

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/25>

УДК 630* УДК 674.81:621.879.3:629.3.023.4



Моделирование влияния буксования движителей на устойчивость лесных машин при маневрировании на слабонесущих склонах

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>

Ярослав А. Рыжов³, irosmagelav@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>

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

Павел Н. Перфильев⁵, savadf0706@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

Сергей В. Египко⁶, egipko_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8356-7026>

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок., д. 13, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

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

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

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

⁵ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, Архангельск, 063002, Российская Федерация

⁶ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Пушкинская, д. 111, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью минимизировать деградацию слабонесущих лесных почв при возрастающих нагрузках от современной колесной техники, особенно в условиях сложного рельефа и переувлажнения. Цель исследования - комплексное изучение взаимодействия колесных лесных машин с влажными слабонесущими почвогрунтами на склонах с учетом критического фактора - буксования движителей. Для ее достижения разработана математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между буксованием, образованием колеи и угловыми отклонениями машины. В результате проведенного моделирования установлено, что даже при низком уровне буксования ($\delta=0,02$) предел прочности грунта на сдвиг снижается катастрофически - с 18,54 кПа до 7,49 кПа, что составляет падение на 60%. При увеличении влажности грунта до предела текучести ($W=41\%$) его прочность дополнительно уменьшается на 50%. Определено, что комбинированное воздействие буксования и переувлажнения приводит к снижению сопротивления сдвигу до критических значений в 3-3,5 кПа. В этих условиях внешнее давление на грунт не должно превышать 10-15 кПа. Расчеты показали, что допустимый угол маневрирования на крутых склонах ($>20^\circ$) при сильном буксовании не должен превышать 10-15°, а на пологих склонах с минимальным буксованием может достигать 20-25°. Полученные результаты доказывают, что буксование является определяющим фактором деградации слабонесущих грунтов и должно быть ключевым параметром при планировании лесозаготовительных операций для минимизации экологического ущерба.

Ключевые слова: колесные лесные машины, трелевочные системы, почвогрунт, буксование, лесные машины

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: Моделирование влияния буксования движителей на устойчивость лесных машин при маневрировании на слабонесущих склонах/ В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, Я.А. Рыжов, Е.А. Тихонов, П.Н. Перфильев, С.В. Египко // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 421-436. – Библиогр.: с. 432-435 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/25>.

Поступила 14.04.2025. Пересмотрена 10.10. 2025. Принята 30.11.2025. Опубликована онлайн 26.12.2025.

Article

Modeling of the effect of sliding propellers on the stability of forest vehicles when maneuvering on low-bearing slopes

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>

Yaroslav A. Ryzhov³,  irosmagelav@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>

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

Pavel N. Perfiliev⁵, savadf0706@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

Sergey V. Eгypko⁶, egipko_s@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8356-7026>

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 University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Timiryazev str., 8, 394087, Russian Federation

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

⁵ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

⁶ 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

The relevance of the study is due to the need to minimize the degradation of low-bearing forest soils under increasing loads from modern wheeled vehicles, especially in conditions of difficult terrain and waterlogging. The purpose of the study is a comprehensive study of the interaction of wheeled forest vehicles with wet, low-bearing soils on slopes, taking into account the critical factor of engine stalling. To achieve this, a mathematical model has been developed that establishes the relationship between skidding, track formation and angular deviations of the machine. As a result of the simulation, it was found that even at a low level of slipping ($\delta = 0.02$), the shear strength of the soil decreases catastrophically – from 18.54 kPa to 7.49 kPa, which is a drop of 60%. With an increase in soil moisture to

the yield point ($W = 41\%$), its strength additionally decreases by 50%. It is determined that the combined effect of slipping and waterlogging leads to a decrease in shear resistance to critical values of 3-3.5 kPa. Under these conditions, the external pressure on the ground should not exceed 10-15 kPa. Calculations have shown that the permissible maneuvering angle on steep slopes ($> 20^\circ$) with heavy skidding should not exceed 10-15°, and on gentle slopes with minimal skidding can reach 20-25°. The results obtained prove that skidding is a determining factor in the degradation of low-bearing soils and should be a key parameter in planning logging operations to minimize environmental damage.

Keywords: *wheeled forestry machines, skidding systems, soil ground, skidding*

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: wheeled forestry machines, skidding systems, soil foundation, skidding.

For citation: Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Ryzhov Ya.A., Tikhonov E.A., Perfiliev P.N., Eglypko S.V. Modeling of the effect of sliding propellers on the stability of forest vehicles when maneuvering on low-bearing slopes. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 421-436 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/25>.

Received 14.04.2025. **Revised** 10.10.2025. **Accepted** 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025

Введение

Современные лесозаготовительные процессы характеризуются высокой степенью механизации, что обеспечивает экономическую эффективность операций, но одновременно создает серьезные вызовы для устойчивости лесных экосистем. В данном контексте особую актуальность приобретает комплексное изучение воздействия лесозаготовительной техники на почвенный покров, особенно в сложных топографических и почвенных условиях.

Переходя к анализу непосредственных последствий механического воздействия, следует отметить, что многочисленные исследования демонстрируют значительное уплотнение почвы под воздействием колесной лесной техники. В этом отношении Petrosyan et al. (2022) [22] разработали математические модели, устанавливающие корреляцию между глубиной колеи и параметрами машины (масса, размеры колес, давление в шинах) при различных значениях несущей способности почвы. Полученные зависимости позволяют определять

допустимые нагрузки на почвенный покров для минимального экологического ущерба.

Развивая этот подход, Riggert et al. (2018) [21] разработали комплексную схему оценки деградации почв, вызванной лесозаготовительной техникой, выделив четыре ключевых процесса деформации: упругую деформацию, пластическую деформацию, разрушение несущей способности и гомогенизацию структуры почвы.

Эмпирические исследования подтверждают теоретические выкладки. Так, Ваек et al. (2022) [2] продемонстрировали, что после проходов харвестера уплотнение почвы увеличилось на 17% на глубине 0-10 см и на 27% на глубине 10-20 см. В трассах форвардера уплотнение было еще более значительным - 30% и 20% на соответствующих глубинах. Аналогичные результаты получили Presecan et al. (2024) [19], подтвердившие значительное увеличение сопротивления пенетрации почвы после 15 проходов техники для трелевки.

Следующим важным аспектом воздействия является образование колеи. Startsev

et al. (2022) [5] установили, что после трех проходов техники средняя глубина колеи составляет 11 ± 3 см, тогда как после десяти проходов она может достигать 66 см со средним значением 27 ± 4 см. Erktaş, A et al. (2023) [6] подтвердили, что сухая объемная плотность почвы увеличивается с глубиной колеи, достигая максимальных значений в середине полосы движения.

Рассматривая гидрологические аспекты, следует отметить, что исследования показывают значительное ухудшение характеристик почв на трелевочных волоках. Насыщенная гидравлическая проводимость была наименьшей в самых глубоких колеях, что также касалось пористости почвы, в первую очередь из-за уменьшения количества крупных пор.

Анализируя факторы воздействия, необходимо прежде всего рассмотреть влияние типа и веса техники. Сравнительные исследования демонстрируют значительные различия в воздействии различных типов техники. **Presecan et al. (2024)** [18] установили, что трелевка лошадьми оказывает наименьшее воздействие на сопротивление пенетрации почвы, в то время как трелевка тракторами приводит к более значительным изменениям.

Дальнейшее развитие этот подход получил в работе Шапиро и др. (2025) [25], где было установлено, что машины с конфигурацией 4×4 и 6×6 вызывают уплотнение почвы на 23-50% уже после первых четырех проходов. При этом наименьшее повреждение лесных почв (21-31%) отмечается при движении скидеров в груженом и порожнем состоянии.

Количество проходов техники является критическим фактором, определяющим степень нарушения почвы. **Muhdi et al. (2022)** [16] продемонстрировали, что плотность почвы увеличивается с ростом интенсивности трелевки: после 5, 10 и 15 проходов экскаватора. **Startsev et al. (2022)** [5] подтвердили, что количество проходов-нарушителей является решающим фактором в изменениях почвы.

Важным параметром, определяющим степень воздействия, является влажность почвы во время операций. Germer et al. (2025) [7]

установили, что механическая подготовка участка (MSP), проводимая в сухой период, дает лучшие результаты для роста корней по сравнению с MSP, выполненной в влажный период. Это связано с тем, что влажные почвы более склонны к пластической деформации и имеют меньшую несущую способность.

Завершая рассмотрение факторов воздействия, следует отметить влияние типа почвы. **Riggert et al. (2018)** [21] разработали схему оценки, различающую внутренние параметры почвы (миграция глины, матричный потенциал) и внешние параметры (нагрузка на колесо, площадь контакта). Исследования показывают, что глинистые почвы более склонны к уплотнению, чем песчаные.

В контексте прогнозирования воздействия особый интерес представляют топографические индексы. Ученые исследуют методы прогнозирования проходимости почвы с использованием картографических индексов, таких как глубина до воды (DTW) и топографический индекс влажности (TWI). Однако мета-анализ **Latterini et al. (2024)** [12] показал, что индекс DTW в его текущей форме не является полностью надежным предсказателем участков почвы, чувствительных к нарушениям, вызванным техникой.

Математическое моделирование представляет перспективное направление в оценке воздействия. Разработана аналитическая модель для анализа несущей способности зимних лесных дорог, которая сокращает количество необходимых расчетов и улучшает прогнозы грузоподъемности. **Karnaukhov et al. (2023)** [9] представили методологию расчета оптимальных параметров гусеничного лесного погрузчика.

Переходя к стратегиям минимизации воздействия, следует прежде всего рассмотреть оптимизацию конструкции техники. **Подрубалов и Мекедов (2023)** [23] предложили методы улучшения ключевых показателей колесных тракторов на склонах: блокировку дифференциала, понижение центра тяжести, использование шин с высокими проушинами, дополнительные стальные колеса и расширители.

Особого внимания заслуживает исследование **Makunina et al. (2023) [14]**, доказавшее эффективность трехосной компоновки скидеров. Установлено, что такое решение позволяет снизить удельное давление на грунт до 74,7 кПа против 102,8 кПа у двухосных аналогов, что существенно улучшает проходимость и уменьшает перегрузку задней оси в условиях ограниченной несущей

В контексте системного подхода к минимизации экологического воздействия представляет интерес комплексный анализ **Labelle et al. (2021) [11]**, выделивший три ключевых направления оптимизации:

- модификации машин (использование шин с высоким профилем и снижение давления в шинах)
- применение дополнительных средств защиты (щебеночные маты из остатков заготовки)
- совершенствование операционного планирования (внедрение карт проходимости с актуальными метеоданными)

Рассматривая вопросы энергоэффективности, следует отметить исследование **Prinz et al. (2023) [20]**, установившее прямую зависимость расхода топлива форвардеров от количества проходов по одному участку. Примечательно, что грузоподъемность машины не оказывает статистически значимого влияния на расход топлива, что смещает акцент на оптимизацию маршрутов движения.

Перспективным направлением развития лесной техники является внедрение гибридных силовых установок. **Šušnjar et al. (2023) [15]** на основе экспериментальных данных продемонстрировали потенциальную эффективность гибридных скидеров, способных значительно снизить расход топлива и выбросы загрязняющих веществ.

Среди альтернативных технологий **Mahura et al. (2023) [13]** подтвердили эффективность устройства «ходячие сани» для трелевки в сложных условиях болотистых местностей, которое сочетает преимущества скользящих и колесных движителей. **Nunes et al.**

(2023) [18] исследовали потенциал тяги животных как альтернативного метода восстановления остаточной древесной биомассы.

Лесоводственные методы также вносят значительный вклад в минимизацию воздействия. **Karami et al. (2022) [8]** исследовали среднесрочные эффекты двух методов лесоводства - метода однократного выбора и метода группового выбора - на характеристики почвы, показав, что метод однократного выбора вызывает меньшие нарушения. **Nieminen et al. (2023) [17]** изучили влияние непрерывного земледелия и одновозрастного лесоводства на нагрузку азотом и фосфором из лесных водосборных районов.

Завершая анализ воздействия, необходимо рассмотреть вопросы восстановления нарушенных почв. Исследования показывают, что процесс восстановления почв после механических воздействий требует значительного времени. **Karami et al. (2022) [8]** установили, что для восстановления почвы до условий до рубки требуется не менее 3 лет. **Startsev et al. (2022) [5]** отметили, что отрастание основных видов деревьев в первый год после рубки чрезвычайно неравномерно, а в зонах с сильным нарушением не наблюдается отрастания.

Проведенный анализ демонстрирует значительный прогресс в понимании воздействия лесозаготовительной техники на почвенные экосистемы и разработке стратегий его минимизации. Однако, несмотря на разнообразие рассмотренных подходов и методов, тема особенностей маневрирования колесных лесных машин и трелевочных систем на склонах слабонесущих почвогрунтов с учетом эффекта буксования остается недостаточно изученной и требует продолжения исследований.

Актуальность данной проблематики обусловлена необходимостью обеспечения устойчивого лесопользования в условиях сложного рельефа и ограниченной несущей способности грунтов. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на разработке комплексных моделей, учитывающих взаимовлияние конструктивных параметров

техники, почвенно-грунтовых условий и топографических особенностей территории, включая динамические аспекты взаимодействия движителей с грунтом при маневрировании на склонах.

Цель исследования - комплексное изучение взаимодействия колесных лесных машин с влажными слабонесущими почвогрунтами на склонах с учетом критического фактора - буксования движителей. Исследование направлено на разработку математических моделей и практических рекомендаций для минимизации деградации почв и обеспечения работоспособности трелевочных волоков в сложных условиях.

Материалы и методы

Для решения поставленных задач использовался комплекс методов математического моделирования и численного анализа. Основой исследования послужили разработанные авторами математические модели, описывающие взаимодействие лесных машин с почвогрунтами на склонах с учетом эффекта буксования.

Основой исследования послужила математическая модель, описывающая образование колеи и угловые отклонения при маневрировании:

$$h_k = a \left[\frac{p}{2\tau} (1 - \gamma)(1 + \sin 2\theta) \right]^{1/n}, \quad (1a)$$

откуда

$$\theta = 0,5 \arcsin \left[2\tau \frac{(h_k/a)^n}{p(1-\gamma)} - 1 \right]. \quad (16)$$

где:

- h_k - глубина колеи, м
- a - радиус контактной площадки, м
- p - вертикальное внешнее давление на почвогрунт, кПа
- τ - предел прочности на сдвиг, кПа
- γ - коэффициент бокового давления
- θ - угол отклонения трактора от заданного направления движения, рад
- n - коэффициент затухания волны напряжений сжатия

Уравнение угла маневрирования:

$$\theta = 0,5 \arcsin \left[2\tau \frac{(h_k/a)^n}{p(1-\gamma)} - 1 \right].$$

Параметры модели

Исходные данные и параметры исследования

Геометрические параметры:

- Вес лесной машины: $Q = 8$ т
- Длина опорной поверхности: $L = 0,42$ м
- Ширина опорной поверхности: $B = 0,73$ м
- Площадь контакта: $S = 0,3066$ м²
- Радиус контактной площадки: $a = 0,19-0,23$ м (в зависимости от влажности)

Параметры почвогрунта:

Исследовались два состояния влажности суглинки:

Состояние 1 ($W = 32\%$, $W/W_{г} = 0,78$):

Сцепление: $C = 10,9$ кПа

Угол внутреннего трения: $\varphi = 17,5^\circ$

Модуль общей деформации: $E = 700$ кПа

Коэффициент Пуассона: $\nu = 0,32$

Состояние 2 ($W = 41\%$, $W/W_{г} = 1,00$):

Сцепление: $C = 6,5$ кПа

Угол внутреннего трения: $\varphi = 13,3^\circ$

Модуль общей деформации: $E = 400$ кПа

Коэффициент Пуассона: $\nu = 0,41$

Диапазоны варьируемых параметров:

Угол наклона склона: $\alpha = 0-30^\circ$

Коэффициент буксования: $\delta = 0,02-0,32$

Допустимая глубина колеи: $h_{д} = 0,2-0,3$ м

Коэффициент деформации шины: $\eta = 0,93$

Коэффициент трения: $K_{тр} = 0,4-0,6$

Методика расчета

Расчеты проводились с использованием разработанного математического аппарата с последовательным определением:

1. Параметров прочности грунта для различных состояний влажности.
2. Критических давлений и сил сцепления при различных уровнях буксования.
3. Допустимых углов маневрирования с учетом ограничений по глубине колеи.
4. Анализ совместного влияния угла наклона склона и коэффициента буксования.

Все расчеты выполнялись с контролем выполнения условий прочности и сцепления, что обеспечивало физическую достоверность полученных результатов.

Результаты исследований

В результате проведенного математического моделирования и численного анализа получены количественные оценки влияния ключевых факторов на процесс взаимодействия лесных машин с почвогрунтами при маневрировании на склонах. Исследование позволило установить функциональные зависимости между параметрами почвогрунта, характеристиками лесных машин и условиями их эксплуатации, что обеспечивает научную основу для оптимизации технологических процессов лесозаготовок в сложных геотехнических условиях.

Проведена оценка диапазона изменения допустимого угла маневрирования θ_d в зависимости от параметра $K_t = \tau/p$ при фиксированном значении допустимой глубины колеи $h_d = a = 0,2$ м и коэффициенте Пуассона $\nu = 0,35$, характерном для слабонесущих влажных почвогрунтов (рисунок 1).

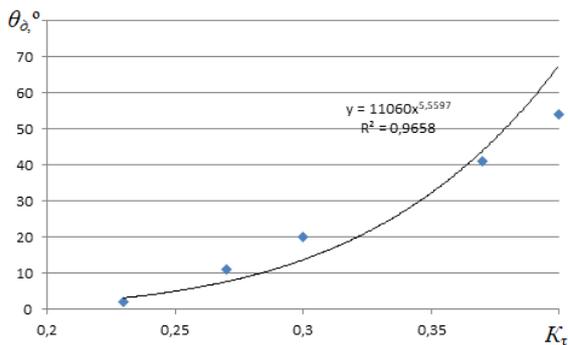


Рисунок 1. Зависимость предельного угла маневрирования от отношения предела прочности почвогрунта на сдвиг к величине вертикального давления

Figure 1. Dependence of the maximum maneuvering angle on the ratio of the shear strength of the soil to the vertical pressure

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Установлено, что зависимость $\theta_d(K_t)$ имеет параболический характер. Увеличение параметра K_t , соответствующее росту прочности

почвогрунта или снижению внешнего давления, позволяет существенно расширить диапазон допустимого маневрирования транспортного средства.

Механизм разрушения почвогрунта

Для условий работы на влажных почвогрунтах при $\nu = 0,35$ коэффициент бокового распора составляет $\gamma = 0,55$. Согласно моделям разрушения грунтов с внутренним трением [17-19], тангенциальные напряжения растяжения $\sigma_\theta = \gamma \sigma_h$ достигают 55% от вертикальных сжимающих напряжений $\sigma_h = p/(h/a)^n$.

Критерием разрушения принято условие, при котором максимальное напряжение сдвига $\sigma = 0,5(\sigma_h - \sigma_\theta)$ превышает предел прочности почвогрунта на сдвиг τ . Глубина h , удовлетворяющая данному условию, принимается в качестве расчетной глубины колеи h_k .

Коэффициент затухания напряжений при взаимодействии плоского отпечатка колеса с поверхностью склона составляет $n = 0,725$. Соответственно, показатель степени в уравнении роста глубины колеи равен $1/n = 1,4$. Данное значение отличается от коэффициента, равного 2, используемого в классических моделях образования колеи [22-26].

Указанное расхождение обусловлено учетом внутреннего трения массива почвогрунта и особенностей взаимодействия плоского участка фронта сжатия краевой зоны. Реализуемый механизм характеризуется менее интенсивным затуханием напряжений сжатия при погружении штампа, что приводит к увеличению зоны разрушения, глубины колеи h_k и расширению диапазона угла маневрирования θ .

Диапазон изменения угла θ_d составляет от 0 до 68°, при этом зависимость от параметра K_t имеет степенной характер с показателем степени более 5.

Для обеспечения работоспособности трелевочного волокна при глубине колеи не более $h_d = 0,2$ м допустимый угол маневрирования ограничен величиной 20°. При этом давление p на почвогрунт не должно превышать трехкратного значения предела прочности на сдвиг τ .

Для влажных почвогрунтов (супеси, суглинки) со средними значениями $\tau = 12-15$ кПа допустимый диапазон внешнего давления составляет $p = 36-45$ кПа. Снижение давления на 30-35% до 27-30 кПа (увеличение K_t с 0,3 до 0,37) позволяет расширить диапазон маневрирования в 2 раза - с 20° до 40° при сохранении ограничения по глубине колеи.

Исследования [3,10] демонстрируют зависимость параметров прочности от влажности

почвогрунта W и его положения на поверхности склона. Наиболее значительное снижение прочностных характеристик наблюдается при превышении влажностью 75% от предела текучести W_t .

В таблице 1 представлены показатели физико-механических свойств суглинки при $W_t = 41\%$ для двух состояний влажности.

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств влажного почвогрунта

Table 1

Indicators of physical and mechanical properties of wet soil

$W, \%$	W/W_t	Состояние почвогрунта	$C, \text{кПа}$	$\varphi, ^\circ$	$E, \text{кПа}$	ν
32	0,78	влажный	10,9	17,5	700	0,32
41	1,00	переувлажненный	6,5	13,3	400	0,41

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 2

Расчетные величины параметров давлений и пределов прочности почвогрунта на сдвиг

Table 2

Calculated values of pressure parameters and shear strength limits of the soil

$W, \%$	$P_\delta, \text{кПа}$	K_δ	$\Delta p, \text{кПа}$	$\tau, \text{кПа}$	$\Delta \tau, \text{кПа}$	$\tau_\delta, \text{кПа}$
32	24,15	1,02	0,37	18,54	11,05	7,49
41	15,24	1,61	9,28	12,42	8,77	3,65

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 3

Показатели предельного угла маневрирования при буксовании

Table 3

Indicators of the maximum maneuvering angle during skidding*

$W, \%$	$a, \text{м}$	$hk, \text{м}$	$hd, \text{м}$	$\theta_d, ^\circ (\delta=0,02)$	$\theta_d, ^\circ (\delta=0,12)$	$\theta_d, ^\circ (\delta=0,22)$	$\theta_d, ^\circ (\delta=0,32)$
32	0,19	0,16	0,20	17	15	13	11
41	0,23	0,24	0,30	22	19	17	15

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Способность почвогрунта сопротивляться сдвиговым нагрузкам при буксовании описывается зависимостью:

$$\tau(x) = \tau_{max} e^{-\mu x} = (C + ptg\varphi)e^{-\mu x}, \quad (3)$$

где

$\mu = \delta/\eta$; δ - коэффициент буксования;

η - коэффициент деформации шины.

Интегральная сила сцепления определяется выражением:

$$F_c = B \int_0^L \tau(x) dx. \quad (4)$$

Локальная величина силы сцепления в некоторой срединной точке \bar{x} интервала $[0, L]$:

$$F_c(\bar{x}) = BL \cdot \tau(\bar{x}). \quad (5)$$

Усредненное значение силы сцепления:

$$F_c = S(C + ptg\varphi)e^{-\mu L/2}. \quad (6)$$

Условие обеспечения эффективного сцепления:

$$F_c \geq F_{co} = Q(K_{тр} \cdot \cos\alpha + \sin\alpha) = pS(K_{тр} \cdot \cos\alpha + \sin\alpha), \quad (7)$$

где $K_{тр}$ – коэффициент трения шины о почвогрунт.

Критическое давление, при котором происходит потеря тягово-сцепных свойств:

$$p_{\delta} = \frac{ce^{-\mu L/2}}{(K_{тр} \cos\alpha + \sin\alpha) - tg\varphi \cdot e^{-\mu L/2}}. \quad (8)$$

На рисунке 2 представлены зависимости критерия $K_{\delta} = p/p_{\delta}$ от коэффициента буксования δ для двух состояний влажности.

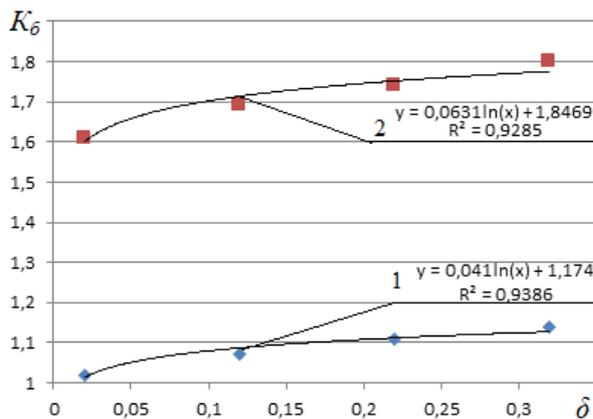


Рисунок 2. Влияние коэффициента буксования на критерий снижения тягово-сцепных свойств движителя:

1 - $W=32\%$; 2 - $W=41\%$

Figure 2. The effect of the slip coefficient on the criterion for reducing the traction properties of the propulsor

1 - $W=32\%$; 2 - $W=41\%$

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Полученные зависимости $K_{\delta}(\delta)$ имеют асимптотический характер, что свидетельствует о наибольшей эффективности буксования на

начальных стадиях процесса. Классификация уровня буксования: низкое ($\delta = 0,02$), среднее ($\delta = 0,12$), сильное ($\delta = 0,22$) и очень сильное ($\delta = 0,32$).

При переходе влажности от $0,75W_t$ до W_t превышение внешнего давления p над допустимым уровнем p_{δ} увеличивается на 55-60%.

В таблице 2 представлены расчетные параметры для условий буксования при $\delta = 0,02$.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном снижении тягово-сцепных свойств при работе на крутых склонах со слабонесущими переувлажненными почвогрунтами, когда даже внешнее давление $p = 20-30$ кПа приводит к потере сцепления с поверхностью движения.

Обсуждение

Проведенный анализ данных таблицы 2 демонстрирует существенное влияние буксования на прочностные характеристики почвогрунта. Установлено, что буксование лесной машины на крутом склоне, сложенном влажными почвогрунтами, приводит к снижению предела прочности на сдвиг с $\tau = 18,54$ кПа до $\tau_{\delta} = 7,49$ кПа, что соответствует уменьшению на $\Delta\tau = 11,05$ кПа или 60%.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном снижении тягово-сцепных свойств движителя уже на начальной стадии буксования. Сравнительный анализ показывает, что при увеличении влажности с $W = 32\%$ до $W = 41\%$ величина τ снижается на 50% (с 18,54 до 12,42 кПа), тогда как при учете эффекта буксования наблюдается двукратное снижение τ_{δ} .

Согласно данным работы [20], при работе на оттаивающих почвогрунтах, склонных к солифлюкции, наблюдается пятикратное снижение параметров прочности: сцепления до 4,1 кПа и угла внутреннего трения до $\varphi = 4,25^\circ$. При внешнем давлении $p \approx 30$ кПа это обуславливает снижение τ до 6-7 кПа даже при отсутствии буксования.

Расчеты показывают, что комбинированное воздействие эффектов буксования и солифлюкции на многолетнемерзлых почвогрунтах приводит к дополнительному двукратному снижению

сопротивления сдвиговым нагрузкам до 3-3,5 кПа. Данное обстоятельство требует ограничения нагрузок на поверхность склона величиной 10 кПа и широкого применения лебедочных систем для перемещения груженых лесных машин.

На рисунке 3 представлена зависимость предела прочности почвогрунта на сдвиг от коэффициента буксования при $W = 32\%$ без учета эффекта солифлюкции.

Анализ рисунка 3а показывает, что влияние буксования на снижение τ проявляется немедленно на начальной стадии процесса, приводя к многократному снижению τ до уровней $\tau_b \approx 7,5$ кПа. При дальнейшем увеличении буксования от среднего ($\delta = 0,12$) до сильного и очень сильного ($\delta = 0,32$) наблюдается дополнительное снижение τ_b по линейному закону (рисунок 3б).

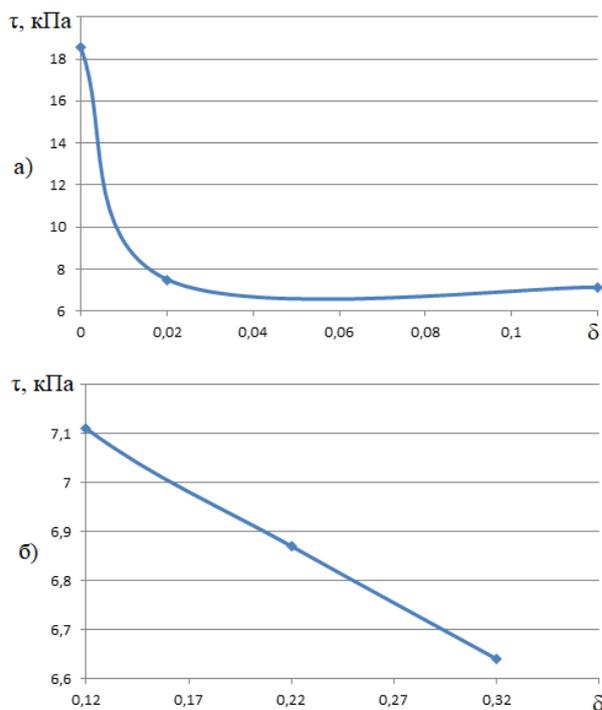


Рисунок 3. Зависимость предела почвогрунта прочности на сдвиг при уровне буксования:

а) низком и среднем; б) сильном и очень сильном
Figure 3. Dependence of the soil shear strength limit at the level of slipping:

a) low and medium; b) strong and very strong

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Сводный анализ результатов

Полученные значения $\tau_b = 6,7-7,5$ кПа приблизительно в три раза меньше исходной величины вертикального давления $p = 24,52$ кПа, что согласуется с выводами, полученными при анализе данных рисунка 1, о существовании верхних ограничений внешнего давления при работе на крутых склонах с влажными слабонесущими почвогрунтами.

Сравнительный анализ с данными таблицы 2 позволяет утверждать, что фактор буксования на начальной стадии является значимым при оценке тягово-сцепных свойств движителя в процессе маневрирования. Необходимо учитывать границы допустимых отклонений от заданной траектории движения для обеспечения проектной работоспособности трассы [24,25].

В таблице 3 представлены расчетные значения θ_d при различных коэффициентах буксования для лесной машины весом $Q = 8$ т.

Радиус контактной площадки a и глубина колеи h_k определены в соответствии с математическими моделями [17-20] и методическими рекомендациями [21]. При изменении параметра Q величина a изменяется пропорционально $\sqrt[3]{Q}$.

Для переходного состояния влажности почвогрунта ($W > 0,75W_t$) в качестве прогнозного значения принята глубина $h_d = 0,2$ м. При достижении влажностью предела текучести ($W \approx W_t$) расчетная глубина колеи h_k превышает 0,2 м и достигает 0,3 м и более, поэтому для данных условий принято $h_d = 0,3$ м.

На рисунке 4 представлено относительное снижение $\Delta\theta$ от δ для двух состояний влажности почвогрунта.

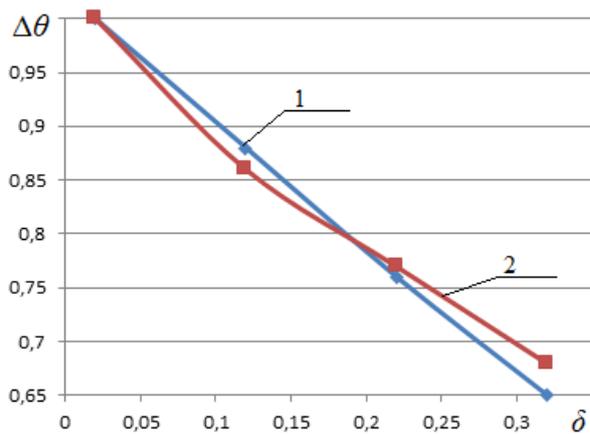


Рисунок 4. Влияние буксования на относительные изменения допустимого угла маневрирования лесной машины на склоне:
1 - $W=32\%$; 2 - $W=41\%$

Figure 4. The effect of skidding on relative changes in the permissible maneuvering angle of a forest vehicle on a slope:
1 - $W=32\%$; 2 - $W=41\%$

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

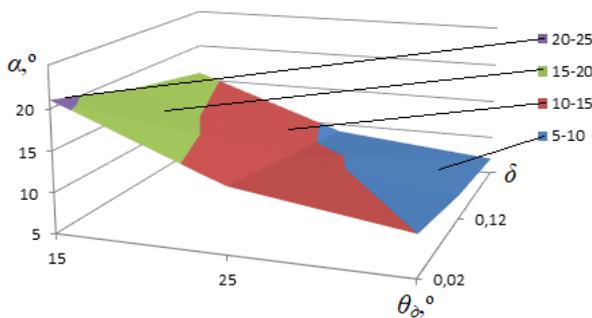


Рисунок 5. Совместное влияние угла наклона склона и уровня буксования на допустимый угол маневрирования лесной машины при $W=32\%$
Figure 5. The combined effect of the slope angle and the level of skidding on the permissible maneuvering angle of a forest vehicle at $W=32\%$

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Несмотря на различия абсолютных значений θ_{δ} , относительные изменения допустимого угла маневрирования $\Delta\theta$ в процессе буксования демонстрируют незначительную зависимость от влажности - графики функций $\theta_{\delta}(\delta)$ практически совпадают.

На рисунке 5 представлено совместное влияние угла наклона склона α и коэффициента буксования δ на угловой параметр θ_{δ} при $W = 32\%$.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости ограничения маневрирования на очень крутых склонах ($\alpha > 30^\circ$) величиной $\theta_{\delta} = 5-10^\circ$ при любом уровне буксования, что предполагает преимущественно прямолинейное движение для обеспечения заданной глубины колеи $h_{\delta} = 0,2$ м.

На крутых склонах ($\alpha > 20^\circ$) допустимый диапазон маневрирования увеличивается до $10-15^\circ$, а на покатых склонах - до $15-20^\circ$. На пологих и покатых склонах при $\alpha \leq 15^\circ$ и низком уровне буксования допускается маневрирование с углами $20-25^\circ$.

Анализ уравнения (16) показывает эквивалентность влияния вертикального давления p и предела прочности на сдвиг τ на угол θ через параметр $K_{\tau} = \tau/p$. Увеличение веса лесной машины Q и, соответственно, давления p эквивалентно снижению величины τ в процессе буксования.

Следует особо отметить, что при снижении сопротивления почвогрунта сдвиговым разрушениям до уровня $3,5-5$ кПа нагрузка на пятно контакта с двигателем не должна превышать $10-15$ кПа.

Выводы

Таким образом, проведенное исследование позволило установить количественные зависимости и разработать практические рекомендации по оптимизации маневрирования лесных машин на слабонесущих почвогрунтах склонов с учетом эффекта буксования:

1. Установлено, что даже начальная стадия буксования ($\delta = 0,02$) приводит к снижению предела прочности почвогрунта на сдвиг на 60% - с $18,54$ кПа до $7,49$ кПа. При увеличении влажности до предела текучести ($W = 41\%$) наблюдается дополнительное снижение прочности на 50% .
2. Определено, что при работе на переувлажненных почвогрунтах внешнее давление не должно превышать $10-15$ кПа,

- а совместное проявление эффектов буксования и солифлюкции снижает сопротивление сдвиговым нагрузкам до 3-3,5 кПа.
3. Разработана классификация допустимых углов маневрирования в зависимости от крутизны склона и уровня буксования:
 - На очень крутых склонах ($\alpha > 30^\circ$): $\theta_d = 5-10^\circ$
 - На крутых склонах ($\alpha > 20^\circ$): $\theta_d = 10-15^\circ$
 - На покатых склонах: $\theta_d = 15-20^\circ$
 - На пологих склонах ($\alpha \leq 15^\circ$): $\theta_d = 20-25^\circ$
 4. Полученные результаты позволяют научно обосновать ограничения при разработке технологических карт лесосечных работ и выбрать оптимальные траектории движения

лесных машин в сложных геотехнических условиях.

Однако, несмотря на разнообразие рассмотренных подходов и полученных результатов, тема особенностей маневрирования колесных лесных машин и трелевочных систем на склонах слабонесущих почвогрунтов с учетом эффекта буксования остается актуальной и требует продолжения исследований, особенно в области разработки адаптивных систем управления и оптимизации конструктивных параметров движителей для работы в сложных геотехнических условиях.

Список литературы

1. Abelev A., Merrick T., Liang R., Vermillion M., Li R.-R., Buma W., and Swanson C.: Torque-Weighted Index Soil Strength Test (TWISSST) for vegetated terrain, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-8418, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8418>, 2023.
2. Baek K., Lee E., Choi H., Cho M., Choi Y., & Han S. Impact on Soil Physical Properties Related to a High Mechanization Level in the Row Thinning of a Korean Pine Stand. *Land*. 2022; 11 (3): 329. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land11030329>.
3. Bragar E., Pronozin Y., Zhussupbekov A., Gerber A., Sarsembayeva A., Muzdybayeva T., & Sarabekova U. Z. Evaluation of the Strength Characteristics of Silty-Clayey Soils during Freezing-Thawing Cycles. *Applied Sciences*. 2022; 12 (2): 802. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020802>.
4. Catherine Collet, Chloé Agro, Emila Akroume et al. Mechanical site preparation impacts on soil structural quality in a forest plantation depend on soil moisture and excavator size, 19 June 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4480823/v1>].
5. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M. et al. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Sc.* 2022; 55: 1633–1646. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>.
6. Erktan A., Or D., & Scheu S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions. *Soil Biology and Biochemistry*. 2020; 148: 107876. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107876>.
7. Germer K., Shafiullah A. Z., Peters A., Kraft M., Weise M., Rolfes L., & Lorenz M. Field traffic loads on a silty farm site cause shifting and narrowing of soil pore size distribution. *Soil and Tillage Research*. 2025; 248: 106425. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106425>.
8. Karami S., Latterini F., Jourgholami M. et al. The medium-term effects of forest operations on a mixed broadleaf forest: Changes in soil properties and loss of nutrients. *Land Degradation & Development*. 2023; 34 (10): 2961–2974. – DOI: 10.1002/ldr.4660.
9. Karnaukhov I., Babin V., Ivanov A., Romanenko M., Serebrennikov Y. Optimization of hydraulic drive parameters of caterpillar forest loader. *E3S Web of Conferences*. 2024; 525: 06013. – DOI: 10.1051/e3sconf/202452506013.
10. Katarov V., Syunev V., & Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation. *Forests*. 2022; 13 (10): 1538. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101538>.
11. Labelle E. R., Borchert H., Aurenhammer P. K., Breinig L., & Spinelli R. Effect of season and machine type on performance of semi- and fully-mechanized harvesting systems in beech-dominated stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2024; 45 (2): 237–252. – DOI: 10.5552/crojfe.2024.2281.

12. Latterini F., Venanzi R., Papa I., Đuka A., & Picchio R. A meta-analysis to evaluate the reliability of depth-to-water maps in predicting areas particularly sensitive to machinery-induced soil disturbance. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2024; 45 (2): 433–444. – DOI: 10.5552/crojfe.2024.2559.
13. Mahura B., Bakay B., Bilous O., Karatnyk I., & Kiy V. Determining the optimal angle of traction force application of a «walking sledge» skidding device. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2023; 101 (2): 121-128.
14. Makunina Y. S., Dolmatov S. N., & Kolesnikov P. G. Operation of wheel skidders in conditions of insufficient ground bearing capacity. In A. A. Radionov & V. R. Gasiyarov (Eds.), *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023)*. Springer Cham; 2023. p. 122–130. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3>.
15. Mergl V., Pandur Z., Klepárník J., Kopscak H., Bačić M., & Šušnjar M. Technical solutions of forest machine hybridization. *Energies*. 2021; 14 (10): 2793. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102793>.
16. Muhdi, Lubis L. M., Purba B., Lintang D. P. S., Zaitunah A., Sahar A., & Hanafiah D. S. The effect of skidding by excavator on soil compaction in the industrial plantation forest of PT Toba Pulp Lestari, North Sumatra, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 977 (1): 012093. – DOI: 10.1088/1755-1315/977/1/012093.
17. Nieminen M., Pukkala T., Stenberg L., Sarkkola S., Vihonen A., & Valkeapää A. Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vaikutus metsäisten valuma-alueiden vesistökuormitukseen Suomessa. *Metsätieteen aikakauskirja*. 2023; 2023 (4): 22001. – DOI: 10.14214/ma.22001.
18. Nunes L. J. R., Nogueira J., Rodrigues J. B., Azevedo J. C., Oliveira E., de Figueiredo T., & Picos J. Modern Animal Traction to Enhance the Supply Chain of Residual Biomass. *AgriEngineering*. 2023; 5 (2): 1039-1050. – DOI: 10.3390/agriengineering5020065.
19. Presecan M. F., Forkuo G. O., & Borz S. A. Soil Compaction Induced by Three Timber Extraction Options: A Controlled Experiment on Penetration Resistance on Silty-Loamy Soils. *Applied Sciences*. 2024; 14 (12): 5117. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app14125117>.
20. Prinz A., Engebretsen M., Gjosæter T., Møller-Pedersen B., & Xanthopoulou T. D. Models, systems, and descriptions: A cross-disciplinary reflection on models. *Frontiers in Computer Science*. 2023; 5: 1031807. – DOI: 10.3389/fcomp.2023.1031807.
21. Riggert R., Fleige H., & Horn R. An assessment scheme for soil degradation caused by forestry machinery on skid trails in Germany. *Soil Science Society of America Journal*. 2019; 83 (S1): S1–S12. – DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0255>.
22. Петросян С.С., Ильюшенко Д.А., Барышникова Е.В. и др. Оценка экологической совместимости колесных трелевочных тракторов с пачковым захватом с почвенно-грунтовыми условиями. *Известия СПбЛТА*. – 2022. – № 238. – С. 124-136. – DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.124-136.
23. Подрубалов М.В., Мехедов М.А. Особенности конструкции тракторов для работы на склонах. *Наука в Центральной России*. – 2023. – Т. 62, № 2. – С. 148-153. – DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-148-153>.
24. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом / Е. Г. Хитров, И. С. Должиков, А. С. Дмитриев [и др.]. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2023. – № 5(395). – С. 126-134. – DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-126-134.
25. Шапиро В.Я., Новиков М.С., Григорьев И.В., Перфильев П.Н., Тихонов Е.А., Друзьянова В.П. Оценка работоспособности трасс движения лесных машин на склоне оттаивающего почвогрунта с учетом маневрирования движителя. *Хвойные бореальной зоны*. – 2025. – Т. 43, № 2. – С. 77-84.

References

1. Abelev A., Merrick T., Liang R., Vermillion M., Li R.-R., Buma W., and Swanson C. Torque-Weighted Index Soil Strength Test (TWISST) for vegetated terrain. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-8418. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8418>.
2. Baek K., Lee E., Choi H., Cho M., Choi Y., and Han S. Impact on Soil Physical Properties Related to a High Mechanization Level in the Row Thinning of a Korean Pine Stand. *Land*. 2022; 11 (3): 329. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11030329>.
3. Bragar E., Pronozin Y., Zhussupbekov A., Gerber A., Sarsembayeva A., Muzdybayeva T., and Sarabekova U. Z. Evaluation of the Strength Characteristics of Silty-Clayey Soils during Freezing-Thawing Cycles. *Applied Sciences*. 2022; 12 (2): 802. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020802>.
4. Collet C., Agro C., Akroume E. et al. Mechanical site preparation impacts on soil structural quality in a forest plantation depend on soil moisture and excavator size. 19 June 2024. PREPRINT (Version 1) available at Research Square. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4480823/v1>.
5. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M. et al. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Sc.* 2022; 55: 1633–1646. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>.
6. Erktan A., Or D., and Scheu S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions. *Soil Biology and Biochemistry*. 2020; 148: 107876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107876>.
7. Germer K., Shafiullah A. Z., Peters A., Kraft M., Weise M., Rolfes L., and Lorenz M. Field traffic loads on a silty farm site cause shifting and narrowing of soil pore size distribution. *Soil and Tillage Research*. 2025; 248: 106425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106425>.
8. Karami S., Latterini F., Jourgholami M. et al. The medium-term effects of forest operations on a mixed broadleaf forest: Changes in soil properties and loss of nutrients. *Land Degradation & Development*. 2023; 34 (10): 2961–2974. DOI: 10.1002/ldr.4660.
9. Karnaukhov I., Babin V., Ivanov A., Romanenko M., and Serebrennikov Y. Optimization of hydraulic drive parameters of caterpillar forest loader. *E3S Web of Conferences*. 2024; 525: 06013. DOI: 10.1051/e3sconf/202452506013.
10. Katarov V., Syunev V., and Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation. *Forests*. 2022; 13 (10): 1538. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101538>.
11. Labelle E. R., Borchert H., Aurenhammer P. K., Breinig L., and Spinelli R. Effect of season and machine type on performance of semi- and fully-mechanized harvesting systems in beech-dominated stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2024; 45 (2): 237–252. DOI: 10.5552/crojfe.2024.2281.
12. Latterini F., Venanzi R., Papa I., Duka A., and Picchio R. A meta-analysis to evaluate the reliability of depth-to-water maps in predicting areas particularly sensitive to machinery-induced soil disturbance. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2024; 45 (2): 433–444. DOI: 10.5552/crojfe.2024.2559.
13. Mahura B., Bakay B., Bilous O., Karatnyk I., and Kiy V. Determining the optimal angle of traction force application of a "walking sledge" skidding device. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2023; 101 (2): 121-128.
14. Makunina Y. S., Dolmatov S. N., and Kolesnikov P. G. Operation of wheel skidders in conditions of insufficient ground bearing capacity. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R., editors. *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023)*. Springer Cham; 2023. p. 122–130. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3>.
15. Mergl V., Pandur Z., Kleparnik J., Korseak H., Bacic M., and Susnjar M. Technical solutions of forest machine hybridization. *Energies*. 2021; 14 (10): 2793. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102793>.
16. Muhdi, Lubis L. M., Purba B., Lintang D. P. S., Zaitunah A., Sahar A., and Hanafiah D. S. The effect of skidding by excavator on soil compaction in the industrial plantation forest of PT Toba Pulp Lestari, North Sumatra, Indonesia.

- IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022; 977 (1): 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/977/1/012093.
17. Nieminen M., Pukkala T., Stenberg L., Sarkkola S., Vihonen A., and Valkeapaa A. Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vaikutus metsäisten valuma-alueiden vesistökuormitukseen Suomessa. *Metsätieteen aikakauskirja*. 2023; 2023 (4): 22001. DOI: 10.14214/ma.22001.
 18. Nunes L. J. R., Nogueira J., Rodrigues J. B., Azevedo J. C., Oliveira E., de Figueiredo T., and Picos J. Modern Animal Traction to Enhance the Supply Chain of Residual Biomass. *AgriEngineering*. 2023; 5 (2): 1039-1050. DOI: 10.3390/agriengineering5020065.
 19. Presecan M. F., Forkuo G. O., and Borz S. A. Soil Compaction Induced by Three Timber Extraction Options: A Controlled Experiment on Penetration Resistance on Silty-Loamy Soils. *Applied Sciences*. 2024; 14 (12): 5117. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14125117>.
 20. Prinz A., Engebretsen M., Gjosæter T., Møller-Pedersen B., and Xanthopoulou T. D. Models, systems, and descriptions: A cross-disciplinary reflection on models. *Frontiers in Computer Science*. 2023; 5: 1031807. DOI: 10.3389/fcomp.2023.1031807.
 21. Riggert R., Fleige H., and Horn R. An assessment scheme for soil degradation caused by forestry machinery on skid trails in Germany. *Soil Science Society of America Journal*. 2019; 83 (S1): S1–S12. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0255>.
 22. Petrosyan S.S., Piyushenko D.A., Baryshnikova E.V. et al. Otsenka ekologicheskoy sovместимости kolesnykh trelevochnykh traktorov s pachkovym zakhvatom s pochvenno-gruntovymi usloviyami [Assessment of environmental compatibility of wheeled skidders with grapple with soil conditions]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = Bulletin of Saint Petersburg State Forest Technical Academy*. 2022; 238: 124-136. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.124-136.
 23. Podrubalov M.V., Mekhedov M.A. Osobennosti konstruksii traktorov dlya raboty na sklonakh [Features of the design of tractors for work on slopes]. *Nauka v Tsentral'noy Rossii = Science in Central Russia*. 2023; 62 (2): 148-153. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-148-153>.
 24. Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Dmitriev A.S. et al. Raschet koeffitsienta stsepleniya kolesnogo dvizhitelya lesnoy mashiny s pochvyogruntom [Calculation of the coefficient of adhesion of the wheeled mover of a forest machine with soil]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2023; 5 (395): 126-134. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-126-134.
 25. Shapiro V.Ya., Novikov M.S., Grigor'ev I.V., Perfil'ev P.N., Tikhonov E.A., Druzyanova V.P. Otsenka rabotosposobnosti trass dvizheniya lesnykh mashin na sklone ottayvayushchego pochvyogrunta s uchetom manevrirovaniya dvizhitelya [Assessment of the performance of forest machine routes on a slope of thawing soil taking into account the maneuvering of the mover]. *Khvoynyye boreal'noy zony = Conifers of the boreal area*. 2025; 43 (2): 77-84. (In Russ.).

Сведения об авторах

Шapiro 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.

✉ *Рыжов Ярослав Андреевич* – аспирант кафедры Промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>, e-mail: irosmagelav@mail.ru.

Тихонов Евгений Андреевич – 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.

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.

Египко Сергей Владимирович – 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/0000-0001-8356-7026>, e-mail: egipko_s@mail.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.

✉ *Yaroslav A. Ryzhov* – graduate student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>, e-mail: irosmagelav@mail.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.

Pavel N. Perfilev – 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.

Sergey V. Eypko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Environmental Management Machines» A.K. Kortunov Novochoerkassk Engineering and Reclamation Institute - branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8356-7026>, e-mail: egipko_s@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author