ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья
УДК 630*372/375
DOI: 10.37482/0536-1036-2026-5-107-126

Динамическое взаимодействие многоосной колесной лесной машины с препятствиями на слабонесущих почвогрунтах

В.Я. Шапиро*[1]*, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: AAC-9658-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6344-1239
И.В. Григорьев*[2]✉*, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: S-7085-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5574-1725
Е.В. Сибиряткин*[3]*, аспирант; ResearcherID: PUE-0146-2026, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0475-612X
Е.А. Тихонов*[4]*, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: E-9342-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2136-3268
С.И. Ревяко*[5]*, канд. техн. наук, доц.; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5337-8531
[1]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия; shapiro54vlad@mail.ru
[2]Арктический государственный агротехнологический университет, г. Якутск, Россия; silver73@inbox.ru✉
[3]Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия; jey-sib@mail.ru
[4]Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия; tihonov@petrsu.ru
[5]Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, г. Новочеркасск, Россия; revyako77@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.26 / Одобрена после рецензирования 15.07.26 / Принята к печати 17.07.26

Аннотация. Поверхность движения лесных машин изначально, до первого прохода, имеет микрорельеф, обусловленный наличием случайным образом расположенных камней, пней, кочек и т. п. При разрубке трасс трелевочных волоков пни должны спиливаться заподлицо с землей, чтобы не мешать движению лесных машин. Но при машинной заготовке древесины и разрубке трасс пасечных трелевочных волоков лесозаготовительной машиной выполнить это требование не всегда возможно технически. Кроме того, в связи с существенным различием плотности и прочности почвогрунта естественного сложения и пней (камней) с первого прохода движения лесной машины по трелевочному волоку (особенно в теплое время года) наблюдаются эффект существенно различного деформирования поверхности движения и образование крупных неровностей по длине колеи. В результате профиль поверхности колеи напоминает гребенку, неровности которой расположены случайным образом. Особенно быстро этот эффект проявляется при работе колесных лесных машин. Целью исследования стало предложить математическую модель деформирования влажного слоя почвогрунта в результате циклических динамических нагрузок. Предполагается, что модель должна учитывать закономерности

© Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Сибиряткин Е.В., Тихонов Е.А., Ревяко С.И., 2026
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

изменения его влажности и, как следствие, прочностных и упругопластических характеристик, влияющих на процесс образования колеи вдоль содержащей значительные по высоте препятствия трассы движения лесной машины. Полученные в ходе расчетов параметры взаимодействия многоосной колесной машины со слабонесущими почвогрунтами повышенной влажности и их упрочнения обеспечивают надежный прогноз эффективных параметров трелевки. Даны практические рекомендации и обоснована необходимость оснащения колесных пар колесными гусеницами в сложных геотехнических условиях трелевки для достижения высокой производительности лесной машины. Результаты настоящего исследования показали упрочение почвогрунта за счет удаления из него жидкости под действием движителя лесной машины. Данный эффект способствует замедлению роста глубины колеи.

Ключевые слова: лесозаготовки, колесные лесные машины, трелевочные системы, деформация почвогрунта, древесные пни, трелевочные волоки

Финансирование: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета за счет гранта РНФ № 26-16-00047, https://rscf.ru/project/26-16-00047/.

Для цитирования: Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Сибиряткин Е.В., Тихонов Е.А., Ревяко С.И. Динамическое взаимодействие многоосной колесной лесной машины с препятствиями на слабонесущих почвогрунтах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 5. С. 107–126. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-5-107-126

Original article

Dynamic Interference of a Multiaxial Wheeled Forestry Machine with Obstacles on Weakly Bearing Soils

Vladimir Ya. Shapiro*[1]*, *Doctor of Engineering, Prof.;* ResearcherID: AAC-9658-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6344-1239
Igor V. Grigorev*[2]✉*, *Doctor of Engineering, Prof.;* ResearcherID: S-7085-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5574-1725
Evgeniy V. Sibiryatkin*[3]*, *Postgraduate Student;* ResearcherID: PUE-0146-2026, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0475-612X
Evgeny A. Tihonov*[4]*, *Doctor of Engineering, Prof.;* ResearcherID: E-9342-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2136-3268
Sergey I. Revyako*[5]*, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;* ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5337-8531
[1]Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, Russia; shapiro54vlad@mail.ru
[2]Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russia; silver73@inbox.ru✉
[3]Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia; jey-sib@mail.ru
[4]Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia; tihonov@petrsu.ru
[5]Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – A Branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russia; revyako77@mail.ru

Received on April 20, 2026 / Approved after reviewing on July 15, 2026 / Accepted on July 17, 2026

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

Abstract. Before the first pass, the surface traversed by forestry machines initially exhibits a specific micro-relief resulting from the presence of randomly distributed stones, stumps, hummocks, etc. Stumps must be cut flush with the ground when clearing skidding trails in order to avoid obstruction of the movement of forest machines. However, meeting this requirement is not always technically feasible during machinery-based timber harvesting and clearing skidding trails with logging machines. Moreover, there is a significant difference in the track surface deformation and the formation of large obstacles along the track length due to the considerable variations in density and strength between the naturally layered soil and stumps (stones), beginning with the first pass of a forestry machine along the skidding trail (especially in hot season). As a result, the track surface profile resembles a comb, with the ridges arranged randomly. This effect becomes apparent particularly quickly when operating wheeled forestry machines. The research aimed to propose a mathematical model of the moist soil layer deformation under cyclic dynamic loads. It is assumed that the model should consider the fluctuations in its moisture content and, consequently, strength and elastic and plastic behavior that influence the rutting along a forest machine's route, which contains significantly high obstacles. The parameters received through calculations of the interaction between a multiaxial wheeled machine and low-bearing-capacity soils with high moisture content, as well as the consolidation of these soils, provide a reliable essement of effective skidding parameters. This paper provides practical recommendations and justifies the need to equip wheel pairs with wheeled caterpillar tracks in challenging ground conditions for skidding operations in order to achieve high productivity of forest machines. The findings showed that the soil had been strengthened by the removal of liquid from it caused by the movement of a forest machine. This effect helps slow down the increase in rut depth.

Keywords: logging, wheeled forestry machines, skidding systems, soil deformation, tree stumps, skidding trails

Funding: The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative Solutions in the Logging Industry and Forestry" of the Arctic State Agrotechnological University and financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 26-16-00047, https://rscf.ru/project/26-16-00047/.

For citation: Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Sibiryatkin E.V., Tihonov E.A., Revyako S.I. Dynamic Interference of a Multiaxial Wheeled Forestry Machine with Obstacles on Weakly Bearing Soils. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 5, pp. 107–126. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-5-107-126

Введение

Технологическая производительность колесных лесных машин, в частности форвардеров, во многом зависит от их грузоподъемности и проходимости в сложных геотехнических условиях эксплуатации [4, 5, 19, 20, 28, 40, 41], когда в границах колеи трелевочного волока на переувлажненных слабонесущих почвогрунтах могут наблюдаться либо высокие природные амплитуды профиля трассы, либо различного рода препятствия – валуны, пни и др.

Производители форвардеров устанавливают рекомендуемую грузоподъемность для каждой модели машины, однако эти рекомендации соответствуют общепринятым условиям эксплуатации [4, 5, 13, 14, 18, 20], например безударным нагрузкам, умеренной влажности почвогрунтов и их удовлетворительной несущей способности.

При ухудшении условий работы загрузку форвардера снижают на 15–20 % и более, что приводит к соответствующему уменьшению его производи-

тельности и эффективности лесосечных работ, увеличению удельной энергоемкости [30, 43].

Натурное обследование трелевочного волока показало, что глубины деформаций почвогрунта, в частности после твердых препятствий в колее, больше в сторону грузового хода форвардеров (рис. 1) и после глубокой просадки движителя при сходе с твердого препятствия поверхность колеи плавно поднимается и выходит на уровень, характерный для нормального (безударного) деформирования поверхности.

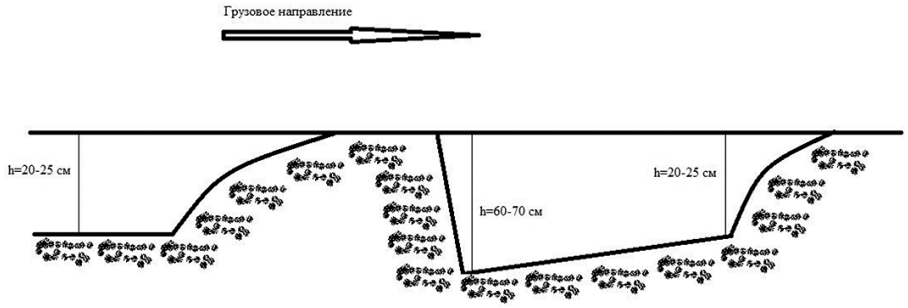


Рис. 1. Результаты натурного обследования поверхности колеи трелевочного волока (h – глубина колеи)

Fig. 1. Results of a field survey of the rut surface on a skidding trail (h – track depth)

Количество препятствий в колее трелевочного волока зависит от множества факторов, основными из которых являются таксационные характеристики древостоя (не считая участков леса с большим количеством камней). В работе [6] в качестве таких препятствий указано число 60 пней на 300 м трелевочного волока. Однако не ясно, имеются ввиду только пни, попадающие в колею, или также пни, встречающиеся в межколейном пространстве.

Зная средний запас леса и средний объем хлыста, можно вычислить примерное количество деревьев на единице площади лесосеки. Зная площадь колей от движителей лесных машин, при допущении о равномерном распределении деревьев на лесосеке, можно определить примерное количество пней, которые будут встречены движителем лесной машины при проходе по колее трелевочного волока.

С ростом древостоя запас леса на единице площади лесного участка повышается, но при этом количество стволов снижается [3, 9–12, 22]. Это позволяет обоснованно предположить:

Во-первых, при проведении рубок ухода за лесом, например, прореживаний, движитель машины встретит в колеях трелевочного волока большее количество пней, чем при рубке спелых и перестойных лесных насаждений (на одном и том же лесном участке). Следовательно, частота колебаний машины от наезда на пни в колее трелевочного волока и съезда с них при проведении рубок ухода за лесом будет больше, чем при проведении рубок спелых и перестойных насаждений. Данное утверждение справедливо, если скорости биологической деструкции пней достаточно, чтобы пни от срубленных при проведении рубок ухода деревьев разложились до начала рубок спелых и перестойных насаждений. Этому будет способствовать то, что подвергнутые механической деструкции от воздействия движителей лесной машины пни на волоке, как правило, разлагаются быстрее пней, оставленных на полупасеках.

Во-вторых, размеры встречаемых движителем лесной машины в колеях трелевочного волока пней при проведении рубок ухода за лесом будут меньше по сравнению с размерами пней при рубках спелых и перестойных лесных насаждений (на одном и том же лесном участке).

При выполнении лесосечных работ машинным способом – по скандинавской технологии – наиболее распространенным в настоящее время в мире, высота оставляемых харвестером пней зависит от диаметра деревьев и оптимальности подбора харвестерной головки под таксационные характеристики насаждения [32–34]. Часто у крупных деревьев встречается развитая закомелистость, что делает сложным, а часто и невозможным снижение высоты пня до рекомендуемого – не выше 1/3 диаметра дерева и не более 10 см в высоту. При натурном осмотре лесосек после их разработки системой машин харвестер + форвардер можно встретить пни до 0,5 м, а иногда и более [31]. Причем просматривается закономерность, что высокие пни остаются после деревьев больших диаметров.

В свою очередь, это означает, что амплитуда колебаний машины от наезда на пни в колее трелевочного волока и съезда с них при проведении рубок ухода за лесом будет меньше, чем при рубках спелых и перестойных насаждений (на одном и том же лесном участке).

В работе [6] указаны примеры размеров пней, встречаемых лесной машиной при осуществлении рубок спелых и перестойных насаждений на волоках, где работали колесные лесозаготовительные машины: средняя высота до и после трелевки была 22 и 29 см соответственно, среднеквадратичные отклонения соответственно равны 7,8 и 8,7 см, максимальная высота составила 45 см до трелевки и 52 см после, среднее расстояние между пнями по обеим колеям – 5 м. Данный пример является ориентировочным единичным случаем, поскольку таксационные характеристики лесных участков имеют очень большую вариацию. Но из него хорошо виден процесс «роста» пней на волоке, как в колеях, так и в межколейном пространстве, связанный с углублением колеи. К сожалению, ни в базовый, ни в продвинутый уровень подготовки операторов лесозаготовительных машин этот аспект обычно не входит [39, 42, 45]. Кроме того, в разнотравных типах леса, а также при глубоком снеге, в темное время суток реальные размеры оставляемых пней видны нечетко, даже при очень хорошей системе освещения рабочей зоны вокруг машины [46]. Это усложняет работу трелевочной техники, иногда становится причиной конфликтов между операторами харвестеров и форвардеров, поскольку харвестер не сталкивается с эффектом «роста» пней, а форвардер – почти постоянно.

Причем, чем большее количество рейсов, например из-за снижения объема собираемой пачки, приходится делать форвардеру, тем больше негативных последствий дает этот эффект, во многом взаимосвязанный с грузооборотом волока, если считать как вес трелюемой древесины, так и вес трелевочного трактора [14, 15, 25]. При заглублении колеи более 70 % от клиренса машины из-за динамики ходовой части ее элементы могут ударяться о препятствия на трассе волока, большинство из которых – пни, что существенно увеличивает количество поломок машины. В дальнейшем углубление колеи приводит к полной потере работоспособности трелевочного волока – когда глубина колеи сравнивается с клиренсом трелевочного волока.

Причем нарезать рядом дублирующий трелевочный волок часто невозможно из-за ограничений приказа Минприроды РФ от 17.01.2022 г. № 23 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки»: общая площадь трасс волоков и дорог при сплошных рубках допускается не более 20 % от площади лесосеки, при выборочных – не более 15 %; на лесосеках сплошных рубок с использованием многооперационной техники возможно увеличить площадь волоков и дорог до 30 %.

В ряде случаев операторы форвардеров решают проблему критического износа трелевочного волока немного расширяя его за счет движения галсами, которые позволяют срезать межколейный выступ, но проблему пней с высотой равной клиренсу машины данный прием решить не может.

Целью исследования является разработка математической модели деформирования влажного слоя почвогрунта в результате циклических динамических нагрузок, учитывающая закономерности изменения его влажности и, как следствие, прочностных и упругопластических характеристик, влияющих на процесс образования колеи вдоль содержащей значительные по высоте препятствия трассы движения лесной машины.

Объектом исследования стали почвогрунты и препятствия в колеях трелевочных волоков. *Методология*: использованы справочные данные о физико-механических свойствах почвогрунтов; расчеты выполнены на основе механики разрушений; применялись методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Математическая модель. Пусть груженая колесная лесная машина (форвардер) общим весом Q, который складывается из собственного веса $Q_м$ машины и веса $Q_п$ пачки, воздействует на краевую часть массива почвогрунта, содержащего некоторое препятствие (пень, камень и т. п.), исходная высота которого составляет $H_о$.

Если высота препятствия $H_о$ достигает 0,2–0,3 м и более, при взаимодействии шин первой колесной пары с почвогрунтом возникают повышенные динамические нагрузки, которые обусловливают образование зоны разрушения (прироста колеи), глубина которой h в слабонесущих почвогрунтах может достигать 0,3–0,4 м и более [14].

Натурное обследование трелевочных волоков показало, что в итоге формируется суммарная колея, глубина которой H может превысить клиренс $H_к$ лесной машины, составляющий в среднем 0,54–0,58 м, что делает невозможным ее дальнейшее продвижение по волоку.

Исходя из законов сохранения кинетической и потенциальной энергий, а также импульсов движения и силы, равной весу Q, действующей в течение единицы времени $t = 1$ с, определим коэффициент $K_д$ динамического усиления статической нагрузки $p_с$ до уровня ее динамических значений $p_д$:

$$K_д = \sqrt{2gH_о}, \; p_с = Q/S, \; p_д = K_д p_с,$$

где g – ускорение свободного падения; S – площадь пятна контакта шины с поверхностью почвогрунта.

Дополнительный прирост глубины колеи h_1 под действием первой колесной пары определен как размер зоны контактного разрушения [1, 23] сдвигом массива почвогрунта с внутренним трением [29, 38, 44] при сравнении горизонтального динамического давления $q_д = \frac{\nu}{1-\nu} p_д$, где ν – коэффициент Пуассона, с пределом прочности почвогрунта на сдвиг τ на глубине h_1.

Величина τ в соответствии с положениями ГОСТ 12248.1–2020 «Грунты. Определение характеристики прочности методом одноплоскостного среза» установлена как:

$$\tau = C + p_д tg\varphi,$$

где C – удельное сцепление почвогрунта; φ – его угол внутреннего трения.

В табл. 1 при начальной высоте препятствия $H_о$ = 0,3 м для 3 состояний исходной влажности $W_о$ суглинка представлены результаты расчета глубины зоны разрушения h_1 после взаимодействия с почвогрунтом первой колесной пары груженого ($Q = Q_м + Q_п$ = 5,6 + 9,4 = 15 т) четырехосного форвардера «Амкодор 2662–01», в результате чего вновь образованная глубина колеи составила $H_1 = H_о + h_1$.

Коэффициент динамического усиления определен как $K_д$ = 1,57, а ударная нагрузка $p_д$ на почвогрунт достигла 36,1 кПа.

Площадь пятна контакта равна

$$S = BL = 0{,}70 \cdot 0{,}36 = 0{,}252 \text{ м}^2,$$

где B и L – ширина и длина пятна контакта соответственно; R – радиус колеса, R = 0,33 м.

Нагрузка на все оси равномерная, т. е. по 3,75 т. Клиренс лесной машины принят $H_к$ = 0,58 м.

Упругопластические характеристики почвогрунта в исходном состоянии до динамической нагрузки представлены модулем общей деформации $E_о$ и коэффициентом Пуассона $\nu_о$.

Как следует из результатов расчетов и данных табл. 1, полученные глубины колеи H_1 не превысили клиренс лесной машины.

Таблица 1

Исходные характеристики почвогрунта и результаты определения глубины колеи
Initial Soil Parameters and Results of Rut Depth Measurements

$W_о$, %	Состояние почвогрунта	$C_о$, кПа	$\varphi_о$, …°	$E_о$, кПа	$\nu_о$	h_1, м	H_1, м
24	Увлажненный	18,9	23,4	2275	0,24	0,03	0,33
32	Влажный	7,5	13,3	1110	0,32	0,09	0,39
40	Переувлажненный	3,5	8,4	620	0,40	0,22	0,52

Реализация математической модели. Рассмотрим наиболее сложные условия трелевки по переувлажненному почвогрунту, в качестве предела пластичности которого примем $W_п$ = 28 %, а предела текучести – $W_т$ = 43 %.

В результате сжатия слоя почвогрунта под динамической нагрузкой первой колесной пары, равной $p_д$ = 36,1 кПа, при модуле общей деформации $E_о$ = 620 кПа относительная общая деформация составила ε_1 = 0,058. В силу малого периода времени между реализациями циклов воздействия восстановлением упругих деформаций можно пренебречь.

Глубина колеи H_1 = 0,52 м составила 90 % клиренса форвардера $H_к$ = 0,58 м, что является отрицательным результатом в контексте реализации дальнейших циклов ударного взаимодействия следующих колесных пар с этим контактным участком почвогрунта.

Относительное уплотнение почвогрунта $\overline{\rho}_1$, равное отношению текущей плотности ρ_1 к начальной ρ_0 в нетронутом массиве: $\overline{\rho}_1 = 1 + \varepsilon_1 = 1{,}058$.

При объеме деформирования почвогрунта $V_г$ в пределах контактной площадки S на глубину h_1 = 0,22 м объем жидкости $V_ж$, подлежащий истечению, в соответствии с результатами исследования [27], развитыми в работах [8, 21], составит:

$$V_ж = 2\varepsilon_1 W_o / 100 S h_1.$$

В результате влажность W_1 слоя почвогрунта перед его взаимодействием со следующей колесной парой снизится и будет равна

$$W_1 = W_o \left(1 - \frac{V_ж}{V_г}\right).$$

Так, для представленного варианта расчета W_1 = 36 %, т. е. снизилась на 10 %.

В ходе экспериментального исследования [36] установлено влияние влажности W на изменение физико-механических характеристик C, φ и E для ряда грунтов – супесей легкой и тяжелой, песка пылеватого и суглинка.

В работе [16] с введением безразмерного коэффициента влажности $K_W = W/W_т$ после статистической обработки данных [36] получены корреляционные соотношения для определения коэффициентов K_E, K_C и $K_φ$ снижения соответствующих характеристик с ростом K_W от 0,5 (увлажненный грунт) до 0,9 (переувлажненный грунт).

В частности, для суглинка имеем:

$$K_E = 0{,}1723\, K_W^{-2{,}556};$$

$$K_C = 0{,}1144\, K_W^{-3{,}324};$$

$$K_φ = 0{,}2575\, K_W^{-2{,}028}.$$

Отнеся установленную влажность W_1 = 36 % слоя почвогрунта после взаимодействия с первой колесной парой к $W_т$ = 43 %, т. е. установив K_W = 0,84 и определив с помощью приведенных соотношений коэффициенты K_E, K_C и $K_φ$, определим новые значения характеристик: C_1 = 4,9 кПа, $φ_1$ = 10,3° и E_1 = = 805 кПа, которые использованы для оценки глубины зоны разрушения $h = h_2$ [17] и, соответственно, вновь образованной глубины колеи H_2.

Алгоритм расчета циклически реализован при взаимодействии с почвогрунтом всех 4 колесных пар, пронумерованных числом N (табл. 2).

Таблица 2

Результаты взаимодействия многоосного колесного форвардера с почвогрунтом
Results of Interaction between a Multiaxial Wheeled Forwarder and Soil

N	C, кПа	φ, …°	E, кПа	$p_д$, кПа	τ, кПа	$\overline{\rho}$	h, м	H, м	W, %
1	4,9	10,3	805	36,1	8,8	1,058	0,22	0,52	36,0
2	7,5	13,3	1110	47,5	13,5	1,117	0,16	0,68	31,7
3	10,9	16,7	1495	54,5	20,3	1,166	0,09	0,77	28,5
4	14,2	19,6	1830	58,2	28,4	1,205	0,07	0,84	26,2

Отметим, что рост характеристик C, φ и E почвогрунта по мере его уплотнения соответствует результатам исследований [2, 7, 24, 37], однако количественное влияние на них влажности W в указанных работах не приводится.

Как следует из анализа данных табл. 2, в процессе циклического уплотнения почвогрунта наблюдается снижение его влажности от исходной $W_о$ = 40 % (K_W = 0,93), близкой к пределу текучести, до W_4 = 26,2 % (K_W = 0,61), близкой к пределу пластичности.

На основании положений механики деформирования влажных почвогрунтов можно заключить, что в результате реализации полного цикла взаимодействия произошли качественные изменения в состоянии почвогрунта: слабонесущий почвогрунт трансформировался в почвогрунт умеренной несущей способности.

Следствием уплотнения краевой части массива почвогрунта и снижения влажности является кратное повышение его прочностных свойств и способности оказывать сопротивление сдвиговым динамическим нагрузкам: τ увеличилась в 3,2 раза от 8,8 до 28,4 кПа, тогда как $p_д$ возросла в 1,6 раза с 36,1 до 58,2 кПа. Таким образом, можно заключить, что интенсивность упрочнения почвогрунта в 2 раза превышает соответствующий показатель для динамического давления.

Тем не менее перемещение груза весом Q = 15 т по такому почвогрунту вдоль трассы со значительным препятствием с помощью четырехосного форвардера приводит к негативным показателям трелевки, поскольку глубина образованной колеи H_4 = 0,84 м почти в 1,5 раза превышает клиренс данной лесной машины.

Высота препятствия $H_о$ – один из основных факторов формирования ударной нагрузки на почвогрунт и достижения H_4.

Результаты расчетов. На рис. 2 представлены зависимости H_4 от $H_о$ при исходной влажности участка почвогрунта $W_о$ = 32 % для двух случаев загрузки форвардера: вес трелюемой пачки сортиментов $Q_п$ = 9,4 т и $Q_п$ = 4,7 т.

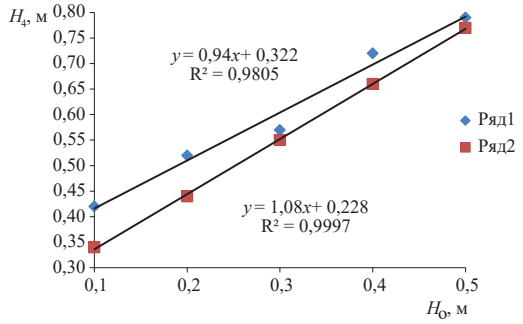


Рис. 2. Зависимость конечной глубины колеи от высоты препятствия:
1 – $Q_п$ = 9,4 т; 2 – $Q_п$ = 4,7 т

Fig. 2. Relationship between the target rut depth and the obstacle height:
1 – $Q_п$ = 9.4 t; 2 – $Q_п$ = 4.7 t

Анализ полученных линейных зависимостей с угловыми коэффициентами, близкими к 1, подтверждает, что фактор высоты препятствия $H_о$ является значимым.

Как видим, при $H_о \leq 0,3$ м прогнозная глубина колеи во влажном почвогрунте не превосходит клиренс.

При незначительной высоте препятствия уменьшение веса пачки $Q_п$ в 2 раза с 9,4 до 4,7 т приводит к снижению глубины колеи H_4 на 24 %, тогда как при $H_о \rightarrow 0,5$ м отметим снижение отличий H_4 в 8 раз в сторону уменьшения –

на 3 %. Можно заключить, что при существенности препятствия только снижение веса трелюемой пачки сортиментов не обеспечивает достижения проектных показателей трелевки и необходимы иные технические мероприятия.

Исследуем закономерности изменения ряда геомеханических параметров – относительного уплотнения $\bar{\rho}$, исходной влажности W и предела прочности на сдвиг τ с ростом числа N для трех категорий почвогрунтов (см. табл. 1).

На рис. 3 приведены зависимости $\bar{\rho}$ от N для трех значений влажности: $W = 24$ %, $W = 32$ % и $W = 40$ %.

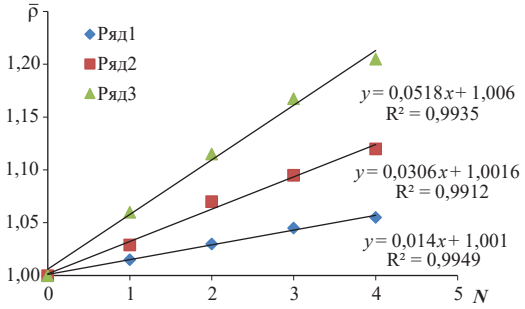


Рис. 3. Зависимость относительного уплотнения от циклов воздействия для почвогрунтов различной влажности: 1 – $W = 24$ %; 2 – $W = 32$ %; 3 – $W = 40$ %

Fig. 3. Relationship between the relative compaction and the exposure cycles number for soils with varying moisture content: 1 – $W = 24$ %; 2 – $W = 32$ %; 3 – $W = 40$ %

Угловые коэффициенты в уравнениях указывают на изменения интенсивности уплотнения почвогрунта по мере роста его влажности и числа циклов воздействия на него колесных пар форвардера.

На рис. 4 отражены результаты исследования зависимости влажности почвы от воздействия на него форвардера. Необходимо обратить внимание на характер прямых 2 и 3. Несмотря на существенные различия исходных состояний влажности почвогрунта, реализация четырех циклов воздействия, т. е. после полного прохода форвардера, приводит к тому, что влажность почвогрунтов практически сравнялась, что означает совпадение их прочностных и деформационных характеристик.

Полученный результат можно объяснить более интенсивным процессом истечения жидкости из контактного слоя переувлажненного почвогрунта, что в научной литературе освящено недостаточно и почти не используется в расчетах глубины колеи.

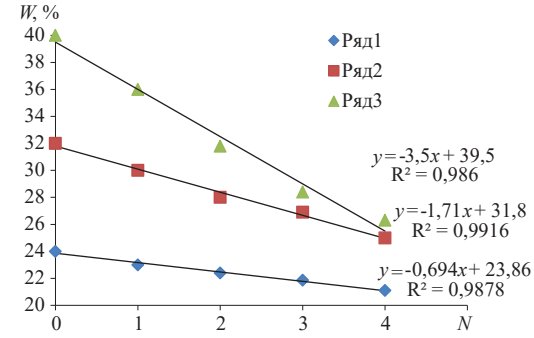


Рис. 4. Зависимость влажности почвогрунта от циклов воздействия. Обозначения 1–3 – см. рис. 3

Fig. 4. Relationship between the soil moisture content and the exposure cycles. See fig. 3 for legend 1–3

Рис. 5 иллюстрирует зависимость предела прочности почвогрунта на сдвиг τ от N. Сближение прочностных характеристик на сдвиг (линии 2 и 3) аналогично показанному на рис. 4 сближению состояний влажного и переувлажненного почвогрунтов после полного цикла воздействия на них форвардера.

Данные рис. 4 и 5 и сформулированные на их основе выводы свидетельствуют об особом характере циклического взаимодействия ударных нагрузок с почвогрунтами повышенной влажности, слагающими трассу со значительными по высоте препятствиями.

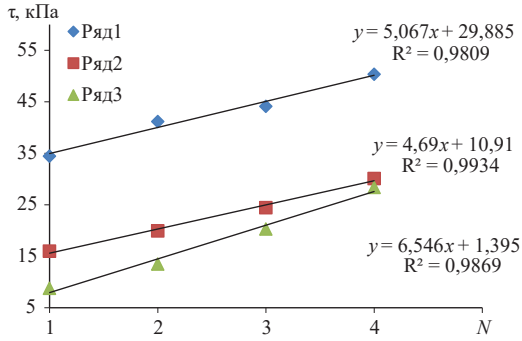


Рис. 5. Зависимость предела прочности почвогрунта на сдвиг от циклов воздействия.
Обозначения 1–3 – см. рис. 3

Fig. 5. Relationship between the soil shear strength and the exposure cycles number.
See fig. 3 for legend 1–3

В основе выполненных расчетов лежат математические модели [29, 38, 40], в которых установлено, что глубина колеи пропорциональна отношению ударной нагрузки к пределу прочности на сдвиг: $H \sim (p_д / \tau)^n$, где степень n для среды с внутренним трением зависит от коэффициента Пуассона ν и равна $n = (2–3\nu)/(2–2\nu)$. В частности, при $\nu = 0{,}40$ коэффициент $n = 0{,}665 < 1$.

Обратный коэффициент $k = 1/n = 1{,}5$ является мерой затухания вертикальных напряжений сжатия в массиве почвогрунта в направлении, перпендикулярном поверхности трассы, и со снижением коэффициента Пуассона ν с 0,4 до 0,32 коэффициент k уменьшается до 1,31, а при $\nu = 0{,}24$ – до 1,19.

Полученный результат отличается от принятого в работе [1] постоянного значения $k = 2$, т. е. модели разрушения среды с внутренним трением обеспечивают более высокий уровень напряженно-деформированного состояния влажного почвогрунта и более адекватно прогнозируют результат образования колеи.

Для развития этих положений введем безразмерный показатель $\mu = p_д / \tau$ и исследуем (рис. 6) его зависимость от числа циклов воздействия N для двух состояний влажности почвогрунта: $W_o = 32$ % и $W_o = 40$ %.

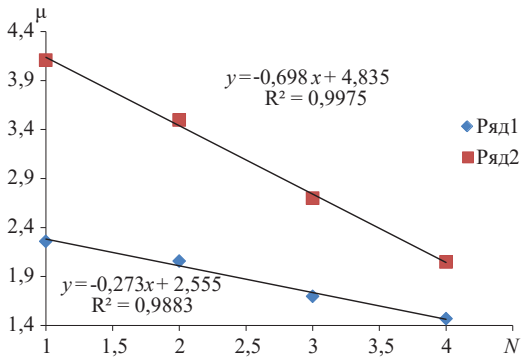


Рис. 6. Зависимость параметра μ от N: 1 – $W = 32$ %; 2 – $W = 40$ %

Fig. 6. Relationship between the parameter μ and N: 1 – $W = 32$ %; 2 – $W = 40$ %

Судя по угловым коэффициентам в уравнениях (производным полученных зависимостей μ от N), интенсивность упрочнения переувлажненного почвогрунта в 2,5 раза выше, чем во влажном состоянии, однако кратное (до 3–4 раз) превышение динамического давления $p_д$ над сопротивлением сдвигу

почвогрунта τ (линия 2) на первых трех циклах взаимодействия обусловило формирование колеи значительной глубины.

Традиционные методы расчета параметров трелевки и изучения процесса образования колеи [2, 26, 35] исходят из предположений о стабильности физико-механических характеристик почвогрунта при его циклическом взаимодействии с движителем. Учет уплотнения отмечается только в контексте роста плотности почвогрунта, не затрагивая его других характеристик.

Сравним результаты прогноза глубины колеи H при реализации двух вариантов расчета: традиционного при сохранении физико-механических свойств почвогрунта по мере прохождения колесных пар по одному и тому же участку волока; разработанного с учетом уплотнения почвогрунта, снижения его влажности и, как следствие, упрочнения.

Вес форвардера с пачкой сортиментов принят Q = 15 т, высота препятствия $H_о$ = 0,3 м.

На рис. 7 представлены зависимости H от N при двух состояниях исходной влажности почвогрунта: $W_о$ = 40 % и $W_о$ = 32 %.

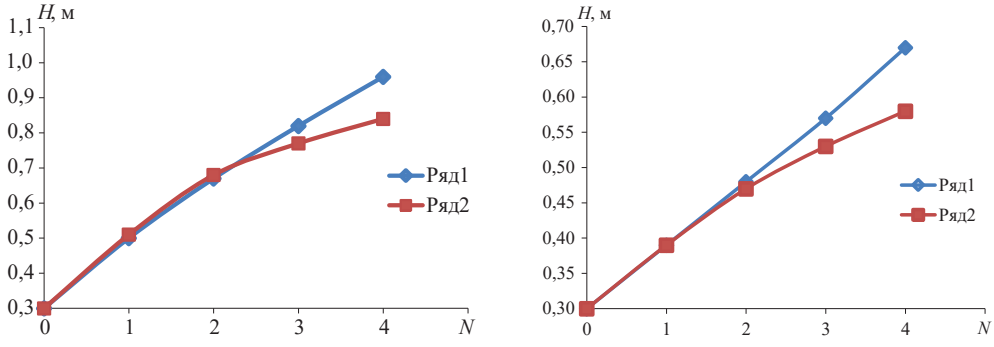
Для более адекватного сравнения итоговую глубину колеи H_4 отнесем к клиренсу $H_к$ лесной машины, т. е. введем коэффициент $\lambda = H_4/H_к$. Таким образом, область допустимых значений λ не должна превышать 1.

Как видим, учет упрочнения почвогрунта в обоих состояниях его влажности приводит к корректировке итоговой глубины колеи в сторону ее понижения на 15–16 %.

При работе на переувлажненных почвогрунтах (рис. 7, *а*) оба варианта расчета прогнозируют глубину колеи, значительно больше клиренса и критерий λ, соответственно, превышает 1 на 65 и 45 %, что позволяет сделать вывод о несоответствии параметров загрузки колесного четырехосного форвардера геотехническим условиям трелевки. При работе на влажных почвогрунтах (рис. 7, *б*) при втором варианте расчета критерий λ не более 1, однако вес пачки сортиментов $Q_п$ = 9,4 т и общий вес трелевочной системы на базе форвардера Q = 15 т также обусловливают предельные нагрузки на почвогрунт.

В этих условиях рекомендуют оснащать колесные пары гибкими лентами (колесными гусеницами, моногусеницами). Нагрузка на спаренные оси увеличивается в 2 раза, но такое же увеличение площади опорной поверхности приводит к тому, что ударное давление сохраняется почти на прежнем уровне. Данное техническое мероприятие позволяет при оснащении только первых двух колесных пар рассчитывать глубину колеи исходя из трех циклов воздействия, а при дополнительном оснащении последующих колесных пар – двух циклов.

Глубины колеи H_2 и H_3 при работе на переувлажненных почвогрунтах превышают клиренс, причем погрешности расчетов при обоих вариантах незначительные и необходимость снижения веса трелюемой пачки сортиментов очевидна. При работе на влажных почвогрунтах глубины колеи H_2 и H_3 ниже клиренса, особенно при полном попарном оснащении колес моногусеницами, поскольку прогнозное значение H_2 = 0,47 м (λ = 0,81) позволяет рассмотреть возможность увеличения веса трелюемой пачки сортиментов выше $Q_п$ = 9,4 т. Как показали расчеты, доведение $Q_п$ до 15 т, т. е. до полной допустимой загрузки форвардера Q = 20,6 т, обеспечивает удовлетворительное значение H_2 = 0,52 м (λ = 0,9) и максимальную производительность.



а *б*

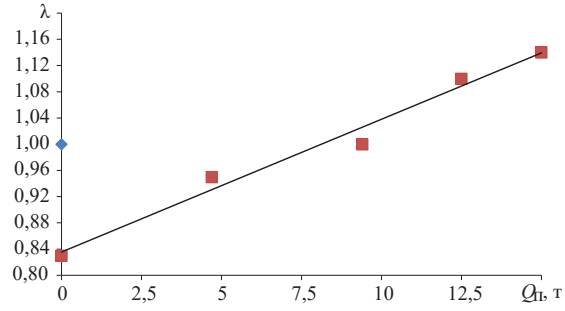
Рис. 7. Зависимость глубины колеи от воздействия колесной пары: *а* – $W_о$ = 40 %; *б* – $W_о$ = 32 % (1 – традиционный; 2 – разработанный вариант расчета)

Fig. 7. Ralationship between the rut depth and the wheel pair impact: *а* – $W_о$ = 40 %; *б* – $W_о$ = 32 % (1 – conventional; 2 – proposed calculation method)

На рис. 8 отражены результаты исследования влияния веса трелюемой пачки сортиментов $Q_п$ на изменение параметра λ при обычном состоянии колесных пар без применения колесных гусениц при работе на участке влажного почвогрунта.

Рис. 8. Влияние веса трелюемой пачки сортиментов на параметр λ

Fig. 8. Influence of the skidded assortment bundle weight on the parameter λ



Уменьшение параметра $Q_п$ в 2 раза с 9,4 до 4,8 т приводит к снижению λ на 5 % – с 1 до 0,95. При максимальном весе пачки $Q_п$ = 15 т λ = 1,14, т. е. глубина колеи на 14 % превышает клиренс.

Этот результат можно объяснить установленными закономерностями упрочнения массива почвогрунта при реализации циклических ударных нагрузок: при работе на почвогрунтах повышенной влажности технологически целесообразная загрузка многоосного колесного форвардера приводит к тому, что глубина колеи близка к клиренсу. И для того, чтобы не снижать производительность трелевки, как уже подчеркивалось выше, необходимо оснащать колесные пары моногусеницами, тем самым снижать циклы ударных нагрузок при наличии значительных по высоте препятствий или природных амплитуд профиля трассы.

Сравнительный анализ процесса образования колеи при различном оснащении колесных пар форвардера. Совместное влияние (рис. 9) веса пачки $Q_п$ и влажности W почвогрунта на параметр λ свидетельствует о том, что показатели трелевки на базе многоосной лесной машины без дополнительного оснащения колесных пар вдоль трассы, содержащей препятствия высотой не более 0,3 м, достигаются при ограничениях $Q_п \leq 9{,}4$ т и $W \leq 32$ %.

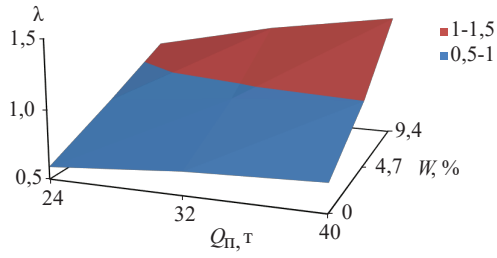


Рис. 9. Совместное влияние веса трелюемой пачки сортиментов и влажности почвогрунта на параметр λ без дополнительного оснащения колесных пар

Fig. 9. Combined influence of the skidded assortment bundle weight and soil moisture content on the parameter λ without additional wheel pair equipment

Как следует из анализа данных рис. 9, только около 55 % области совместных значений влажности почвогрунта W и веса пачки $Q_п$ обеспечивают удовлетворительную производительность форвардера при существенном математическом ожидании высоты препятствия $H_о$ = 0,3 м.

В частности, λ при $Q_п$ = 9,4 т (Q = 15 т) и $W_о$ = 40 % достигает 1,5 и, как отмечалось выше, снижение веса трелюемой пачки сортиментов малоэффективная мера улучшения показателей трелевки.

Совместное влияние (рис. 10) влажности W почвогрунта и веса пачки $Q_п$ на параметр $\lambda = \lambda_2 = H_2/H_к$ при попарном оснащении колес движителя колесными гусеницами показывает, что на переувлажненных почвогрунтах и при большой загрузке форвардера (общий вес – до 15 т) глубина колеи превышает его клиренс на 17 %.

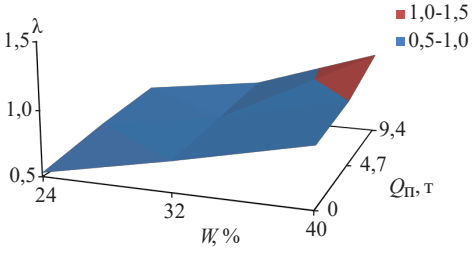


Рис. 10. Совместное влияние веса трелюемой пачки сортиментов и влажности почвогрунта на параметр λ при оснащении колесных пар колесными гусеницами

Fig. 10. Combined influence of the skidded assortment bundle weight and soil moisture content on the parameter λ when wheel pairs are equipped with wheeled caterpillars

Графики на рис. 9 и 10 свидетельствуют об эффективности оснащения колесных пар моногусеницами – размеры областей, где λ = 1–1,5, отличаются кратно.

Так, 80 % пересечений допустимых значений влажности почвогрунта W и веса пачки $Q_п$ обеспечивают удовлетворительный прогноз производительности форвардера, тогда как без оснащения колесных пар моногусеницами указанное пересечение составляло 55 % всей совокупности параметров.

Величина λ при $Q_п$ = 9,4 т и $W_о$ = 32 % снизилась до λ = 0,81 по сравнению с λ = 1 при трелевке без колесных гусениц, т. е. уменьшение глубины колеи достигло 23 %.

При максимальном весе трелюемой пачки сортиментов $Q_п$ = 15 т при той же влажности почвогрунта $W_о$ = 32 % показатели λ составили соответственно 1,14 и 0,9 (снижение на 26 %) в пользу схем с моногусеницами и допустимый общий вес форвардера достигает Q = 20,6 т.

Заключение

Разработанная математическая модель деформирования влажного слоя почвогрунта в результате циклических динамических нагрузок учитывает зако-

номерности изменения состояния его влажности и, как следствие, прочностных и упругопластических характеристик, влияющих на процесс образования колеи вдоль трассы движения форвардера, содержащей значительные по высоте препятствия.

Полученные результаты расчетов по модели параметров взаимодействия многоосной колесной машины со слабонесущими почвогрунтами повышенной влажности и их упрочнения обеспечивают более надежный прогноз эффективных характеристик трелевки.

Даны практические рекомендации и обоснована необходимость оснащения колесных пар колесными гусеницами в сложных геотехнических условиях трелевки для достижения высокой производительности лесной машины.

Результаты настоящего исследования наглядно показали эффект упрочения почвогрунта за счет удаления из него жидкости под действием движителя лесной машины. Данный эффект способствует замедлению интенсивности роста глубины колеи. Вместе с тем очевидно, что после окончания воздействия движителя на почвогрунт он снова начнет повышать свою влажность. Из этого следует технологическая рекомендация – сокращать сроки вытрелевки заготовленной древесины с каждой пасеки. Например, используя систему машин 1 харвестер + 2 форвардера; минимизируя перерывы между рейсами форвардера по волоку, в частности, за счет полной разрубки каждой конкретной пасеки до начала работы на ней форвардера.

Открытым остается вопрос о скорости восстановления влажности почвогрунта после воздействия на него движителя лесной машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Агейкин Я.С.* Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.

Ageikin Ya.S. *All-Terrain Wheeled and Combined Propellers*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 184 p. (In Russ.).

2. *Анисимов Г.М., Большаков Б.М.* Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: СПбГЛТА, 1998. 106 с.

Anisimov G.M., Bolshakov B.M. *Fundamentals of Minimizing Soil Compaction by Skidding Systems*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 1998. 106 p. (In Russ.).

3. *Беляева Н.В., Григорьева О.И., Ищук Т.А.* Влияние рубок ухода разной интенсивности на общую производительность ельников кисличных // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 3(11). С. 140–148.

Belyaeva N.V., Grigorieva O.I., Ishchuk T.A. Impact of Different Intensity Off-Lumbering on Wood Sorrel Spruce Forest Overall Efficiency. *Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 3(11), pp. 140–148. (In Russ.).

4. *Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунева Е.Н.* Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 101–116.

Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Luneva E.N. Theoretical Studies of Forwarder Productivity with Limited Impact on Soils. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 3, pp. 101–116. (In Russ.).
https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-101-116

5. *Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Калита О.Н.* Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на производительность форвардера // Деревообраб. пром-сть. 2021. № 1. С. 3–16.

Burmistrova O.N., Prosuzhih A.A., Hitrov E.G., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Kalita O.N. Influence of Variable Coefficients of Resistance Movement and Coupling on the Performance of the Forwarder. *Derevoobrabativaushaya promishlennost'* = Woodworking industry, 2021, no. 1, pp. 3–16. (In Russ.).

6. *Воскобойников И.В., Кондратюк В.А., Крылов В.М., Кондратюк Д.В., Клубничкин Е.Е.* Многооперационные лесные машины: моногр. Т. 1. М: МГУЛ, 2013. 480 с.

Voskoboinikov I.V., Kondratyuk V.A., Krylov V.M., Kondratyuk D.V., Klubnichkin E.E. *Multi-Purpose Forest Vehicles*: Monograph. Vol. 1. Moscow, MGUL Publ., 2013. 480 p. (In Russ.).

7. *Вялов С.С.* Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 447 с.

Vyalov S.S. *Rheological Foundations of Soil Mechanics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 447 p. (In Russ.).

8. *Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В.* Влияние влажности на развитие процесса разрушения коры при роторной окорке // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2008. № 6. С. 129–133.

Gazizov A.M., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. Humidity Influence on the Bark Destruction Development during Rotary Flogging. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2008, no. 6, pp. 129–133. (In Russ.).

9. *Григорьева О.И.* Статистические характеристики сосновых насаждений, пройденных рубками ухода // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2005. № 10. С. 84–87.

Grigoreva O.I. Statistical Characteristics of Pine Plantations Subjected to Improvement Thinning. *Current Issues of the Forest Complex*, 2005, no. 10, pp. 84–87. (In Russ.).

10. *Григорьева О.И.* Концепции интенсивного использования и воспроизводства лесов // Леса России в XXI веке: сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-техн. интернет-конф. СПб., С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С.М. Кирова, 2015. С. 103–107.

Grigoreva O.I. Concepts of Intensive Forest Management and Reproduction. *Forests of Russia in the 21st Century: Collection of Academic Papers Based on the Results of the International Scientific and Technical Internet Conference*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2015, pp. 103–107. (In Russ.).

11. *Григорьева О.И., Богачев П.В., Панарин А.О.* Оценка структуры лесного фонда для проведения рубок прореживания и проходных рубок при переходе на нормативы интенсивной модели лесного хозяйства // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С.М. Кирова, 2022. С. 125–126.

Grigoreva O.I., Bogachev P.V., Panarin A.O. Assessment of the Forest Resource Structure for Thinning and Clear-Cutting during the Transition to Intensive Forest Management Standards. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, and Education: Proceedings of the 7th All-Russian Scientific and Technical Conference*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2022, pp. 125–126. (In Russ.).

12. *Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьев И.В.* Анализ естественного лесовозобновления в Алексеевском участковом лесничестве Республики Саха (Якутия) // Forest Engineering: материалы науч.-практ. конф. с Междунар. участием. Якутск: СВФУ, 2018. С. 72–75.

Grigoreva O.I., Grigorev M.F., Grigorev I.V. Analysis of Natural Reforestation in the Alekseevskiy District Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia). *Forest Engineering: Proceedings of Scientific and Practical Conference with International Participation*. Yakutsk, NEFU Publ., 2018, pp. 72–75. (In Russ.).

13. *Григорьева О.И., Гринько О.И., Николаева Ф.В.* Лесопожарные транспортно-технологические комплексы на базе колесных форвардеров // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Тюмень: Тюменск. индустриальн. ун-т, 2021. С. 55–58.

Grigoreva O.I., Grinko O.I., Nikolaeva F.V. The Forest Fire of Transport and Technological Complexes on the Basis of Wheel Forwarders. *Transport and Logistics*

Systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Tyumen, IUT Publ., 2021, pp. 55–58. (In Russ.).

14. *Дмитриев А.С., Должиков И.С., Куницкая О.А., Григорьева О.И.* Экологическая безопасность лесных машин на полугусеничном ходу // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 5. С. 44–51.

Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Ecological Efficiency of Semi-Tracked Forest Vehicles. *Occupational Health and Safety in Logging and Woodworking Industries*, 2023, no. 5, pp. 44–51. (In Russ.). https://doi.org/10.33920/pro-05-2305-04

15. *Калистратов А.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н.* О важности исследований экологической эффективности процесса трелевки // Наука, образование, инновации в приграничном регионе: материалы республиканской науч.-практ. конф. Петрозаводск: Verso, 2015. С. 7–9.

Kalistratov A.V., Grigoreva O.I., Grigorev G.V., Dmitrieva I.N. The Importance of Research on the Environmental Efficiency of Skidding. *Science, Education, and Innovation in the Border Region: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference*. Petrozavodsk, Verso Publ., 2015, pp. 7–9. (In Russ.).

16. *Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И.* Оценка работоспособности трелевочного волока на склоне массива оттаивающего почвогрунта при циклических статических нагрузках // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 2. С. 79–95.

Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Grigoreva O.I. Assessment of the Efficiency of the Skidding Track on the Slope of the Thawing Soil Mass under Cyclic Static Loads. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 79–95. (In Russ.). https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5723

17. *Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Стародубцева Т.Н.* Исследование процесса образования колеи и ее устойчивости при работе лесных машин и трелевочных систем на склонах массива оттаивающего почвогрунта // Лесотехн. журн. 2021. Т. 11, № 2(42). С. 121–132.

Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I., Starodubtseva T.N. Investigation of the Track Formation Process and Its Stability during the Operation of Forest Machines and Skidding Systems on the Slopes of the Thawed Soil. *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forest Engineering Journal, 2021, vol. 11, no. 2(42), pp. 121–132. (In Russ.). https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/12

18. *Куницкая О.А., Давтян А.Б., Просужих А.А., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И.* Обоснование конструкции форвардера на базе сельскохозяйственного трактора // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: Воронежск. гос. аграрн. ун-т им. Императора Петра I, 2020. С. 309–313.

Kunitskaya O.A., Davtyan A.B., Prosuzhikh A.A., Grigorev M.F., Grigoreva A.I. Substantiation of the Forwarder Design Based on an Agricultural Tractor. *Energy Efficiency and Conservation in Modern Production and Society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Voronezh, VSAU Publ., 2020, pp. 309–313. (In Russ.).

19. *Куницкая О.А., Петров А.В., Кривошеев А.А., Швецов А.С., Дмитриев А.С., Михайлова Л.М.* Анализ влияния природно-производственных условий на производительность тракторной трелевки // Вестн. АГАТУ. 2023. № 4(12). С. 102–149.

Kunitskaya O.A., Petrov A.V., Krivosheev A.A., Shvetsov A.S., Dmitriev A.S., Mikhailova L.M. Analysis of the Impact of Natural and Industrial Conditions on the Performance of Tractor Skidding. *Vestnik of ASAU*, 2023, no. 4(12), pp. 102–149. (In Russ.).

20. *Куницкая О.А., Просужих А.А., Каляшов В.А.* Эколого-экономическая эффективность эксплуатации форвардеров // Вестн. АГАТУ. 2021. № 2(2). С. 44–53.

Kunitskaya O.A., Prosuzhikh A.A., Kalyashov V.A. Ecological and Economic Operation Efficiency of Forwarders. *Vestnik of ASAU*, 2021, no. 2(2), pp. 44–53. (In Russ.).

21. *Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В.* Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2012. № 4. С. 110–115.

Kunitskaya O.A., Shapiro V.Ya., Burmistrova S.S., Grigorev I.V. Model of Processes of Pressing and Dehydration of the Impregnated Wood Materials. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2012, no. 4, pp. 110–115. (In Russ.).

22. *Мартынов А.Н., Беляева Н.В., Григорьева О.И.* Современные проблемы лесовыращивания. Химический и комплексный уход за лесом. СПб.: СПб ГЛТА, 2008. 80 с.

Martynov A.N., Belyaeva N.V., Grigoreva O.I. Modern Issues of Forest Cultivation. *Chemical and Complex Forest Care*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2008. 80 p. (In Russ.).

23. *Морозов Е.М., Зернин М.В.* Контактные задачи механики разрушения: моногр. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 543 с.

Morozov E.M., Zernin M.V. *Contact Problems of Fracture Mechanics*: Monograph. Moscow, LIBROCOM Publ., 2010. 543 p. (In Russ.).

24. *Мосинец В.Н., Абрамов А.В.* Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. М.: Недра, 1982. 248 с.

Mosinets V.N., Abramov A.V. *Destruction of Fractured and Disturbed Rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1982. 248 p. (In Russ.).

25. *Никифорова А.И., Григорьева О.И., Киселев Д.С., Хахина А.М., Рудов М.Е.* Оценка экологической безопасности работы лесных машин // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: материалы Междунар. науч.-практ. форума. Хабаровск: Тихоокеанск. гос. ун-т, 2013. С. 134–138.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kiselev D.S., Khakhina A.M., Rudov M.E. Environmental Safety Assessment of Forest Machinery. *Natural Resources and Ecology of the Far Eastern Region: Proceedings of the International Scientific and Practical Forum*. Khabarovsk, PSU Publ., 2013, pp. 134–138. (In Russ.).

26. *Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пелымский А.А., Григорьева О.И.* Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Уч. зап. Петрозаводск. гос. ун-та. 2014. № 2(139). С. 87–91.

Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymskiy A.A., Grigor'eva O.I. Two-Layer Ground Draught Definition under Logging Machine Passage. *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 2014, no. 2(139), pp. 87–91. (In Russ.).

27. *Патякин В.И., Тишин Ю.Г., Базаров С.М.* Техническая гидродинамика древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 304 с.

Patyakin V.I., Tishin Yu.G., Bazarov S.M. *Technical Hydrodynamics of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 304 p. (In Russ.).

28. *Помигуева А.И., Куницкая О.А., Швецов А.С., Должиков И.С., Курочкин П.А.* Обоснование целесообразности использования бесчокерных трелевочных тракторов на лесосечных работах // Вестн. АГАТУ. 2024. № 3(15). С. 44–102.

Pomigueva A.I., Kunitskaya O.A., Shvetsov A.S., Dolzhikov I.S., Kurochkin P.A. Justification of the Expediency of Using Shockless Skidding Tractors in Logging Operations. *Vestnik of ASAU*, 2024, no. 3(15), pp. 44–102. (In Russ.).

29. *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 // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 121–134.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Modeling the Interaction of Forest Machines with Soil when Working on Slopes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 6, pp. 121–134. (In Russ.).
https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-121-134

30. *Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Григорьева О.И.* Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2(392). С. 88–105.

Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Substantiation of Technological Processes and Machinery Systems for Logging Operations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 88–105. (In Russ.).
https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-88-105

31. *Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Швецов А.С., Фёдоров В.И., Григорьева О.И.* Исследование влияния режима работы оператора харвестера на сохранение подроста // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2025. № 4(22). С. 46–53.

Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Shvetsov A.S., Fedorov V.I., Grigoreva O.I. Investigation of the Effect of the Harvester Operator's Operating Mode on the Preservation of Undergrowth. *Occupational Health and Safety in Logging and Woodworking Industries*, 2025, no. 4(22), pp. 46–53. (In Russ.). https://doi.org/10.33920/pro-05-2504-04

32. *Серяков С.А., Куницкая О.А.* Эффективность харвестерных головок // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с Междунар. участием, посвящ. 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М.Е. Николаева (Николаевские чтения). Якутск: Знание-М, 2022. С. 795–802.

Seryakov S.A., Kunitskaya O.A. Efficiency of Harvester Heads. *Strategy and Prospects for the Development of Agricultural Technologies and Forestry Complex of Yakutia until 2050: Collection of Academic Papers Based on the Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 100th Anniversary of the Formation of the Yakut ASSR and the 85th Anniversary of M.E. Nikolaev, First President of the Republic of Sakha (Nikolaev's Readings)*. Yakutsk, Znanie-M Pub., 2022, pp. 795–802. (In Russ.).

33. *Серяков С.А., Куницкая О.А., Вашуткин А.С., Горбатов А.П.* Функциональные особенности импульсных харвестерных головок // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: Вологодск. гос. ун-т, 2022. С. 332–336.

Seryakov S.A., Kunitskaya O.A., Vashutkin A.S., Gorbatov A.P. Functional Features of Pulse Harvester Heads. *Current Issues of Forest Complex Development: Proceedings of the 20th International Scientific and Technical Conference*. Vologda, VSU Publ., 2022, pp. 332–336. (In Russ.).

34. *Серяков С.А., Куницкая О.А., Григорьева О.И.* Безопасность и охрана труда при эксплуатации и обслуживании импульсных харвестерных головок // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 3. С. 27–37.

Seryakov S.A., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Safety and Labor Protection during Operation and Maintenance of Pulse Harvester Head. *Occupational Health and Safety in Logging and Woodworking Industries*, 2023, no. 3, pp. 27–37. (In Russ.).

35. *Хитров Е.Г., Хахина А.М., Дмитриева М.Н., Песков В.Б., Григорьева О.И.* Уточненная модель для оценки тягово-сцепных свойств колесного движителя лесной машины // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 108–119.

Khitrov E.G., Khakhina A.M., Dmitrieva M.N., Peskov V.B., Grigoreva O.I. Refined Model for Wheeled Forestry Machinery Tractive Characteristics Evaluation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2016, no. 217, pp. 108–119. (In Russ.).
https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.217.108-119

36. *Царапов М.Н.* Формирование прочностных характеристик грунтов процессе оттаивания // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 4: Геология, 2007. № 6. С. 31–34.

Tsarapov M.N. Formation of Strength Characteristics of Soils during Thawing. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 4: Geologia*, 2007, no. 6, pp. 31–34. (In Russ.).

37. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. Изд. стереотип. 4-е, перераб. и доп. М.: Строительство, 2024. 640 с.

Tsytovich N.A. *Mechanics of Soils*. Moscow, Stroitel'stvo Publ., 2024. 640 p. (In Russ.).

38. *Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И.* Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 4. С. 45–51.

Shapiro V.Ya., Grigorjev I.V., Zhukova A.I. Assessment of Soil Deformation Processes under Cyclic Compaction. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2008, no. 4, pp. 45–51. (In Russ.).

39. Chernykh D., Steshina L., Petukhov I., Andrianov Yu., Velev D. The Approach to Training Logging Machinery Operators. *Journal of Applied Engineering Science*, 2023, vol. 21, no. 2, pp. 70–75. https://doi.org/10.5937/jaes0-38214

40. Grigorev G., Dmitrieva I.N., Khitrov E. Theoretical Evaluation of Rut Depth Components Caused by Forest Soil Shear and Compaction. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems*. Sofia, 2020, pp. 763–768. https://doi.org/10.5593/sgem2020/3.1/s14.098

41. Khitrov E., Grigorev G., Dmitrieva I.N. Theoretical Estimation of Soil Resistance to Forestry Vehicles Turning. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems*. Sofia, 2020, pp. 757–762. https://doi.org/10.5593/sgem2020/3.1/s14.097

42. Petukhov I., Steshina L., Kurasov P., Andrianov Yu. Analysis of Factors Influencing the Performance of Cadets Trained to Operate Logging Machinery. *Journal of Applied Engineering Science*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 1132–1138. https://doi.org/10.5937/jaes0-44511

43. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., et al. Improving the Efficiency of Forest Companies by Optimizing the Key Indicators of Sustainable Forest Management: A Case Study of the Far East. *Forest Science and Technology*, 2022, vol. 18, iss. 4, pp. 190–200. https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900

44. Shapiro V.Ya. Efficiency of Cut Configuration in Driving Tunnels with a Set of Blast Holes. *Soviet Mining Science*, 1989, vol. 25, pp. 379–386. https://doi.org/10.1007/BF02528560

45. Steshina L., Petukhov I., Tanryerdiev I., Kurasov P., Glazyrin A. A New Method of Personalized Training of Logging Machine Operators. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 2020, vol. 15, pp. 113–119. https://doi.org/10.37394/23203.2020.15.13

46. Tanryverdiev I., Petukhov I., Steshina L., Steshin I., Kurasov P., Galkin D. The Study of Accuracy of an Operator's Perception of Geometrical Object Sizes and Shapes in the Virtual Environments. *Journal of Applied Engineering Science*, 2024, vol. 22, no. 4, pp. 828–834. https://doi.org/10.5937/jaes0-54575

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the manuscript