александрович

аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ntobumdrevprom@mail.ru

Получена: 12 августа 2025 / Принята: 3 сентября 2025 / Опубликовано: 29 сентября 2025

Аннотация: Как и у любого технического решения, у колёсных лесных машин, по сравнению с гусеничными машинами, есть свои преимущества и недостатки. К основным преимуществам, обычно, принято относить меньшую массу, большие рабочие скорости. К основным недостаткам колёсных лесных машин часто относят худшую проходимость, связанную в т. ч. и с повышенным буксованием, по сравнению с гусеничными машинами. В статье показано, что для снижения

негативного влияния пробуксовки колёсного движителя на процесс обеспечения эффективных тягово-цепных свойств движителя при работе в сложных геотехнических условиях на покатых, крутых и очень крутых склонах, с учётом категории влажности и прочности слагающих их почвогрунтов, необходимо выполнение ряда организационно-технических мероприятий, в т. ч. необходимо районировать участки склонов и устанавливать категории состояния почвогрунтов, слагающих склон, с целью определения показателей их влажности, прочностных, деформационных и упругопластических характеристик; устанавливать предельные нагрузки на почвогрунт в соответствии с категорией его влажности, параметрами паспорта прочности и показателем несущей способности; в сложных геотехнических условиях выполнения лесосечных и лесохозяйственных работ на покатых, крутых и очень крутых склонах, сложенных почвогрунтами II—IV категорий, при появлении эффекта пробуксовки движителя колёсной лесной машины следует оснащать её задний колёсный мост моногусеницами, а передний мост — цепями противоскольжения.

Ключевые слова: колёсные лесные машины; леса на склонах; лесные машины; деформация почвогрунта; колееобразование

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8903

Article

Interaction of the wheel propulsion system with the soil on the slope, taking into account the effect of skidding

Vladimir Shapiro

D. Sc. in engineering, professor, Saint Petersburg State Forest Engineering 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

Valery Fedorov

D. Sc. in biology, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), vfedorov_09@mail.ru

Natalia Zadrauskaite

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

Sergey Egypko

Ph. D. in engineering, associate professor, Don State Agrarian University (Russian Federation), egypko_s@mail.ru

Dmitry Dyachkovsky

Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ntobumdrevprom@mail.ru

Received: 12 August 2025 / Accepted: 3 September 2025 / Published: 29 September 2025

Abstract: Wheeled forest vehicles have their advantages and disadvantages compared to tracked vehicles. The main advantages are usually attributed to lower weight and higher operating speeds. The main disadvantages of wheeled forest vehicles often include worse cross-country ability, which is associated, specifically with increased skidding compared with tracked vehicles. The article shows that to reduce the negative impact of wheel propulsion system to ensure its effective traction properties when operating in difficult geotechnical conditions on sloping, steep and very steep slopes, taking into account the moisture category and the strength of their constituent soils, it is

necessary to take a number of organizational and technical measures. These measures may include zoning the slopes and establishing the categories of soil conditions composing the slope to determine their moisture, strength, deformation and elastoplastic characteristics. Maximum loads on the soil should be set in accordance with the category of its moisture, the parameters of the strength passport and the load-bearing capacity index. In difficult geotechnical conditions of logging and forestry work on sloping, steep and very steep slopes composed of soils of II—IV categories, when a wheeled forestry machine propulsion system may skid its rear wheel axle should be equipped with mono-tracks, and the front axle with antiskid chagreen.

Keywords: wheeled forestry machines; forests on slopes; forestry machines; soil deformation; track formation

1. Введение

Эффективность и безопасность осуществления лесосечных и лесохозяйственных работ во многом зависит от оптимальности выбора системы машин и технологического процесса, которые отражаются, например, в технологической карте на разработку лесосеки, проекте лесовосстановления и т. п. [1—4]. Начиная со второй половины 90-х гг. XX в. в Российской Федерации наблюдается значительный рост доли колёсных лесных машин, в основном импортного производства. После развала основных российских заводов лесного машиностроения — Онежского тракторного завода и Алтайского тракторного завода, который пришёлся на начало второго десятилетия XXI в., выбывающие ввиду естественного износа отечественные гусеничные лесные машины начали практически на 100 % заменяться на иностранные, в подавляющем большинстве случаев колёсные [5].

В классификации природно-производственных условий осуществления основных лесосечных работ, в особенности тракторной трелёвки, а также ряда лесохозяйственных работ уклоны местности принято классифицировать на четыре категории: I — пологие, с углом наклона α к линии горизонта до 10° , II — покатые, $\alpha = 10\text{—}20^\circ$, III — крутые, $\alpha = 21\text{—}30^\circ$ и IV — очень крутые, с углом α более 30° [4], [6—10].

В том случае, если геотехнические условия работы лесных машин характеризуются как сложные, в первую очередь вследствие высокой влажности почвогрунта и низких показателей его прочностных свойств, перемещение лесных машин, трелёвочных систем и машинно-тракторных агрегатов на склонах любой категории может сопровождаться проявлением эффекта пробуксовки и соответствующим снижением тягово-сцепных свойств [6—10], что особенно актуально для лесных машин с колёсным двигателем [11] при их взаимодействии с краевой частью поверхности трелёвочного волока или технологического коридора.

Отрицательные последствия этого явления заключаются в разрушении и срезе верхнего слоя почвогрунта, снижении работоспособности трассы движения и безопасности работ, что ухудшает в целом условия работы лесных машин [12—15].

Цель данной работы: обоснование необходимости выполнения ряда организационно-технических мероприятий при выполнении лесосечных и лесохозяйственных работ колёсными лесными машинами на склонах.

2. Материалы и методы

Использованы справочные данные о физико-механических свойствах почвогрунтов. Расчёты выполнены на основе механики разрушений. Использованы методы аппроксимации численных данных.

Сила тяги F_T колёсного двигателя, обеспечивающая его тягово-сцепные свойства при работе на склоне, зависит от величины предела прочности почвогрунта τ на сдвиг (срез)

[4—6], которая может быть определена по ГОСТу [16], где паспорт прочности грунта представлен двумя параметрами: величиной сцепления C и углом внутреннего трения ϕ .

Ещё одной характеристикой прочности почвогрунта в контексте перемещения лесных машин, трелёвочных систем и машинно-тракторных агрегатов является величина его несущей способности p_s , от значений которой зависят состояние опорной поверхности волока (технологического коридора) и глубина проникновения разрушающих напряжений.

В механике контактного разрушения почвогрунтов под действием различных инденторов (штампов) [17], в т. ч. при взаимодействии с шиной лесной машины, процесс разрушения зависит от упругопластических свойств почвогрунта, в первую очередь от его модуля общей деформации E и коэффициента Пуассона ν .

Все отмеченные характеристики физико-механических свойств лесного почвогрунта существенно зависят от состояния его влажности W .

Обобщая практические данные [17—21], основываясь на методических положениях математических моделей разрушения почвогрунтов [22—24], произведена статистическая обработка показателей физико-механических свойств ряда почвогрунтов — супесей, суглинков и др. — в зависимости от состояния их влажности. В таблице 1 для суглинка представлены показатели математических ожиданий параметров C , ϕ , p_s , E и ν для четырёх состояний (категорий) почвогрунта по критерию его влажности.

Таблица 1. Показатели физико-механических свойств почвогрунта

Table 1. Indicators of physical and mechanical properties of the soil

Категория почвогрунта	W , %	Состояние почвогрунта	C , кПа	ϕ , °	p_s , кПа	E , кПа	ν
I	18	Сухой	18,1	24,2	86,9	3000	0,18
II	24	Увлажнённый	15,1	21,4	72,5	1000	0,24
III	32	Влажный	10,9	17,5	52,5	700	0,32
IV	41	Переувлажнённый	6,5	13,3	31,4	400	0,41

На основании данных таблицы 1 представляется возможным определить величину предела прочности почвогрунта на сдвиг τ :

$$T = C + ptg\phi, \quad (1)$$

где p — вертикальное давление лесной машины на почвогрунт.

В момент буксования величина τ является переменной величиной и представляет собой, как показано в исследованиях [25—27], функцию аргумента x — расстояния от передней кромки опорной поверхности шириной B и длиной L до зоны буксования, т. е.

$$\tau(x) = (C + ptg\phi)e^{-\mu x}, \quad (2)$$

где показатель степени экспоненты $\mu = \delta/\eta$ зависит от двух коэффициентов — буксования δ и деформации шины η .

В момент проявления эффекта пробуксовки максимальная касательная сила сдвига движителя F_c получает приращение ΔF_c , пропорциональное ширине опорной поверхности B , величине $\tau(x)$ и приращению аргумента Δx :

$$\Delta F_c = B \tau(x) \cdot \Delta x. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что дифференциал функции с точностью до бесконечно малых первого порядка является главной линейной частью приращения, приходим к дифференциальному уравнению

$$dF_c = B(C + \text{ptg}\varphi) e^{-\mu x} dx, \quad (4)$$

интегрирование которого в пределах от 0 до L позволяет оценить величину силы F_c как

$$F_c = \frac{B}{\mu} (C + \text{ptg}\varphi) (1 - e^{-\mu L}). \quad (5)$$

Для того чтобы гружёная колёсная лесная машина, трелёвочная система или машинно-тракторный агрегат на её базе с общим весом Q при буксовании на склоне с углом наклона α к линии горизонта обеспечивала тягово-цепные свойства в направлении движения к вершине склона, необходимо, чтобы величина силы F_c была не меньше суммы сил трения: $F_{mp} = \kappa_{mp} \cdot Q \cdot \cos\alpha$ и инерции: $F_u = Q \cdot \sin\alpha$, направленных в противоположном направлении к основанию склона.

Заметим, что коэффициент трения κ_{mp} шины зависит от влажности почвогрунта W и изменяется от $\kappa_{mp} = 0,6$ для сухого состояния почвогрунта, $\kappa_{mp} = 0,55$ и $0,45$ для почвогрунтов второй и третьей категорий до $\kappa_{mp} = 0,35$ для переувлажнённого состояния.

Таким образом, приходим к неравенству

$$\frac{B}{\mu} (C + \text{ptg}\varphi) (1 - e^{-\mu L}) \geq \kappa_{mp} \cdot Q \cdot \cos\alpha + Q \cdot \sin\alpha. \quad (6)$$

Разделив в соотношении (6) его обе части на $S = BL$ и выразив явно величину давления $p = Q/S$, получим уравнение для определения предельной (оценка сверху) величины давления p на почвогрунт, превышение которой приводит к утрате тягово-цепных свойств движителя с почвогрунтом при буксовании:

$$P = \frac{C}{\mu} \cdot \frac{1 - e^{-\mu L}}{(\kappa_{mp} \cos\alpha + \sin\alpha)L - \frac{\text{ptg}\varphi}{\mu}(1 - e^{-\mu L})}. \quad (7)$$

3. Результаты

Анализ соотношения (7) свидетельствует о том, что на предельную величину давления p оказывают влияние следующие факторы и геотехнические условия работы лесных машин, трелёвочных систем или машинно-тракторных агрегатов — угол наклона склона α , параметры паспорта прочности почвогрунта C и ϕ , зависящие от его влажности W , размеры

опорной поверхности B и L , а также три коэффициента — трения шины о почвогрунт κ_{mp} , её деформации η под нагрузкой и буксования δ .

Совокупный учёт перечисленных факторов при оценке величины допустимого давления p позволяет сделать вывод об адекватности предложенной математической модели расчётов.

Определив с помощью соотношения (7) допустимую величину p , представляется возможным её сравнить с исходным уровнем вертикального давления q , которое колёсная лесная машина оказывает на почвогрунт в пределах опорной поверхности при отсутствии буксования.

Если давление q превышает величину p , то можно сделать вывод о том, что в момент буксования возможна потеря движителем своих тягово-сцепных свойств с краевой частью массива почвогрунта. Для выявления этого состояния и его количественной оценки введём коэффициент $\lambda = q/p$ и критерий $\lambda \geq 1$.

В таблице 2 для суглинка различной категории состояния влажности и физико-механических свойств, приведённых в таблице 1, при работе колёсной лесной машины общим весом $Q = 17$ т на пологом склоне с углом наклона $\alpha = 5^\circ$ приведены расчётные значения предельно допустимого давления p и критерия λ . Расчёты выполнены при трёх показателях коэффициента буксования δ , соответствующих слабому, среднему и сильному уровню пробуксовки, и при коэффициенте деформации шины $\eta = 0,93$.

Таблица 2. Расчётные значения параметров давления колёсного движителя на почвогрунт и его прочности на сдвиг при буксовании

Table 2. Calculated values of the parameters of the wheel propulsion pressure on the soil base and its shear strength during skidding

Категория почвогрунта	p, кПа			λ		
	$\delta = 0,02$	$\delta = 0,12$	$\delta = 0,22$	$\delta = 0,02$	$\delta = 0,12$	$\delta = 0,22$
I	74,7	70,6	66,6	0,74	0,78	0,83
II	60,2	57,4	54,4	0,92	0,96	1,02
III	48,3	46,2	43,9	1,14	1,20	1,26
IV	32,1	30,9	29,5	1,72	1,78	1,87

Параметры пятна контакта определены в соответствии с результатами исследований [28]: $B = 0,73$ м, $L = 0,42$ м, $S = 0,3066$ м². Величина исходного давления q в этом случае, без учёта буксования, равна: $q = 55,24$ кПа.

Анализ данных таблицы 2 позволяет сделать ряд выводов:

- во-первых, при работе на сухих почвогрунтах I категории буксование не влияет на сохранение тягово-сцепных свойств движителя, а при работе на увлажнённых почвогрунтах II категории это свойство утрачивается только при сильной пробуксовке с показателем $\delta = 0,22$;

▪ во-вторых, на влажных и переувлажнённых почвогрунтах III и IV категорий перемещение лесной машины, трелёвочной системы или машинно-тракторного агрегата на её базе в данных геотехнических условиях осуществляется с нарушением тягово-цепных свойств колёсного движителя при любом уровне буксования, что регламентирует снижение нагрузки на почвогрунт либо за счёт веса технологического груза (например, трелюемой пачки лесоматериалов), либо путём увеличения площади опорной поверхности и снижения величины q .

Исследуем влияние веса Q (давления q) на критерий λ .

На рисунке 1 при работе колёсной лесной машины с коэффициентом буксования $\delta = 0,12$ на покатом склоне с углом наклона $\alpha = 15^\circ$ отражено влияние q , кПа на критерий λ для четырёх категорий влажности почвогрунта. Нумерация линий соответствует категории почвогрунта.

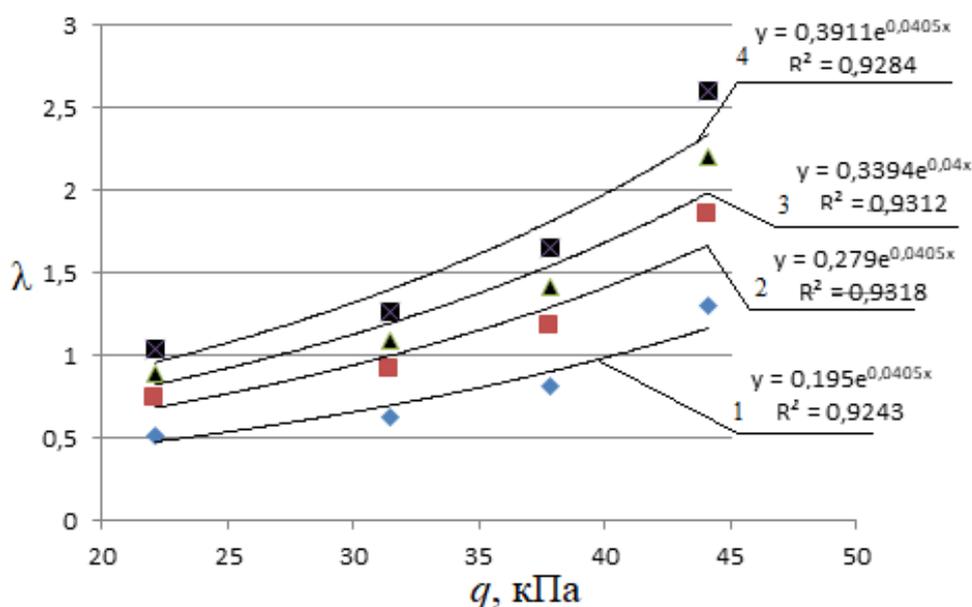


Рисунок 1. Влияние величины q на критерий λ : 1 — почвогрунт I категории; 2 — почвогрунт II категории; 3 — почвогрунт III категории; 4 — почвогрунт IV категории [рисунок авторов]

Figure 1. The effect of the q value on the λ criterion: 1 — soil base of category I; 2 — soil base of category II; 3 — soil base of category III; 4 — soil base of category IV

Как следует из анализа графических данных рисунка 1, зависимости $\lambda(q)$ с высокой степенью достоверности описываются экспоненциальными функциями с практически равными показателями степени, но различными множителями $\psi(W)$ при экспонентах:

$$\lambda = \psi(W)e^{0,0405q}. \quad (8)$$

Указанные функциональные множители $\psi(W)$ отражают степень потери тягово-цепных свойств колёсного движителя с грунтом по мере роста показателя его влажности W и соответствующего снижения прочностных характеристик.

Так, в диапазоне изменения $q = 20$ — 25 кПа критерий λ не превосходит 1 для всех категорий почвогрунта, тогда как при $q > 40$ кПа наблюдается противоположная ситуация — потеря тягово-цепных свойств колёсного движителя с почвогрунтом при работе в данных геотехнических условиях.

Определив с высоким коэффициентом детерминации 0,9925 уравнение для определения множителей $\psi(W)$

$$\psi(W) = 0,24 \ln W - 0,48 \quad (9)$$

и выразив затем явно с помощью (8) величину q , получим формулу для определения исходного давления на почвогрунт q в зависимости от влажности W , с учётом заданного критерия λ , зависящего от уровня буксования:

$$q = 24,7 \ln \frac{4,2\lambda}{\ln W - 2} \quad (10)$$

Задавшись в соотношении (10) верхней границей критерия $\lambda = 1$, отражающего состояние сохранения тягово-цепных свойств движителя с почвогрунтом, на рисунке 2 показано влияние влажности W , % и, соответственно, категории почвогрунта на величину q , кПа.

Данные рисунка 2 соответствуют работе колёсной лесной машины весом $Q = 17$ т на покатоном склоне с углом наклона $\alpha = 15^\circ$ при среднем уровне буксования с коэффициентом $\delta = 0,12$.

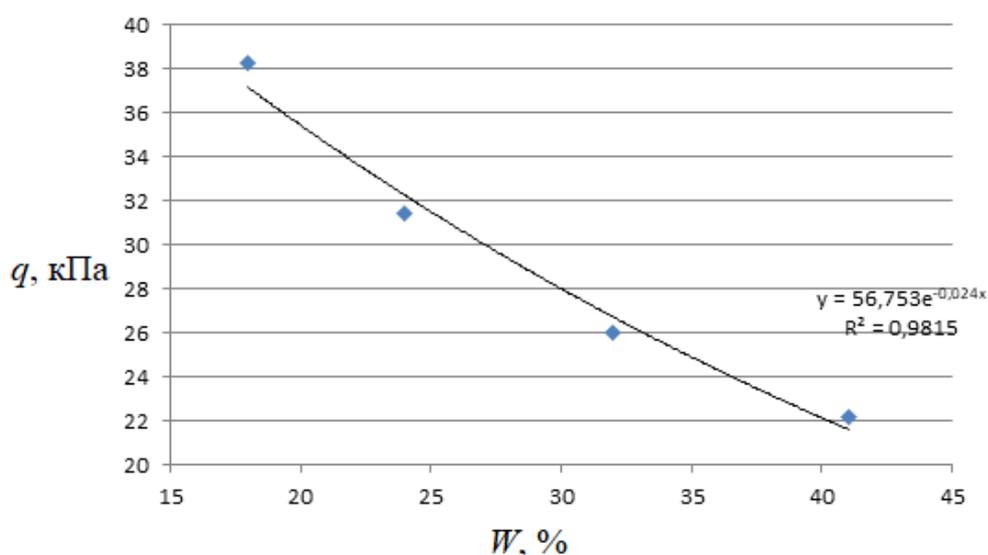


Рисунок 2. Зависимость величины предельного давления колёсной лесной машины на почвогрунт от состояния его влажности [рисунок авторов]

Figure 2. The dependence of the maximum pressure of a wheeled forestry machine on the soil according to the state of its moisture

Как следует из рисунка 2, при увеличении влажности с 18 % (сухой почвогрунт I категории) до 32 % (влажный почвогрунт III категории) необходимо снизить нагрузку от действия колёсного движителя лесной машины с 38 до 26 кПа.

Очевидно, что при других углах наклона α и ином уровне буксования числовые коэффициенты в соотношениях (8—10) будут иными, но характер зависимостей будет инвариантен относительно категориям почвогрунта.

Исследуем влияние параметров α и δ на величину λ .

На рисунке 3 представлена зависимость λ от коэффициента буксования δ при работе на покатоном склоне с углом наклона $\alpha = 10^\circ$, сложенном преимущественно влажным почвогрунтом III категории, когда давление колёсного движителя лесной машины на почвогрунт составляет: $q = 33$ кПа. Как видим из рисунка 3, получена линейная зависимость и для данных геотехнических условий лесной машины, трелёвочной системы или машинно-тракторного агрегата на её базе существует ограничение на интенсивность буксования ($\delta \leq 0,16$), при котором тягово-цепные свойства движителя с грунтом будут сохранены.

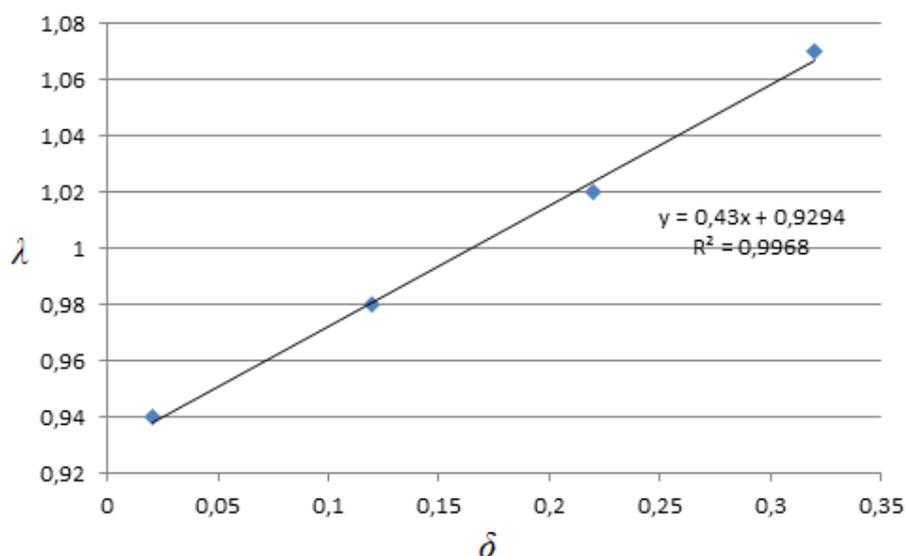


Рисунок 3. Влияние коэффициента буксования на критерий λ [рисунок авторов]

Figure 3. The effect of the slip coefficient on the criterion λ

Зафиксируем $\delta = 0,16$ и для почвогрунта данной категории установим (рисунок 4) влияние угла наклона склона α , ° на величину λ . Как следует из графических данных рисунка 4, сохранение тягово-цепных свойств колёсной лесной машины с почвогрунтом выполняется только при работе на пологих склонах с углами наклона не более 10° . При больших углах наклона критерий λ возрастает по логарифмическому закону, достигая значений 1,6, т. е. исходный уровень давления колёсного движителя на почвогрунт на крутых склонах на 60 % превышает предельно допустимый уровень.

Исследуем (рисунок 5) совместное влияние угла наклона склона α , ° и коэффициента буксования δ на снижение тягово-цепных свойств колёсной лесной машины, трелёвочной системы или машинно-тракторного агрегата на её базе весом $Q = 14$ т с почвогрунтом, выраженным критерием λ (ось аппликат). Расчёты выполнены для двух состояний влажности (категорий) почвогрунтов — сухого и влажного. Как следует из анализа графиков на рисунке 5 а, при работе колёсной лесной машины, трелёвочной системы или машинно-тракторного агрегата на её базе на пологих и отчасти покатых склонах сохраняются тягово-цепные свойства колёсного движителя с почвогрунтом при любом уровне буксования, и только при сочетании сильного буксования на покатых и крутых склонах указанные свойства утрачиваются. При этом величина q превосходит допустимый уровень давления p в среднем не более чем на 25 %.

При работе на влажных почвогрунтах III категории (рисунок 5 б) такое сохранение свойств колёсного движителя имеет место только на пологих склонах при условии, что коэффициент буксования не превышает значение $\delta = 0,12$, причём в остальных случаях критерий λ достигает значений 2—3, т. е. величина q может превысить допустимый уровень давления p в 2 раза и более.

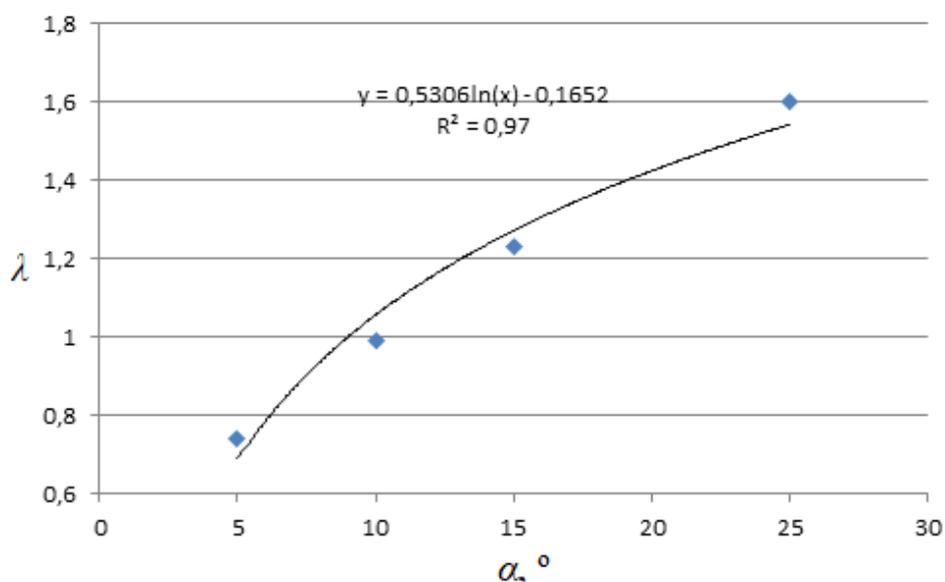


Рисунок 4. Влияние угла наклона склона на критерий λ [рисунок авторов]

Figure 4. The influence of the slope angle on the criterion λ

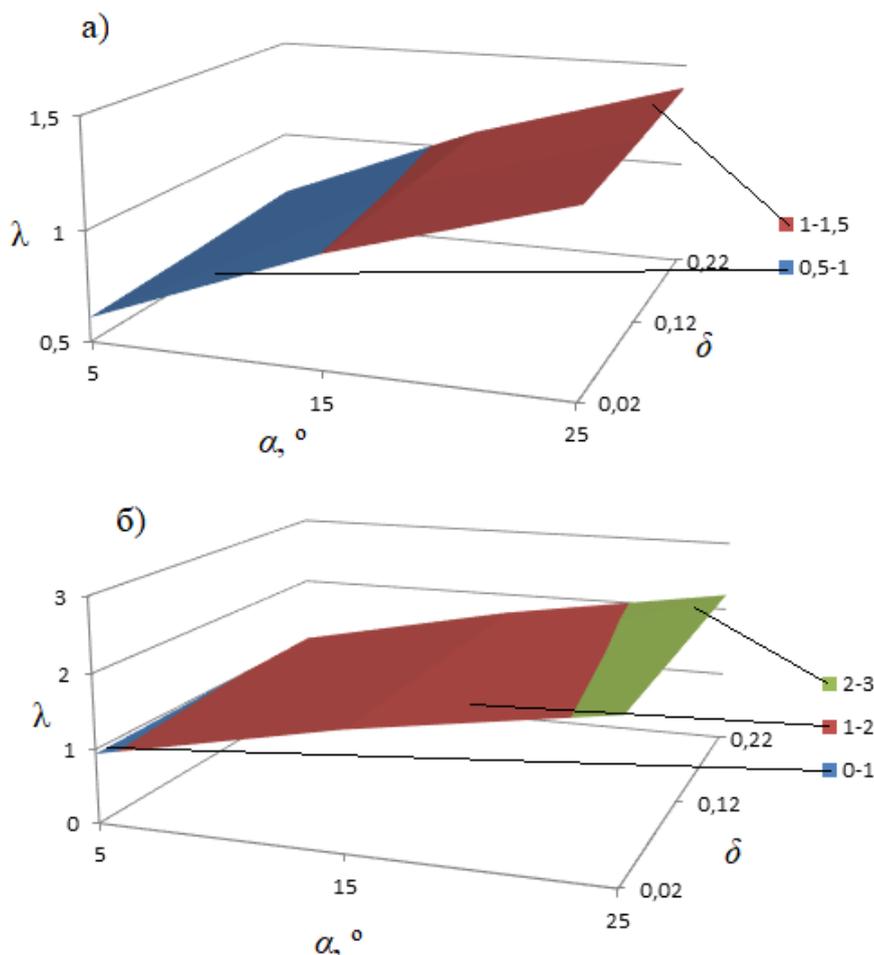


Рисунок 5. Совместное влияние угла наклона склона и коэффициента буксования на снижение тягово-цепных свойств колёсного движителя с почвогрунтом: *a* — почвогрунт сухой I категории; *б* — почвогрунт влажный III категории [рисунок авторов]

Figure 5. The combined effect of the slope angle and the slip coefficient on reducing the traction properties of a wheeled propulsor with soil: **(a)** dry soil of category I; **(b)** wet soil of category III

В этом случае на практике при таких нагрузках на почвогрунт и утрате с ним тягово-цепных свойств колёсного движителя лесной машины в момент пробуксовки возникают значительные касательные (горизонтальные) напряжения: $p_r = \gamma q$, где коэффициент бокового распора γ зависит от коэффициента Пуассона и равен: $\gamma = \nu/(1-\nu)$.

Оценки показывают, что для влажного почвогрунта III категории при $\nu = 0,32$ коэффициент $\gamma = 0,47$, т. е. даже при относительно невысоких нагрузках порядка $q = 40$ кПа горизонтальные напряжения, приводящие к срезу почвогрунта в момент буксования, достигают 24 кПа.

С учётом показателей параметра паспорта прочности почвогрунта (см. таблицу 1) для данной категории почвогрунтов предел прочности τ составляет: $\tau = 23,5$ кПа, т. е. почвогрунт будет разрушен механизмом сдвига.

В соответствии с моделями контактного разрушения почвогрунтов при сдвиговых нагрузках [29], [30] в этой ситуации будет образовываться колея, глубина которой во влажных почвогрунтах может достигать 0,2 м и более, что дополнительно снижает тягово-сцепные свойства и маневренность колёсной лесной машины на склоне.

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, в результате выполненных исследований разработана математическая модель, отражающая влияние основных геотехнических факторов работы колёсной лесной машины, трелёвочной системы или машинно-тракторного агрегата на её базе на сохранение (утрату) тягово-сцепных свойств колёсного движителя с почвогрунтом при перемещении вверх к вершине склона, с учётом эффекта буксования.

Выполненные на основе разработанной математической модели исследования показали, что для снижения негативного влияния пробуксовки колёсного движителя на процесс обеспечения эффективных тягово-сцепных свойств движителя при работе в сложных геотехнических условиях на покатых, крутых и очень крутых склонах, с учётом категории влажности и прочности слагающих их почвогрунтов, необходимо выполнение ряда организационно-технических мероприятий:

1. Оперативно районировать участки склонов и устанавливать категории состояния почвогрунтов [31], слагающих склон, с целью определения показателей их влажности, прочностных, деформационных и упругопластических характеристик.

2. Выбирать тип движителя лесных машин и устанавливать предельные нагрузки на почвогрунт в соответствии с категорией его влажности, параметрами паспорта прочности и показателем несущей способности.

3. В сложных геотехнических условиях выполнения лесосечных и лесохозяйственных работ на покатых, крутых и очень крутых склонах, сложенных почвогрунтами II—IV категорий, при появлении эффекта пробуксовки движителя колёсной лесной машины следует оснащать её задний колёсный мост моногусеницами, а передний мост — цепями противоскольжения.

Работа выполнена в рамках 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. Карпова Е. А., Григорьева О. И., Слепцова М. В. Пример организации охраны труда в свете требований лесной сертификации // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2025. № 1 (19). С. 9—26.
2. Обоснование вариантов проведения рубок обновления в природно-производственных условиях Республики Татарстан / О. И. Григорьева, А. В. Ерехинский, И. С. Должиков [и др.] // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2024. Т. 1. С. 118—124.
3. Результаты исследования контроля качества и эффективности проходных рубок и рубок прореживания по нормативам интенсивной модели лесного хозяйства в Ленинградской области / Г. А. Григорьев, О. И. Григорьева, И. С. Должиков [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 5 (17). С. 4—13.
4. Должиков И. С., Куницкая О. А., Швецов А. С. Актуальная типизация природно-производственных условий лесозаготовительного и лесохозяйственного производства // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 89-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2025. С. 121—124.
5. Проблемы повышения качества отечественного лесного машиностроения / О. А. Куницкая, В. А. Макуев, Т. Н. Стородубцева [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 57—63.
6. 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.
7. Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным движителем на почвогрунты на склонах / А. До Туан, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 4. С. 64—84.
8. Теоретические исследования влияния угла склона на несущую способность почвогрунта при работе лесных машин / А. До Туан, Н. И. Злобина В. А. Каляшов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 18—27.
9. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-цепными свойствами гусеничной машины, работающей на склоне / А. До Туан, Н. И. Злобина В. А. Каляшов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 3—12.
10. Оценка тягово-цепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне / А. До Туан, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 78—84.
11. Швецов А. С., Должиков И. С., Куницкая О. А. Энергетическая эффективность универсальных лесозаготовительных машин // Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса — 2025: Материалы междунар. науч. конф., посвящённой 95-летию ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова и 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Воронеж, 2025. С. 71—74.
12. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию / А. И. Никифорова, Е. Г. Хитров, А. А. Пельмский [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2 (139). С. 87—91.
13. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, О. И. Григорьева [и др.] // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности:

Материалы республикан. научно-практич. конф., посвящённой 75-летию ПетрГУ. Петрозаводск, 2015. С. 9—11.

14. *Никифорова А. И., Григорьева О. И.* Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4 (16-4). С. 320—323.
15. Оценка экологического ущерба, наносимого лесным почвогрунтам движителями лесных машин / А. А. Кривошеев, И. С. Должиков, В. М. Дьяченко [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2025. № 3 (21). С. 31—38.
16. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристики прочности методом одноплоскостного среза. М.: Стандартинформ, 2020. 20 с.
17. *Морозов Е. М., Зернин М. В.* Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 с.
18. *Агейкин А. С.* Вездеходные колёсные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
19. *Вялов С. С.* Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
20. *Калабина М. В., Царанов М. Н.* Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. М.: Изд-во МИИТ, 2017. С. 542—546.
21. *Царанов М. Н.* Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2007. № 6. С. 31—34.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Теория и методы воздействия техники и технологии на лесную среду в процессе лесовыращивания и заготовки древесного сырья: Учебное пособие для студентов по специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины по программе подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре» / М. В. Драпалюк, Е. Г. Хитров, О. А. Куницкая [и др.]. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. лесотехн. ун-та им. Г. Ф. Морозова, 2022. 210 с.
26. Показатели воздействия движителей лесных колёсных машин на почву / А. С. Федоренчик, А. В. Жуков, С. П. Мохов [и др.] // Леса Беларуси и их рациональное использование. Минск, 2000. С. 370—372.
27. *Жуков А. В., Федоренчик А. С., Клоков Д. В.* Воздействие движителей колёсных лесных машин на почву и показатели их проходимости // Труды БГТУ. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 1998. № 6. С. 11—17.
28. *Андронов А. В.* Исследование проходимости и обоснование параметров лесных машин для особо сложных грунтовых условий: Автореферат на соискание учёной степени доктора технических наук. СПб., 2025. 40 с.
29. *Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И.* Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2008. № 4. С. 45—51.

30. Исследование закономерностей разрушения грунта при работе комбинированных грунто-мётов для тушения лесных пожаров / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 146—151.
31. Методика и аппаратура экспериментальных исследований динамики температур слоёв лесного почвогрунта криолитозоны / М. С. Новиков, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Практические аспекты ведения хозяйства и использования лесов. Вологда, 2023. С. 142—147.

References

1. Karpova E. A., Grigorieva O. I., Sleptsova M. V. An example of the organization of labor protection in the light of the requirements of forest certification. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2025, no. 1 (19), pp. 9—26. (In Russ.)
2. Grigoreva O. I., Erekhinsky A. V., Dolzhikov I. S., Shvetsov A. S., Mikhailova L. M., Zhuk A. Yu. Substantiation of options for carrying out renovation logging in the natural and industrial conditions of the Republic of Tatarstan. *Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2024, vol. 1, pp. 118—124. (In Russ.)
3. Grigorev G. A., Grigoreva O. I., Dolzhikov I. S., Novgorodov D. V. Results of a study of quality control and efficiency of logging and thinning logging according to the standards of the intensive forestry model in the Leningrad region. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2024, no. 5 (17), pp. 4—13. (In Russ.)
4. Dolzhikov I. S., Kunitskaya O. A., Shvetsov A. S. Actual typification of natural and industrial conditions of logging and forestry production. *Forest engineering, materials science and design: Proceedings of the 89th Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and post-graduates (with international participation)*. Minsk, 2025, pp. 121—124. (In Russ.)
5. Kunitskaya O. A., Makuev V. A., Storodubtseva T. N., Kalita G. A., Revyako S. I., Timokhov R. S. Problems of improving the quality of domestic forestry engineering. *System. Methods. Technologies*, 2022, no. 4 (56), pp. 57—63. (In Russ.)
6. 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 cutting areas. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1—47. (In Russ.)
7. Do Tuan A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Methodology and results of experimental studies of the impact of forest vehicles with tracked propulsion on soils on slopes. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 64—84. (In Russ.)
8. Do Tuan A., Zlobina N. I., Kalyashov V. A., Guryev A. Yu., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Theoretical studies of the influence of slope angle on the bearing capacity of soil during operation of forest machinery. *The woodworking industry*, 2022, no. 2, pp. 18—27. (In Russ.)
9. Do Tuan A., Zlobina N. I., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Substantiation of technological parameters related to traction properties of a tracked vehicle operating on a slope. *The woodworking industry*, 2022, no. 2, pp. 3—12. (In Russ.)
10. Do Tuan A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Evaluation of traction properties of the propulsion of a forest tracked vehicle operating on a slope. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 78—84. (In Russ.)
11. Shvetsov A. S., Dolzhikov I. S., Kunitskaya O. A. Energy efficiency of universal logging machines. *Energy-saving and environmentally friendly technologies of the timber industry — 2025: Materials of the international scientific conference dedicated to the 95th*

- anniversary of the VGLTU named after G. F. Morozov and the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War.* Voronezh, 2025, pp. 71—74. (In Russ.)
12. Nikiforova A. I., Khitrov E. G., Pelymsky A. A., Grigoreva O. I. Determination of precipitation during the 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.)
 13. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Grigorieva O. I., Rudov M. E. Search for new technical solutions to improve the environmental compatibility of forest machinery with the forest environment. *Intensification of the formation and protection of intellectual property: Materials of the republican scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of PetrSU.* Petrozavodsk, 2015, pp. 9—11. (In Russ.)
 14. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Modeling of the impact of forest machinery propellers on the soils of cutting areas. *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.)
 15. Krivosheev A. A., Dolzhikov I. S., Dyachenko V. M., Grigorieva O. I., Novikov M. S., Guryev A. Yu. Assessment of environmental damage caused to forest soils by forest machinery propellers. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2025, no. 3 (21), pp. 31—38. (In Russ.)
 16. GOST 12248.1-2020. Soils. Determination of strength characteristics by the single-plane cut method. Moscow, Standartinform, 2020. 20 p. (In Russ.)
 17. Morozov E. M., Zernin M. V. *Contact problems of destruction mechanics.* Ed. 2. Moscow, Book House «LIBROCOM», 2010. 544 p. (In Russ.)
 18. Ageikin A. S. *All-terrain wheeled and combined propellers.* Moscow, Mechanical engineering, 1972. 184 p. (In Russ.)
 19. Vyalov S. S. *Rheological foundations of soil mechanics.* Moscow, Higher School, 1978. 447 p. (In Russ.)
 20. Kalabina M. V., Tsarapov M. N. Strength properties of thawing soils. *Current state, problems and prospects of development of branch science: Materials of the All-Russian Conference with international participation.* Moscow, MIIT Publishing House, 2017, pp. 542—546. (In Russ.)
 21. Tsarapov M. N. Formation of strength characteristics of soils during thawing. *Bulletin of the Moscow University. Series 4. Geology*, 2007, no. 6, pp. 31—34. (In Russ.)
 22. 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. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine*, 2020, no. 2 (374), pp. 101—117. (In Russ.)
 23. 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. *Forestry Engineering Journal*, 2019, vol. 9, no. 1 (33), pp. 116—112. (In Russ.)
 24. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Modeling the interaction of forest machines with soil when working on slopes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine*, 2021, no. 6 (384), pp. 121—134. (In Russ.)
 25. Drapalyuk M. V., Khitrov E. G., Kunitskaya O. A., Grigoriev I. V., Popikov P. I., Manukovsky A. Yu. *Theory and methods of the impact of machinery and technology on the forest environment in the process of reforestation and harvesting of wood raw materials: Textbook for students in the specialty 4.3.4. «Technologies, machines and equipment for forestry and wood processing according to the program of training scientific and scientific-pedagogical personnel in postgraduate studies».* Voronezh, Publishing House Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov, 2022. 210 p. (In Russ.)

26. Fedorenchik A. S., Zhukov A. V., Mokhov S. P., Loy V. G., Protas P. A. Indicators of the impact of forest wheeled vehicles on the soil. *Forests of Belarus and their rational use*. Minsk, 2000, pp. 370—372. (In Russ.)
27. Zhukov A. V., Fedorenchik A. S., Klokov D. V. The effect of propellers of wheeled forest vehicles on the soil and their permeability. *Proceedings of BSTU. Series 2. Forestry and wood-working industry*, 1998, no. 6, pp. 11—17. (In Russ.)
28. Andronov A. V. *Investigation of the patency and justification of the parameters of forest vehicles for particularly difficult ground conditions: Abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Saint Petersburg, 2025. 40 p. (In Russ.)
29. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Zhukova A. I. Evaluation of soil deformation processes during cyclic compaction. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine*, 2008, no. 4, pp. 45—51. (In Russ.)
30. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Ivanov V. A. Investigation of the patterns of soil destruction during the operation of combined ground mortars for extinguishing forest fires. *Systems. Methods. Technologies*, 2017, no. 1 (33), pp. 146—151. (In Russ.)
31. Novikov M. S., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Kalyashov V. A. Methods and equipment for experimental studies of temperature dynamics of forest soil layers of the cryolithozone. *Practical aspects of forest management and use*, 2023, pp. 142—147. (In Russ.)

© Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Федоров В. И., Задраускайте Н. О.,
Египко С. В., Дьячковский Д. А., 2025