



Влияние маневрирования движителя колесной лесной машины на ее проходимость в сложных геотехнических условиях

Владимир Я. Шапиро¹, shapiro54vlad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Игорь В. Григорьев², silver73@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Станислав И. Савченко³, savchenko.stas2020@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>

Евгений А. Тихонов⁴, tihonov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Сергей И. Ревяко⁵, revyako77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Павел Н. Перфильев⁶, p.perfilev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок, д. 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185035, Российская Федерация

⁵ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Пушкинская, д. 111, г. Новочеркасск, 346428, Российская Федерация

⁶ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

Проведенное исследование направлено на решение актуальной научно-практической проблемы эксплуатации лесозаготовительной техники на переувлажненных почвах, которые характерны для более чем 60% территории лесного фонда Российской Федерации. Разработана комплексная математическая модель формирования касательных напряжений в грунтовом массиве при маневрировании движителя с учетом ключевых параметров: угла поворота θ , веса машины и физико-механических свойств грунта.

В ходе исследования установлены новые критерии эффективности сдвига межколейного массива грунта, основанные на аналитическом соотношении импульсов силы сдвига и массы сдвигаемого грунта. Проведенный численный анализ демонстрирует, что целенаправленное маневрирование с углами поворота 15-20° и более позволяет обеспечить эффективное разрушение межколейного пространства даже при критической влажности грунта до 35%.

Особое внимание уделено анализу циклического воздействия техники на грунт при многократных проходах. Разработаны практические рекомендации по оптимизации режимов работы операторов лесных машин, включая выбор углов маневрирования и траекторий движения в зависимости от влажности грунта и числа проходов.

Полученные результаты имеют значительную практическую ценность для лесозаготовительной отрасли, позволяя снизить экологический ущерб от повреждения почвенного покрова на 20-25% и повысить эксплуатационную эффективность техники на 15-20% за счет сокращения простоев и увеличения межремонтных периодов эксплуатации.

Ключевые слова: лесные машины, маневрирование лесных машин, деформация почвогрунта, образование колеи, геотехнические условия

Финансирование: материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние маневрирования движителя колесной лесной машины на ее проходимость в сложных геотехнических условиях / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, С. И. Савченко, Е. А. Тихонов, С. И. Ревяко, П. Н. Перфильев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 228–244. – Библиогр.: с. 241–243 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/15>



Поступила 14.02.2025 *Пересмотрена* 22.06.2025 *Принята* 15.09.2025 *Опубликована онлайн* 25.09.2025

Article

The effect of maneuvering the propulsion of a wheeled forestry vehicle on its maneuverability in difficult geotechnical conditions

Vladimir Ya. Shapiro¹, shapiro54vlad@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Igor V. Grigorev², silver73@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Stanislav I. Savchenko³,  savchenko.stas2020@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>

Evgeny A. Tikhonov⁴, tikhonov@petrsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Sergey I. Revyako⁵, revyako77@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Pavel N. Perfiliev⁶, p.perfilev@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Institutsky Lane, 5, 194021, Russian Federation

² Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, 677007, Russian Federation

³ Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, Timiryazev str., 8, 394087, Russian Federation

⁴ Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185035, Russian Federation

⁵ Novochoerkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov is a branch of the Don State Agrarian University, 111 Pushkinskaya str., Novochoerkassk, 346428, Russian Federation

⁶ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

The conducted research is aimed at solving the urgent scientific and practical problem of the operation of logging equipment on waterlogged soils, which are typical for more than 60% of the territory of the forest fund of the Russian Federation. A complex mathematical model has been developed for the formation of tangential stresses in a soil mass during propulsion maneuvering, taking into account key parameters: the angle of rotation, the weight of the machine, and the physical and mechanical properties of the soil.

In the course of the study, new criteria for the effectiveness of shifting the inter-track mass of soil were established, based on the analytical ratio of the shear force pulses and the mass of the shifted soil. The numerical analysis

demonstrates that targeted maneuvering with rotation angles of 15-20° or more makes it possible to ensure effective destruction of the inter-track space even at critical ground humidity up to 35%.

Special attention is paid to the analysis of the cyclic effect of machinery on the ground during multiple passes. Practical recommendations have been developed to optimize the operating modes of forest machinery operators, including the choice of maneuvering angles and driving trajectories depending on soil moisture and the number of passes.

The results obtained have significant practical value for the logging industry, making it possible to reduce environmental damage from soil cover damage by 20-25% and increase the operational efficiency of machinery by 15-20% by reducing downtime and increasing maintenance periods.

Keywords: *forest machinery, maneuvering of forest machinery, soil deformation, track formation, geotechnical conditions*

Funding: The research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

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

For citation: Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Savchenko S. I., Tikhonov E. A., Revyako S. I., Perfiliev P. N. (2025). The effect of maneuvering the propulsion of a wheeled forestry vehicle on its maneuverability in difficult geotechnical conditions. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 228-244 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/15>

Received 14.02.2025 Revised 22.06.2025 Accepted 03.09.2025 Published online 25.09.2025

Введение

Быстрое и эффективное управление лесами при заготовке древесины в больших объемах требует использования лесозаготовительных транспортных средств, таких как трелевочные тракторы, харвестеры и форвардеры [1-3]. Эксплуатация лесозаготовительной техники на переувлажненных почвах представляет серьезную научно-практическую проблему для лесного комплекса РФ. Более 60 % территории лесного фонда Российской Федерации находится на почвогрунтах III и IV категории. Движение транспортной техники затрагивает от 10 до 70 % вырубленной площади, что может нанести за собой огромный риск повреждения лесной почвы и экосистемы в целом [3-7].

Почвы, характеризующиеся низкой несущей способностью и высокой влажностью $W > 30\%$, широко распространены в северных и заболоченных регионах, занимающих значительные площади лесфонда РФ. При росте эффективности и производительности тяжелых колесных машин на территориях с переувлажненной почвой неизбежно приводит к деформации и уплотнению грунта. Последствиями работы техники в таких условиях является

снижение продуктивности лесных участков при последующем лесовосстановлении, деградация почвенных экосистем, потеря эксплуатационных показателей (снижение проходимости техники) [8-12].

Уплотнение почвы приводит к образованию колеи, смешивая почвенные горизонты, растительность, порубочных остатков. При высокой влажности почвы $W > 30\%$, глубина колеи может достигать 0,3 – 0,5 м, и более, затрудняя работы техники. Степень и масштаб образования колеи во время механизированных лесозаготовительных операциях часто зависит от типа и характеристик систем заготовок, количества проходов машин, уклона местности, типа почвы [12-14].

Проблема минимизации ущерба почвогрунтам при лесозаготовках активно исследуется. Основные подходы включают оптимизацию конструкции движителей, использование гусениц, или снегоходов, сезонное ограничение работ и применение технологий с малой площадью контакта [14-17].

Вопрос маневрирования движителя на переувлажнённых почвах изучен недостаточно. Существующие модели взаимодействия «движитель-

грунт» фокусируются преимущественно на прямолинейном движении и на начальном этапе деформации. В работе *Laschi A* были проанализированы экологические последствия лесозаготовок в кустарниковых насаждениях Италии. Было показано, что при влажности почвы 28-32% использование шин низкого давления снижает глубину колеи на 18%, но не предотвращает образование межколейного пространства. Автор отметил необходимость разработки методов активного управления деформациями путем изменения траектории движения, количественных моделей предложено не было [16]. Исследования *Naghdi R* выявили снижение уплотнения почвы на 15 % при зигзагообразном движении на склон, однако эксперимент проводится на грунтах с влажностью почвы менее 25 %, где проблема межколейного выступа не актуальны [17]. Теоретический анализ Анисимова Г. М. показал снижение среднего контактного давления при криволинейном движении, но в работе не были рассмотрены касательные напряжения сдвига $\tau_{r\theta}$, ключевые для разрушения выступа [24]. При анализе литературы были сделаны выводы о недостатке исследований количественных критериев эффективности различных видов маневрирования для сдвига межколейного пространства.

Целью исследования является разработка теоретических обоснованных рекомендаций по повышению проходимости колесных лесных машин на переувлажненных грунтах за счет оптимизации режимов маневрирования движителя, направленных на разрушение межколейного пространства и продления срока службы трелевочных волоков.

Для достижения цели были поставлены задачи по разработке математической модели формирования касательных напряжений в массиве грунта при маневрировании движителя с учетом угла поворота θ , веса машины и свойств грунта. Установлены критерии эффективности сдвига межколейного массива грунта, основаны на соотношении импульсов силы сдвига и массы сдвигаемого грунта. Проведен численный анализ влияния параметров на глубину колеи h_k и выполнения критерия сдвига. Определен оптимальный диапазон углов маневрирования θ обеспечивающий эффективное разрушение межколейного пространства.

Полученные результаты позволяют научно обосновать рекомендации для операторов лесных машин по выбору маневрирования при работе на переувлажненных грунтах. Результаты помогут снизить экологический ущерб, повысить эксплуатационную эффективность

Материалы и методы

Геометрические размеры сдвигаемого массива почвогрунта составляют: ширина L_u равна ширине L_b колесной базы за минусом удвоенной ширины $L_{ш}$ шин, высота равна глубине колеи h_k , длина - длине пятна контакта L_n .

Принимая во внимание значения параметров: $L_u \approx 1,4$ м (при $L_b = 3$ м и $L_{ш} = 0,8$ м), $h_k = 0,3-0,5$ м и $L_n = 0,4-0,5$ м, сдвигаемый объем V_k может достигать $0,3$ м³, а масса M_k превысит $0,3$ т при плотности ρ влажного почвогрунта более 1000 кг/м³.

Такие параметры сдвигаемого массива требуют формирования в его краевой части в границах трелевочного волока (технологического коридора) соответствующих касательных напряжений τ от действия сосредоточенной нагрузки Q , равной весу лесной машины или трелевочной системы.

Многочисленные проходы движителя по одному и тому же участку трелевочного волока лишь усугубляют проблему, поскольку глубина колеи h_k постоянно увеличивается, что приводит к постоянному росту значений V_k и M_k .

Необходимо отметить, что наряду с позитивным действием в контексте данной проблемы маневрирование оказывает и негативное влияние на массив почвогрунта в зоне корневой системы подроста и оставляемых на дорастивание деревьев (при выборочных рубках, или иных лесохозяйственных мероприятиях), что необходимо учитывать при проектировании охранных полос трасс движения лесных машин.

Результаты

В основу математической модели для определения величины τ положены результаты исследований [18, 19].

Пусть задана подвижная система координат xOy с центром в точке O приложения нагрузки Q .

Ось z направим перпендикулярно вниз к поверхности трассы движения лесной машины, ось x - вдоль нее и ось y - перпендикулярно направлению движения лесной машины.

Сосредоточенная сила Q , направленная вдоль оси z , оказывает вертикальное давление на почвогрунт $q_0 = Q/S_{\Pi}$, где S_{Π} – площадь пятна контакта движителя с поверхностью движения. В случае, если лесосечные или лесохозяйственные работы производят на склонах с углом наклона α к линии горизонта, то в качестве вертикальной силы принимают составляющую веса в виде $Q \cdot \cos \alpha$ [20,21].

Сила распора формирует в направлении оси y горизонтальные напряжения сдвига $\tau_c = \frac{\nu}{1-\nu} q_0$, где ν – коэффициент Пуассона. Под совокупным действием вертикальных и горизонтальных напряжений при превышении определенного предела прочности почвогрунта формируется зона разрушения с образованием колеи глубиной h_k .

При маневрировании движителя процесс деформирования почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $zr\theta$ с вертикальной z , радиальной r и тангенциальной θ координатами.

Компоненты тензора напряжений в этом случае при возникновении в момент поворота дополнительных касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ определяются как:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_1; \\ \sigma_r &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta. \quad (1)\end{aligned}$$

Из (1) следует, что при отсутствии поворота ($\theta=0$) компоненты тензора напряжений являются главными:

$$\sigma_z = \sigma_1, \sigma_r = \sigma_2, \sigma_\theta = \sigma_3, \tau_{r\theta} = 0, \quad (2)$$

которые в соответствии с [1, 2] равны:

$$\sigma_z = -\frac{3Q}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-5/2}, \quad (3a)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\}, \quad (3b)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] + z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right\}. \quad (3b)$$

Как видим, определяющими параметрами при оценке напряжений являются величина нагрузки Q и коэффициент Пуассона ν .

Реализация математической модели (1)-(3) в диапазоне изменения параметров $Q=8-20$ т и $\nu=0,2-0,4$ для центра приложения нагрузки ($z=0$) позволили (рисунок 1) установить характер затухания дополнительных касательных напряжений $\tau_{r\theta}$, кПа по мере роста r , м, т.е. удаления от границы трелевочного волока (технологического коридора).

Расчеты произведены при фиксированных значениях параметров $Q=14$ т и $\nu=0,32$ и различных углах поворота $\theta=10^\circ$, $\theta=20^\circ$, и $\theta=30^\circ$.

Как следует из анализа данных рисунка 2, при маневрировании с большими углами поворота движителя дополнительные касательные напряжения в непосредственной близости от центра приложения нагрузки возрастают кратно. Однако, по мере удаления от границы трелевочного волока (технологического коридора) они резко снижаются по закону затухающей экспоненты. На расстоянии, превышающем 0,5 м, влияние параметра θ на формирование величины $\tau_{r\theta}$ снижается.

Численные эксперименты модели (1)-(3) при $z=0$ в указанных выше диапазонах изменения параметров $Q=8-20$ т и $\nu=0,2-0,4$ позволили установить обобщенное регрессионное уравнение для определения величины дополнительных касательных напряжений в момент поворота движителя:

$$\tau_{r\theta} = 0,018 \cdot Q \cdot \cos \alpha (1-2\nu) \cdot (7,0178\theta + 0,633) \cdot e^{-4,372r}. \quad (4)$$

Суммируя горизонтальные напряжения сдвига τ_c с величиной $\tau_{r\theta}$, получим результирующую величину касательных напряжений τ в направлении сдвигаемого массива между колеями:

$$\tau = \tau_c + \tau_{r\theta}. \quad (5)$$

При погружении колеса радиусом R в почвогрунт на глубину колеи h_k площадь сектора S_k взаимодействия колеса с массивом почвогрунта равна:

$$S_k = \frac{R^2}{2} (\mu - \sin \mu), \quad (6)$$

где центральный угол $\mu = 2 \arccos(1 - h_k/R)$.

Сила сдвига F_c будет равна произведению величины τ на S_k :

$$F_c = (\tau_c + \tau_{r\theta}) \frac{R^2}{2} (\mu - \sin \mu). \quad (7)$$

За время t воздействия силы F_c на участок сдвигаемого массива почвогрунта возникает импульс силы сдвига:

$$I_c = F_c \cdot t. \quad (8)$$

Масса сдвигаемого массива с учетом плотности почвогрунта ρ равна:

$$M_k = \rho L_{\text{ц}} h_k L_{\text{п}}. \quad (9)$$

Импульс массы тела I_m при его перемещении со скоростью v составит:

$$I_m = M_k \cdot v. \quad (10)$$

Критерием выполнения сдвига массива почвогрунта между колеями в момент маневрирования движителя принимается условие превышение импульса силы сдвига, действующей на участок массива, над импульсом его массы:

$$I_c > I_m, \text{ н} \cdot \text{с} \quad (11)$$

Анализ соотношений для определения величин импульсов силы и массы показывает, что основными факторами влияния являются глубина колеи h_k , вес Q и коэффициент Пуассона ν , которые существенно зависят от влажности грунта W [20,21].

Произведем численные расчеты при следующих исходных данных: вес лесной машины (трелевочной системы) $Q=14$ т, радиус колеса - $R=0,625$ м, скорость движения - $v=0,6$ м/с, время взаимодействия - $t=8$ с, длина пятна контакта - $L_n=0,42$ м, ширина пятна контакта - $B_{\text{п}}=0,73$ м, площадь пятна контакта - $S_{\text{п}}=0,3066$ м², площадь сектора взаимодействия - $S_k=0,41$ м² (1/3 площади колеса).

Грунт - влажный суглинок с модулем общей деформации $E=1$ МПа, плотностью $\rho=1100$ кг/м³, соответствующей коэффициенту пористости 0,7 и влажности $W_n=28\%$, равной ее пределу пластичности. При иной влажности грунта W плотность корректировалась в соответствии с коэффициентом пропорциональности λ_W :

$$\lambda_W = \frac{1+W/100}{1+W_n/100}. \quad (12)$$

На рисунке 3 для влажности грунта $W=35\%$ и принятых исходных данных в результате выполненных расчетов показано влияние угла поворота θ , ° на величину глубины колеи h_k , м.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что существенный относительный рост h_k наблюдается при малых углах поворота до 10° (с 0,26 до 0,32 м) и по достижении θ уровней 15 и более градусов увеличение h_k происходит асимптотически.

Этот результат позволяет сделать предположение о том, что с ростом маневрирования импульс силы сдвига массива почвогрунта будет доминировать над импульсом его массы, что является пози-

тивным фактором в контексте решения поставленной проблемы повышения проходимости движителя при образовании глубокой колеи.

Важной характеристикой процесса упругопластического деформирования влажного почвогрунта с внутренним трением является коэффициент Пуассона ν , который зависит от влажности почвогрунта W .

На рисунке 3 представлены зависимости ν от W , %, где: кривая 1 – данные аппроксимации результатов исследований в работе [22] лабораторных испытаний [23] на образцах грунтов различной влажности; прямая 2 – расчетная, полученная как 1/100 от показателя W , %.

Как установлено, относительная погрешность оценки ν не выходит за пределы 3,5-4,5%.

На рисунке 5 а при маневрировании движителя с углом поворота $\theta=10^\circ$ показано влияние W (ось абсцисс, %) на значения (ось ординат, н·с) импульсов массы I_m - линия 1 и силы I_c - линия 2.

Как видно из рисунка 5 а во всем диапазоне изменения влажности условие (11) сдвига массива почвогрунта не выполняется.

Увеличив угол поворота θ до 20° (рисунок 4 б), условие (11) выполняется при любой влажности в диапазоне от ее предела пластичности $W_n=25-28\%$ до предела текучести $W_T=36-40\%$, причем с ростом W превышение импульса силы над импульсом массы растет, т.е. вероятность сдвига массива почвогрунта увеличивается.

Полученные результаты позволяют ввести безразмерный критерий эффективного сдвига, равный отношению импульсов:

$$G = \frac{I_c}{I_m}. \quad (13)$$

Условие (11) соответствует условию:

$$G > 1. \quad (14)$$

На рисунке 6 при принятых исходных данных и фиксированной влажности почвогрунта $W=32\%$ показано влияние угла поворота θ , на величину критерия G .

Как видим, при маневрировании с углами поворота, превышающими 20 градусов, вероятнее всего, что массив почвогрунта между колеями будет сдвинут на полную ширину межколейного пространства.

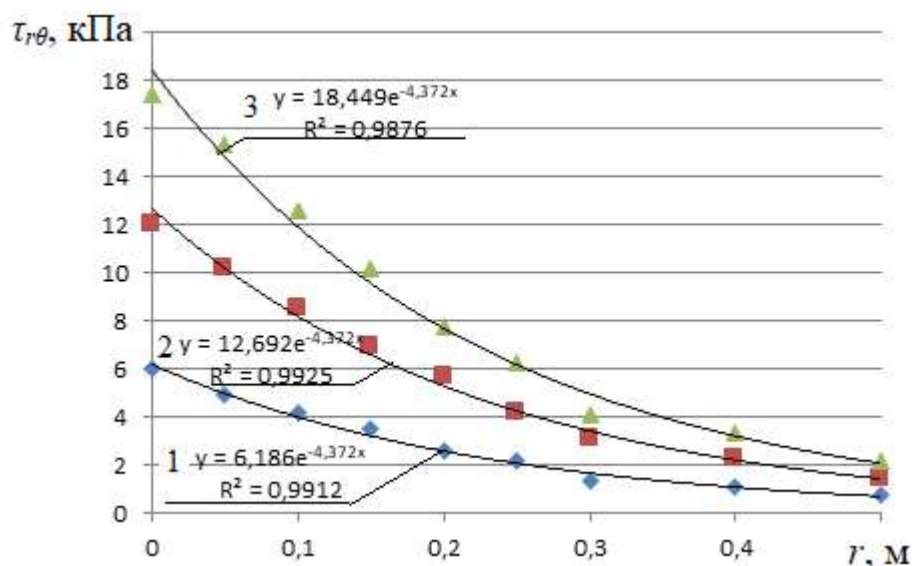


Рисунок 1. Изменение касательных напряжений в момент поворота с удалением от границы трелевочного волока (технологического коридора)

1 - $\theta=10^\circ$; 2 - $\theta=20^\circ$; $\theta=30^\circ$

Figure 1. Change in tangential stresses at the moment of rotation with distance from the boundary of the skidding portage (technological corridor)

1 - $\theta=10^\circ$; 2 - $\theta=20^\circ$; $\theta=30^\circ$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

На рисунке 1 математическое моделирование подтвердило экспоненциальный характер затухания касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ с высокой точностью аппроксимации $R^2 > 0,98$, при удалении от точки контакта движителя с грунтом. При увеличении угла поворота θ с 10° до 30° возрастает пиковое напряжение в 3 раза с 6,2 до 18,4 кПа., однако угол поворота движителя $\theta = 20^\circ$ показывает усиленное затухание и коэффициент затухания равняется $k =$

5.752 м^{-1} , что снижает сдвиг почвы на расстояниях $r > 0,3 \text{ м}$. Оптимальные результаты по минимизации колеи $h_k \leq 0,26 \text{ м}$ и обеспечиванию условия сдвига $I_c > I_m$ достигнуты при $\theta = 25 - 30^\circ$, где сочетается высокая амплитуда напряжений и умеренный коэффициент затухания $k = 4.372 \text{ м}^{-1}$, осуществляя равномерное деформирование межколейного пространства.

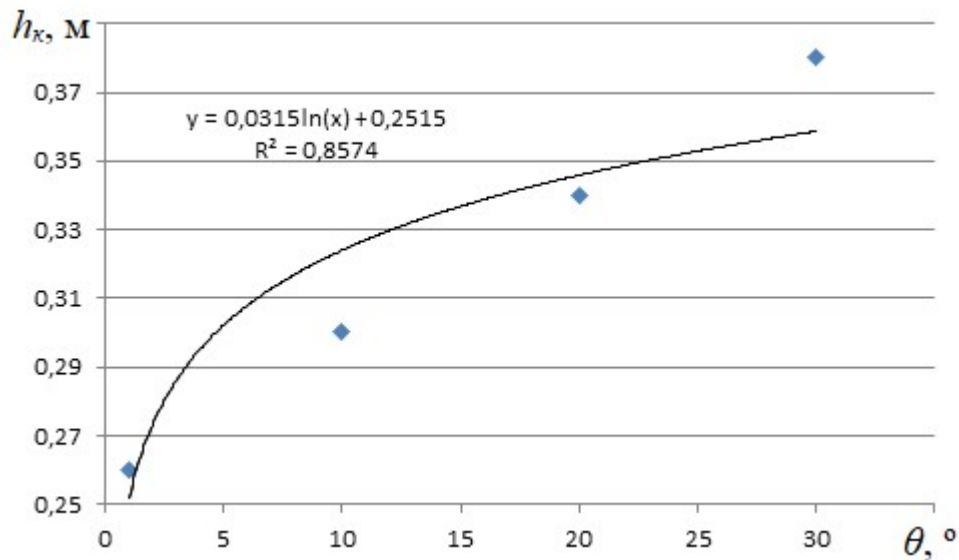


Рисунок 2. Влияние угла поворота движителя на глубину колеи
Figure 2. The effect of the angle of rotation of the propulsor on the depth of the track

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Анализ экспериментальных данных, представленных на рисунке 2, выявил выраженную логарифмическую зависимость глубины образующейся колеи (h_k) от угла поворота движителя (θ). Полученная зависимость аппроксимируется уравнением регрессии:

$$h_k = 0.0315 \cdot \ln(\theta) + 0.2515$$
с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0.8574$, что свидетельствует об адекватности выбранной математической модели.

Динамика процесса характеризуется двумя отчетливыми режимами:

При малых углах поворота ($\theta < 10^\circ$) наблюдается интенсивный рост глубины колеи до значений порядка 0.32 м. Данное явление обусловлено возникновением недостаточных касательных напряжений в контактной зоне ($\tau_{r\theta} \leq 6.2$ кПа), при которых критерий сдвига I_c не превышает порогового значения I_m ($I_c < I_m$). Это приводит к нарушению сплошности сдвига грунта и его активному накоплению в межколеинном пространстве.

При углах поворота $\theta \geq 15^\circ$ кинетика процесса кардинально меняется: рост глубины колеи существенно замедляется. При $\theta=20^\circ$ и $\theta=30^\circ$ величина h_k достигает значений 0.33 м и 0.35 м соответственно. Подобная трансформация механизма взаимодействия объясняется значительным увеличением касательных напряжений ($\tau_{r\theta} = 12.4\text{--}18.4$ кПа), что обеспечивает выполнение условия эффективного сдвига: $I_c > I_m$.

Проведенный анализ позволяет идентифицировать маневрирование с углами поворота менее 10° как критический режим, провоцирующий быстрое развитие колеи, в особенности на переувлажненных грунтах. Напротив, диапазон углов $\theta = 15^\circ\text{--}25^\circ$ может быть определен как операционно-оптимальный, обеспечивающий баланс между минимизацией глубины колеи и поддержанием эффективного силового взаимодействия с грунтом.

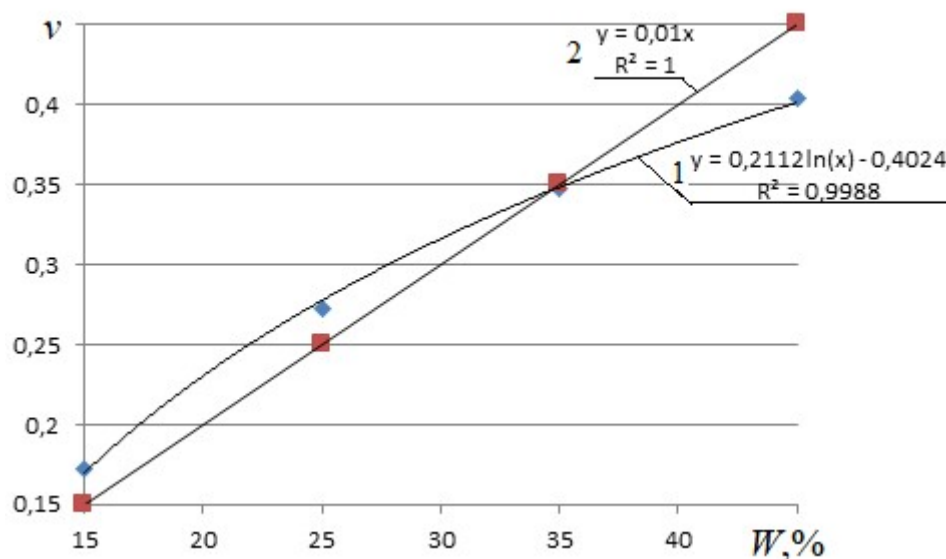


Рисунок 3. Зависимость коэффициента Пуассона от влажности W :

1 – данные аппроксимации результатов исследований в работе [5] лабораторных испытаний [6] на образцах грунтов различной влажности; 2 – расчетная, полученная как $1/100$ от показателя W , %

Figure 3. Dependence of the Poisson's ratio on humidity W :

1 – approximation data of the research results in [5] laboratory tests [6] on soil samples of various humidity;

2 – calculated as $1/100$ of the indicator W , %

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента Пуассона (ν) исследуемого грунта от его влажности (W). Экспериментально установленная зависимость имеет нелинейный S-образный характер, что свидетельствует о существенном расхождении с упрощенной линейной моделью.

Анализ показал, что при малых углах поворота управляемых колес ($\theta < 10^\circ$) применение линейной аппроксимации для прогнозирования сдвиговых деформаций приводит к систематическому завышению оценки на 8–15%. Данная методическая погрешность нивелирует учет дефицита импульса

силы, вследствие чего расчетная глубина колеи (h_k) может достигать 0,31 м. Указанное явление представляет наибольшую опасность при эксплуатации на склоновых территориях и переувлажненных грунтах.

При увеличении угла поворота до $\theta \geq 20^\circ$ маневрирование индуцирует рост касательных напряжений в контактном слое до значений 12–18 кПа. Данный режим обеспечивает выполнение критерия превышения импульса силы над импульсом момента ($I_s > I_m$), что лимитирует углубление колеи диапазоном 0,31–0,35 м.

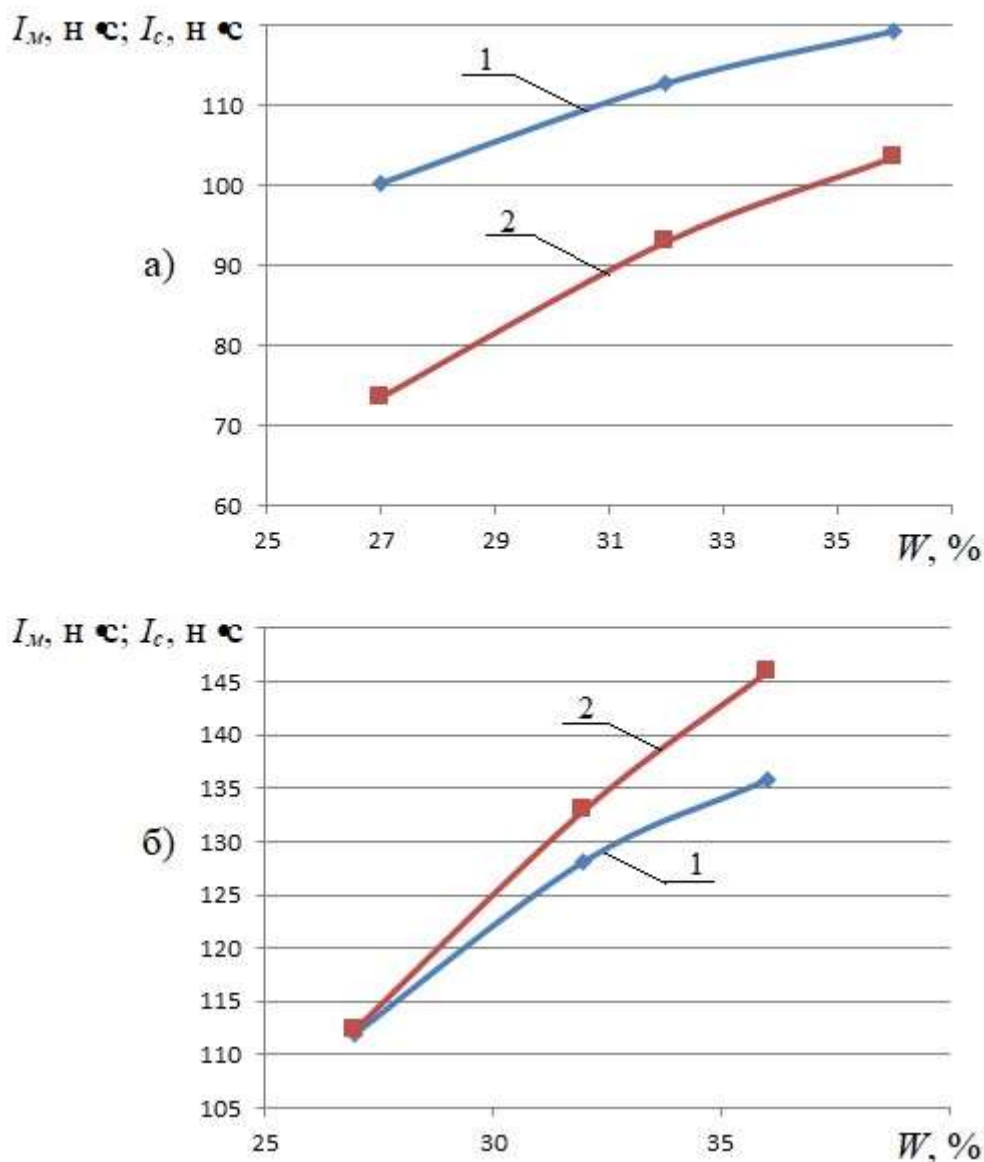


Рисунок 4. Зависимости импульса силы и импульса массы от влажности:

1 - импульс массы I_m ; 2 - импульс силы I_c

Figure 4. Force pulse and mass pulse dependences on humidity:

1 - momentum of mass I_m ; 2 - momentum of force I_c

Анализ зависимостей импульсов силы I_c и массы I_m от влажности грунта W (рисунок 4) подтверждает, что эффективность сдвига межколейного массива критически зависит от угла поворота движителя θ . При малых углах поворота $\theta < 10^\circ$ импульс силы I_c сохраняет инвариантность к изменению влажности почвы, тогда как импульс массы I_m возрастает с 68 до 80 $\text{H} \cdot \text{с}$ при росте влажности от 25% до 35%, что увеличивают глубину колеи до 0.31 м. При углах $\theta > 20^\circ$ нелинейный рост импульсов

силы I_c с 110 до 125 $\text{H} \cdot \text{с}$ компенсируются увеличением импульсом массы I_m с 105 до 130 $\text{H} \cdot \text{с}$, что коррелируют с фиксацией глубины колеи на уровне 0,33 м. Для переувлажнённых грунтов $W > 30^\circ$ маневры с углом поворота движителя $\theta < 15^\circ$ недопустимы из-за риска глубины колеи h_k , тогда как $\theta = 25^\circ - 30^\circ$ обеспечивает управление сдвигом даже при $W = 35\%$, что подтверждает ключевую роль угла поворота в компенсации негативного влияния влажности.

Обсуждение

Результаты исследований показывают, что увеличение веса Q с одной стороны приводит к росту глубины колеи, массы сдвигаемого массива почвогрунта и, соответственно, ее импульса, а с другой - способствует увеличению касательных напряжений и импульса силы сдвига.

На рисунке 6 для фиксированного значения $\theta=10^\circ$ показано влияние Q (ось абсцисс, т) на изменение критерия G (ось ординат).

Как видим, при незначительных углах поворота требуется большая нагрузка на массив почвогрунта для его сдвига в сторону от направления трелевочного волока (технологического коридора).

При меньшей нагрузке требуется более высокая маневренность в соответствии с данными рисунка 5.

Результаты исследования (рисунок 7) совместного влияния угла поворота движителя $\theta, ^\circ$ и его веса $Q, т$ на величину критерия сдвига G свидетельствуют о том, что чем более высокую нагрузку оказывает лесная машина или трелевочная система на почвогрунт, тем более значительное маневрирование необходимо для выполнения эффективной транспортной работы в сложных геотехнических условиях.

При многократных проходах лесной машины или трелевочной системы по одному и тому же участку колеи происходят:

1) циклическое уплотнение почвы в соответствии с прогнозными моделями [24] и

2) асимптотическое увеличение глубины колеи в соответствии с количественными оценками [25].

Основываясь на указанных методических положениях [24,25] и разработанных соотношениях (1)-(14) произведены расчеты показателей взаимодействия шины лесной машины с массивом почвогрунта между колеями при увеличении числа проходов с 1 до 4.

Расчеты соответствуют следующим исходным данным: влажность почвогрунта $W=32\%$, нагрузка на почвогрунт $Q=17 т$, глубина колеи после первого прохода ($N=1$) при $\theta=0^\circ$ равна $h_k=0,26 м$.

В таблицу 1 сведены данные глубины колеи h_k , м, импульсов массы I_m и силы I_c , кН·с.

На основании данных таблицы 1 определены (рисунок 7) значения критерия G по мере увеличения циклов прохода N .

Данные таблицы 1 и рисунка 7 позволяют произвести сравнительный анализ трех случаев:

первый – практически прямолинейное движение в условиях минимального маневрирования движителя (с углом поворота θ не более 5° – линия 1),

второй и третий - при маневрировании соответственно с $\theta=10^\circ$ – линия 2 и $\theta=15^\circ$ – линия 3.

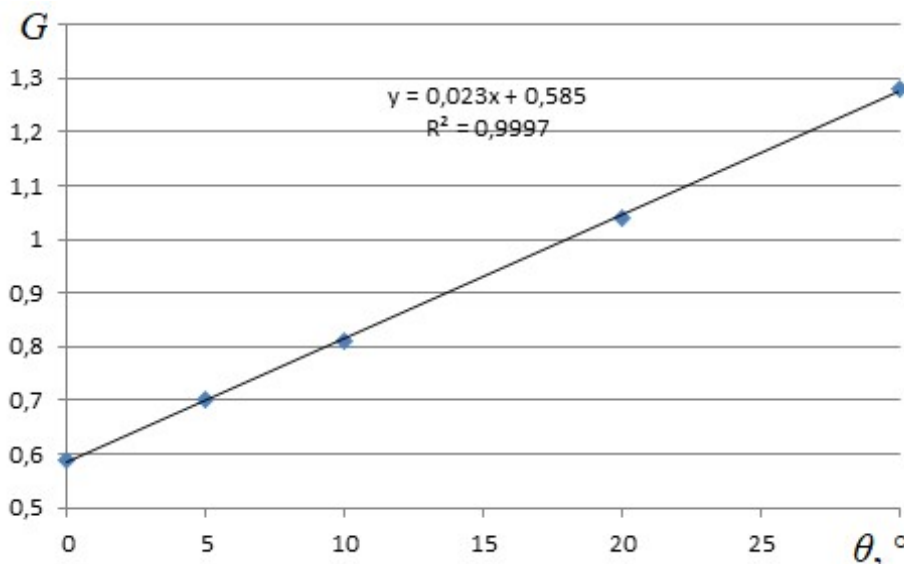


Рисунок 5. Влияние угла поворота движителя на величину критерия сдвига
Figure 5. The effect of the angle of rotation of the propulsor on the value of the shear criterion

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

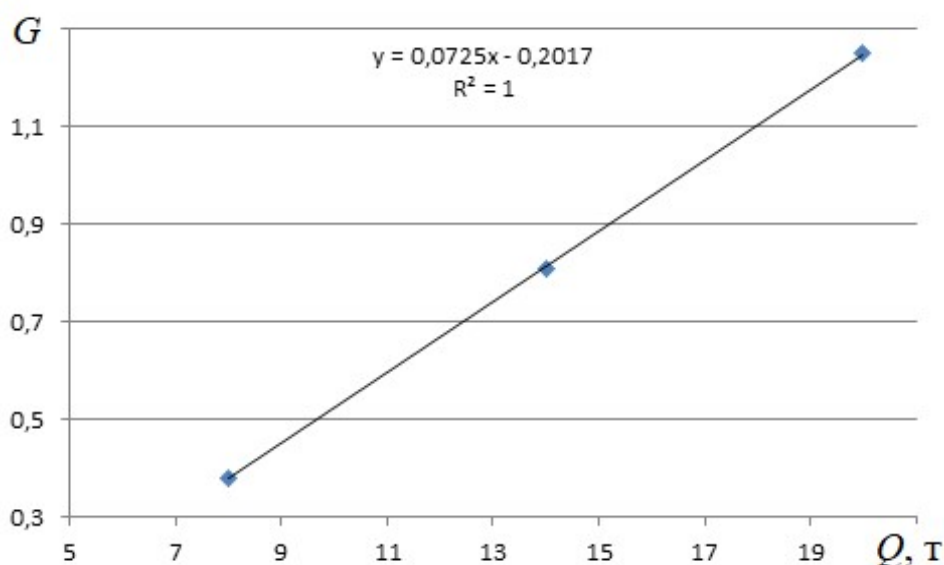


Рисунок 6. Влияние величины нагрузки на величину критерия сдвига

Figure 6. Influence of the load value on the value of the shear criterion

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 1. Результаты численного моделирования показателей взаимодействия лесной машины или трелевочной системы с массивом почвогрунта между колесами

Table 1. Results of numerical modeling of the interaction of a forest machine or a skidding system with an array of soil between the tracks

N	$\theta=5^\circ$			$\theta=10^\circ$			$\theta=15^\circ$		
	h_k	I_m	I_c	h_k	I_m	I_c	h_k	I_m	I_c
1	0,29	0,11	0,10	0,31	0,12	0,13	0,33	0,13	0,16
2	0,34	0,16	0,13	0,37	0,17	0,16	0,39	0,18	0,19
3	0,37	0,19	0,15	0,40	0,20	0,18	0,42	0,21	0,22
4	0,39	0,21	0,16	0,42	0,23	0,19	0,44	0,24	0,23

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

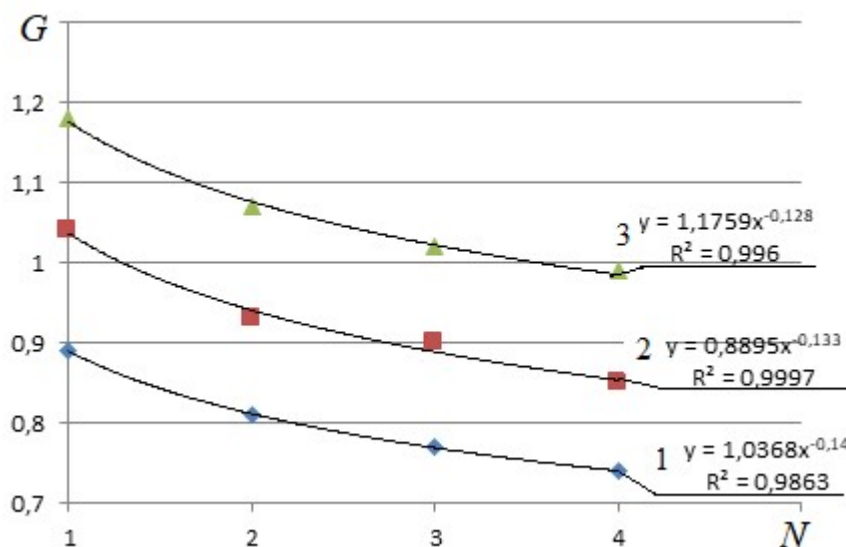


Рисунок 7. Влияние цикличности на изменение величины критерия сдвига
Figure 7. The effect of cyclicity on the change in the magnitude of the shift criterion

Заклучение

Проведенное исследование позволило разработать теоретически обоснованные рекомендации по повышению проходимости колесных лесных машин на переувлажненных грунтах за счет оптимизации режимов маневрирования движителя. Установлено, что:

1. Маневрирование с углами поворота 15-20° и более обеспечивает формирование достаточных касательных напряжений для эффективного сдвига межколейного массива грунта.
2. Разработанный критерий эффективности сдвига, основанный на соотношении импульсов силы и массы, позволяет количественно оценить вероятность разрушения межколейного пространства.

3. Многократные проходы техники по одному участку требуют увеличения углов маневрирования для поддержания работоспособности трелевочных волоков.
4. Полученные результаты позволяют минимизировать глубину колеи (до 0,33-0,35 м) даже при высокой влажности грунта (до 35%) и многократных проходах техники.

Результаты исследования имеют практическую значимость для операторов лесозаготовительной техники и могут быть использованы при разработке руководств по эксплуатации машин в сложных грунтовых условиях, что позволит снизить экологический ущерб и повысить эффективность лесозаготовительных работ.

Список литературы

1. Groot R, Brander L, van der Ploeg S, Costanza R, Bernard F, Braat L, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosyst Serv.* 2012; 1:50–61. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>
2. Holden SR, Treseder KK. A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances. *Front Microbiol.* 2013; 4:163. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2013.00163>
3. Lidskog R, Sundqvist G, Kall A-S, Sandin P, Larsson S. Intensive forestry in Sweden: stakeholders' evaluation of benefits and risk. *J Integr Environ Sci.* 2013; 10:145–60. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/1943815X.2013.841261>
4. Acharya RP, Maraseni T, Cockfield G. Global trend of forest ecosystem services valuation – an analysis of publications. *Ecosyst Serv.* 2019; 39:100979. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979>
5. Frey B, Kremer J, Rüdter A, Sciacca S, Matthies D, Lüscher P. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *Eur J Soil Biol.* 2009; 45:312–20. – DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2009.05.006>
6. Picchio R, Neri F, Petrini E, Verani S, Marchi E, Certini G. Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. *For Ecol Manage.* 2012; 285:38–43. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.008>
7. Vossbrink J, Horn R. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. *Eur J For Res.* 2004; 123:259–67. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-004-0040-8>
8. Horn R, Vossbrink J, Peth S, Becker S. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *For Ecol Manage.* 2007; 248:56–63. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.037>
9. Ramantswana M, Guerra SPS, Ersson BT. Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review. *Curr For Rep.* 2020; 6:143–58. – DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-020-00114-7>
10. Cambi M, Certini G, Neri F, Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *For Ecol Manage.* 2015; 338:124–38. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
11. Powers RF, Andrew Scott D, Sanchez FG, Voldseth RA, PageDumroese D, Eliaf JD, et al. The North American long-term soil productivity experiment: findings from the first decade of research. *For Ecol Manage.* 2005; 220:31–50. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.003>
12. Agherkakli B, Najaf A, Sadeghi SH. Ground based operation effects on soil disturbance by steel tracked skidder in a steep slope of forest. *J For Sci (Prague).* 2010; 56:278–84. – DOI: <http://dx.doi.org/10.17221/93/2009-JFS>
13. DeArmond D, Ferraz JBS, Emmert F, Lima AJN, Higuchi N. An assessment of soil compaction after logging operations in Central Amazonia. *For Sci.* 2020; 66:230–41. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/forsci/fxz070>
14. Mariotti B, Hoshika Y, Cambi M, Marra E, Feng Z, Paoletti E, et al. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes- A meta-analysis. *For EcolManag.* 2020; 462:118004. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
15. Labelle ER, Kammermeier M. Above- and belowground growth response of *Picea abies* seedlings exposed to varying levels of soil relative bulk density. *Eur J Forest Res.* 2019; 138:705–22. – DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-019-01201-6>
16. Laschi A, Marchi E, González-García S. Forest operations in coppice: Environmental assessment of two different logging methods. *Sci Total Environ.* 2016; 562:493–503. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.041>
17. Naghdi R, Solgi A, Labelle ER, Nikooy M. Combined effects of soil texture and machine operating trail gradient on changes in forest soil physical properties during ground-based skidding. *Pedosphere.* 2020; 30:508–16. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60428-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60428-4)
18. Анисимов Г.М., Большаков Б.М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: СПбГЛТА, 1998. 106 с.
19. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Дмитриев А.С., Григорьева О.И. Гео-техническое обоснование работоспособности трелевочных волоков и технологических коридоров на склонах,

оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колесным и полугусеничным двигателем // *Resources and Technology*. 2023. Т. 20, № 3. С. 15–31.

20. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020. № 2 (374). С. 101–117.

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

22. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2021. № 6 (384). С. 121–134.

23. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 228 с.

24. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Лепилин Д.В., Жукова А.И. Моделирование уплотнение почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2010. № 6 (111). С. 61–64.

25. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Жукова А.И. Модель циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелевочному волоку // *Вестник КрасГАУ*. 2010. № 2 (41). С. 8–14.

References

1. Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., et al. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, *1*, 50–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>

2. Holden, S. R., & Treseder, K. K. (2013). A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances. *Frontiers in Microbiology*, *4*, 163. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2013.00163>

3. Lidskog, R., Sundqvist, G., Kall, A.-S., Sandin, P., & Larsson, S. (2013). Intensive forestry in Sweden: stakeholders' evaluation of benefits and risk. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, *10*(2), 145–160. <http://dx.doi.org/10.1080/1943815X.2013.841261>

4. Acharya, R. P., Maraseni, T., & Cockfield, G. (2019). Global trend of forest ecosystem services valuation – an analysis of publications. *Ecosystem Services*, *39*, 100979. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979>

5. Frey, B., Kremer, J., Rüdte, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P. (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, *45*(4), 312–320. <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2009.05.006>

6. Picchio, R., Neri, F., Petrini, E., Verani, S., Marchi, E., & Certini, G. (2012). Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. *Forest Ecology and Management*, *285*, 38–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.008>

7. Vossbrink, J., & Horn, R. (2004). Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. *European Journal of Forest Research*, *123*(3), 259–267. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-004-0040-8>

8. Horn, R., Vossbrink, J., Peth, S., & Becker, S. (2007). Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management*, *248*(1–2), 56–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.037>

9. Ramantswana, M., Guerra, S. P. S., & Ersson, B. T. (2020). Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review. *Current Forestry Reports*, *6*, 143–158. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-020-00114-7>

10. Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest Ecology and Management*, *338*, 124–138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>

11. Powers, R. F., Andrew Scott, D., Sanchez, F. G., Voldseth, R. A., Page-Dumroese, D., Eliof, J. D., et al. (2005). The North American long-term soil productivity experiment: findings from the first decade of research. *Forest Ecology and Management*, *220*(1–3), 31–50. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.003>

12. Agherkakli, B., Najaf, A., & Sadeghi, S. H. (2010). Ground based operation effects on soil disturbance by steel tracked skidder in a steep slope of forest. *Journal of Forest Science (Prague)*, *56*(6), 278–284. <http://dx.doi.org/10.17221/93/2009-JFS>
13. DeArmond, D., Ferraz, J. B. S., Emmert, F., Lima, A. J. N., & Higuchi, N. (2020). An assessment of soil compaction after logging operations in Central Amazonia. *Forest Science*, *66*(2), 230–241. <http://dx.doi.org/10.1093/forsci/fxz070>
14. Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E., et al. (2020). Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, *462*, 118004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
15. Labelle, E. R., & Kammermeier, M. (2019). Above- and belowground growth response of *Picea abies* seedlings exposed to varying levels of soil relative bulk density. *European Journal of Forest Research*, *138*(4), 705–722. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-019-01201-6>
16. Laschi, A., Marchi, E., & González-García, S. (2016). Forest operations in coppice: Environmental assessment of two different logging methods. *Science of The Total Environment*, *562*, 493–503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.041>
17. Naghdi, R., Solgi, A., Labelle, E. R., & Nikooy, M. (2020). Combined effects of soil texture and machine operating trail gradient on changes in forest soil physical properties during ground-based skidding. *Pedosphere*, *30*(4), 508–516. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60428-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60428-4)
18. Anisimov, G. M., & Bol'shakov, B. M. (1998). *Osnovy minimizatsii uplotneniia pochvy trelevochnymi sistemami* [Fundamentals of minimizing soil compaction by skidding systems]. SPbGLTA. (in Russ.)
19. Kaliashov, V. A., Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Kunitskaia, O. A., Dmitriev, A. S., & Grigor'eva, O. I. (2023). Geotekhnicheskoe obosnovanie rabotosposobnosti trelevochnykh volokov i tekhnologicheskikh koridorov na sklonakh ottaivaiushchikh pochvogruntov pri rabote lesnykh mashin s kolesnym i poligusenichnym dvizhitelem [Geotechnical justification of the performance of skidding trails and technological corridors on slopes of thawing soils during the operation of forest machines with wheeled and semi-tracked propulsion systems]. *Resources and Technology*, *20*(3), 15–31. (in Russ.)
20. Rudov, S. E., Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Kunitskaia, O. A., & Grigor'eva, O. I. (2020). Issledovanie protsessa razrusheniia merzlykh i ottaivaiushchikh pochvogruntov pri vozdeistvii trelevochnoi sistemy [Study of the process of destruction of frozen and thawing soils under the impact of a skidding system]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, (2)(374), 101–117. (in Russ.)
21. Rudov, S. E., Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Kunitskaia, O. A., Grigor'ev, M. F., & Puchnin, A. N. (2019). Osobennosti ucheta sostoianiia massiva merzlykh gruntov pri tsiklicheskom vzaimodeistvii s trelevochnoi sistemoi [Peculiarities of accounting for the state of the frozen ground mass during cyclic interaction with the skidding system]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, *9*(1)(33), 116–128. (in Russ.)
22. Rudov, S. E., Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Kunitskaia, O. A., & Grigor'eva, O. I. (2021). Modelirovanie vzaimodeistvii lesnykh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonakh [Modeling the interaction of forest machines with soil on slopes]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, (6)(384), 121–134. (in Russ.)
23. Tsytovich, N. A. (1983). *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Vysshaia shkola. (in Russ.)
24. Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Lepilin, D. V., & Zhukova, A. I. (2010). Modelirovanie uplotnenie pochvogrunta v bokovykh polosakh trelevochnogo voloka s uchedom izmenchivosti trassy dvizheniia [Modeling of soil compaction in the lateral strips of the skidding trail taking into account the variability of the route]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, (6)(111), 61–64. (in Russ.)
25. Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Rudov, S. E., & Zhukova, A. I. (2010). Model' tsiklicheskogo uplotneniia grunta v polosakh, prilagaiushchikh k trelevochnomu voloku [A model of cyclic soil compaction in strips adjacent to the skid trail]. *Vestnik KrasGAU*, (2)(41), 8–14. (in Russ.)

Сведения об авторах

Шапиро Владимир Яковлевич - доктор технических наук, профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Савченко Станислав Игоревич* – преподаватель кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>, e-mail: savchenko.stas2020@yandex.ru

Тихонов Евгений Андриянович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru

Ревяко Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины природообустройства» Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К.Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», г. Новочеркасск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, e-mail: revyako77@mail.ru

Перфильев Павел Николаевич – кандидат технических наук, зав. кафедрой лесопромышленных производств и обработки материалов ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru

Information about the authors

Vladimir Ya. Shapiro - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru

Igor V. Grigorev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru

✉ *Stanislav I. Savchenko*, Lecturer at the Department of Forestry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>, e-mail: savchenko.stas2020@yandex.ru

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru

Sergey I. Revyako – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Environmental Management Machines" Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov - branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, e-mail: revyako77@mail.ru

Pavel N. Perfiliev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Timber Industry and Materials Processing of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author