

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/9>

УДК 625*033



Оценка влияния типа двигателя лесной машины на процесс уплотнения почвогрунта при работах на склонах

Александр Ю. Гурьев¹, sashafuryjager96@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>

Владимир Я. Шапиро², shapiro54vlad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Виталий А. Каляшов³, vit832@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

Владимир А. Морковин⁴, morkovin-vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Владимир М. Дьяченко⁵, Volodya.Dyachenko1986@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>

Игорь В. Григорьев¹ ✉, silver73@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

¹ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., 4, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

⁵ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», ул. Большая Морская, 18, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Материалы статьи посвящены теоретическому анализу результатов натуральных экспериментальных исследований, посвященных изучению воздействия лесных машин с колесным, гусеничным, и полугусеничным двигателем на почвогрунты лесосек и вырубок на склонах. Экспериментальные исследования проводились в 2023 г. в Республике Саха (Якутия). Актуальность данного направления исследований обусловлена тем, что в Республике Саха (Якутия) значительные запасы спелых и перестойных эксплуатационных насаждений сосредоточены в ее южной части, в значительной степени представляющей собой пересеченную местность. Разработка лесов в южной Якутии осложнена необходимостью точного прогнозирования результатов воздействия двигателей различных используемых лесных машин на почвогрунты лесосек для возможности принятия организационно-технологических решений, направленных на минимизацию негативных последствий данного воздействия. В статье показана необходимость оперативного определения пористости почвогрунта для различных условий работ на склоне с целью прогноза возможного увеличения величины давления двигателя различных лесных машин на краевую часть массива по всей глубине образованной колеи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».

Ключевые слова: леса на склонах, уплотнение почвогрунтов, пористость почвогрунтов, лесные машины, лесозаготовка

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.


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка влияния типа двигателя лесной машины на процесс уплотнения почвогрунта при работах на склонах / А. Ю. Гурьев, В. Я. Шапиро, В. А. Каляшов, В. А. Морковин, В. М. Дьяченко, И. В. Григорьев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 152–167. – Библиогр.: с. 162–166 (30 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/9>.

Поступила 01.08.2024. *Пересмотрена* 17.09.2024. *Принята* 18.09.2024. *Опубликована онлайн* 11.11.2024.


Article


Assessment of the influence of the type of forest machine mover on the soil compaction process during work on slopes


Alexander Yu. Guryev¹ ✉, sashafuryjager96@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>

Vladimir Ya. Shapiro², shapiro54vlad@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Vitaly A. Kalyashov³, vit832@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

Vladimir A. Morkovin⁴, morkovin-vladimir@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Vladimir M. Dyachenko⁵, Volodya.Dyachenko1986@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>

Igor V. Grigoriev¹, ✉, silver73@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

¹Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

²Saint-Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Institutsky lane, 5, Saint Petersburg, Russian Federation

³St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4, St. Petersburg, Russian Federation

⁴Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation

⁵Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 18, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

The materials of the article are devoted to the theoretical analysis of the results of field experimental studies devoted to the study of the impact of forest machines with wheeled, tracked, and semi-tracked propulsion on the soils of cutting areas and deforestation on slopes. Experimental studies were conducted in 2023 in the Republic of Sakha (Yakutia). The relevance of this research area is due to the fact that in the Republic of Sakha (Yakutia), significant reserves of ripe and over-ripe operational plantations are concentrated in its southern part, which is largely a rugged terrain. The development of forests in south Yakutia is complicated by the need to accurately predict the results of the impact of the movers of various used forest machines on the soils of logging areas in order to make organizational and technological decisions aimed at minimizing the negative consequences of this impact. The article shows the need to promptly determine the porosity of the soil for various working conditions on the slope in order to predict a possible increase in the pressure of the propulsion of various forest machines on the edge of the massif along the entire depth of the formed track. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

Keywords: *forests on slopes, soil compaction, soil porosity, forestry machines, logging*

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.

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

For citation: Guryev A.Yu., Shapiro V.Ya., Kalyashov V.A., Morkovin V.A., Dyachenko V.M., Grigorev I.V. (2024). Assessment of the influence of the type of propulsion of a forest machine on the process of soil compaction during work on slopes. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 152-167 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/9>.

Received 01.08.2024. *Revised* 17.09.2024. *Accepted* 18.09.2024. *Published online* 11.11.2024.

Введение

Из литературных источников известно, что горы занимают не многим менее четверти поверхности суши Земли. И это не считая холмисто-рядовых рельефов, характерных, например, для Северо-Запада Российской Федерации – Ленинградская область, Республика Карелия, а также сопок, характерных, например, для Дальнего востока Российской Федерации – Хабаровский край.

Также известно, что процессы горообразования различаются между собой, также различаются их результаты – размеры и формы получающегося рельефа. Принято выделять, например следующие варианты, в результате столкновения литосферных плит образуются формы рельефа, которые называют складчатыми горами, в результате двухфазного тектонизма образуются складчато-глыбовые горы, вулканическая деятельность приводит к образованию похожих по форме, на различных по размеру вулканических гор и лакколитов.

В практике работы лесных машин на склонах принято выделять следующие основные формы рельефа: чаша, конус, прямой склон, раздробленный склон. В классификации природно-производственных условий лесосечных работ склоны принято делить по их крутизне (углу наклона поверхности) на четыре категории: пологие – до 10°; покатые – 11-20°; крутые – 21-30°; очень крутые – более 30°.

Форма, протяженность, и крутизна склона во много зависят от типа геологических процессов, сформировавших конкретную местность.

Значительное влияние на условия работы в лесах склонах оказывает и внутренний рельеф выделов – водотоки, водоразделы, ущелья, и т.п., их распределение на склоне.

Наряду с природно-климатическими условиями, а также высотой над уровнем моря, крутизна склонов влияет на процессы почвообразования. Увеличение крутизны склона приводит к увеличению интенсивности водной и ветровой эрозии. Общая для практически всех лесов на склонах характеристика почвогрунтов заключается в том, что из-за процессов склоновой денудации (интенсивность которых прямо пропорциональна углу склона, при прочих равных условиях) они не имеют большой толщины, и обладают малой мощностью гумусового слоя.

При прочих равных условиях, запасы древесины на га тем больше, чем меньше крутизна склона, поскольку при больших значениях уклонов лесорастительные условия ухудшаются.

Рассмотренная специфика рельефных и почвенно-грунтовых условий лесов на склонах еще более усложняется в условиях многолетней мерзлоты, занимающей более 60% территории Российской Федерации. Процессы попеременного промерзания и оттаивания верхнего слоя – сезонной мерзлоты в теплый период года приводят к образованию стока талых вод по разделу сезонной и вечной мерзлоты, интенсивность которого также прямо пропорциональна углу склона, при прочих равных условиях. Данный процесс в условиях многолетней мерзлоты часто сопровождается эффектом солифлюкции, представляющим собой медленное вязкопластическое течение на склонах переувлажненных почвогрунтов в условиях их попеременного промерзания и протаивания, под действием силы тяжести, и являющимся отдельной, специфической технической и экологической проблемой, возникающей при

работе лесных машин на склонах в условиях многолетней мерзлоты [1].

В нормативных документах, например, в Приказе Рослесхоза от 15.12.1994 г. № 265 «Об утверждении Инструкции по проведению лесоустройства в лесном фонде России» указано, что «Леса на холмистых возвышенностях, не входящих в горные географические системы, к горным лесам не относятся». Подчеркнем, что в данной работе речь идет не только о горных лесах, а об освоении лесов на любых склонах.

Во всех случаях пересеченный рельеф, образуемый сопками, горными и холмисто-грядовыми рельефами существенно затрудняет освоение произрастающих на них лесных массивов. При этом под освоением лесных массивов на склонах следует понимать не только сплошные или выборочные рубки лесных насаждений, но и различные лесохозяйственные работы, включая санитарные и лесовосстановительные мероприятия, противопожарное обустройство, борьбу с лесными пожарами.

Как в равнинных условиях, так и в условиях лесов на склонах, самой энергоемкой, малопроизводительной, и экологически вредной операцией лесосечных работ является трелевка. Причем с увеличением угла склона затраты энергии и экологический ущерб от воздействия движителей лесных машин на почвогрунты увеличиваются кратно.

Во времена СССР для трелевки заготовленной древесины в условиях лесосек на склонах были разработаны и успешно эксплуатировались различные типы канатных трелевочных установок, а в ряде случаев практиковался и воздушный первичный транспорт леса – вертолетная трелевка.

Хотя и в те годы, судя по данным [2], при освоении лесных массивов на склонах, включая лесосеки в горах, в южных субъектах доминировала тракторная трелевка. На нее приходилось: «в Карпатах – 76%, в Краснодарском крае – 75%, в Кабардино-Балкарии и в Грузии – 100%».

В 1974 г., на горных лесосеках Грузии, в основном использовались промышленные гусеничные тракторы Т-100 [2]. В связи с тем, что это были не специальные машины, не имевшие приспособленной для работы в условиях леса ходовой части, как

например у лесопромышленных гусеничных тракторов серий ТТ и ТДТ, эти тракторы не давали высоких показателей эффективности, и наносили существенный экологический вред [2].

Согласно данным анализа практики работы действующих лесозаготовительных предприятий Российской Федерации, полученным при непосредственном интервьюировании их представителей, а также при помощи Национальной ассоциации лесопромышленников «Русский лес», и Ассоциации производителей машин и оборудования лесопромышленного комплекса «Лестех», в настоящее время канатные трелевочные установки и воздушная трелевка на территории нашей страны не используются.

На крупных и средних лесозаготовительных предприятиях для заготовки древесины на склонах, в настоящее время, в основном, используются импортных колесные лесные машины для разработки лесосек по скандинавской технологии – харвестеры и форвардеры. Реже используются системы машин для разработки лесосек по канадской технологии – гусеничные валочно-пакетирующие машины, и колесные или гусеничные тракторы с пачковым захватом (скиддеры). На мелких и малообъемных лесозаготовительных предприятиях, осуществляющих работу в лесах на склонах, используется механизированная заготовка древесины, обычно вкуче с тракторной трелевкой при помощи тракторов МТЗ, оснащенных различными специальным технологическим оборудованием – клещевым трелевочным бревнозахватом «Горыныч» (трелевка в полуподвешенном положении), или навесной трелевочной лебедкой ЛТН-50 (трелевка в полупогруженном положении). Примеров использования форвардеров на базе тракторов МТЗ в условиях лесов на склонах не встречено.

Как известно, в Российской Федерации подавляющее большинство действующих лесозаготовительных предприятий относятся к мелким и малообъемным. Эти предприятия, обычно, не имеют возможности приобретения специальных, дорогостоящих лесных машин, и в основном используют сельскохозяйственные тракторы, наиболее распространенными из которых, в настоящее время, являются

тракторы МТЗ. И именно тракторы МТЗ имеют техническую возможность быстрого переоборудования на полугусеничный ход, если этого требуют сложные условия эксплуатации.

Несмотря на очевидные сложности, леса на склонах, пусть и не очень интенсивно, в Российской Федерации осваиваются, и лесохозяйственные мероприятия в них проводятся. Ввиду специфических сложных лесорастительных условий на склонах часто произрастает древесина с большой плотностью, пользующаяся большим спросом у деревообрабатывающих предприятий, производящих, например, элитные деревянные окна, мебель, элементы интерьера, и т.п.

В самом лесоизбыточном субъекте Дальневосточного федерального округа Российской Федерации – Республике Саха (Якутия) основные запасы качественных спелых и перестойных лесных насаждений расположены в ее южной части, при этом там находится значительное количество лесов на склонах - Алдано-Учурский Нижне-Гонамский, Нинганский, Учуро-Идюмский горные хребты и Токинское плато. Вся территория Республики Саха (Якутия) – крупнейшего субъекта Российской Федерации, относится к зоне распространения многолетней мерзлоты. Поэтому для нее вопрос эффективного и средоохраняющего освоения лесов на склонах стоит особенно остро.

В приказе Министерства природных ресурсов и экологии 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» прямо указано: «Разработка лесосек в лесах, произрастающих на многолетне-мерзлотных почвах, должна вестись в зимний период при промерзшем верхнем слое почвы. При проведении рубок в данных природно-климатических условиях повреждение почвы с минерализацией ее поверхности не допускается».

Вместе с тем, в лесах на многолетней мерзлоте, в том числе на склонах, достаточно большие объемы работ проводятся в теплое время года, с привлечением машин с различными типами движителей, прежде всего колесными и гусеничными [3-7].

В теплое время года приходится выполнять мероприятия, связанные с уходом за лесами, очисткой вырубок и гарей, содействием естественному лесовосстановлению, искусственному лесовосстановлению, противопожарными мероприятиями [8-12].

В результате использования лесных машин на многолетней мерзлоте в теплое время года, особенно на склонах возникают негативные экологические последствия, прежде всего связанные с воздействием движителей на почвогрунты [13-17]. Практика эксплуатации лесных машин на склонах показывает, что достаточно значительно негативное воздействие движителей на почвогрунты, а также снизить энергоемкость и повысить безопасность их работы помогают интегрированные в трансмиссию или отдельные самоходные лебедки, типа T-winch, ROB, и т.д. А также оснащение колесных машин (танделмов) моногусеницами, или их перевод на полугусеничный ход.

Материалы и методы

Различные аспекты проблемы уплотнения краевой части массива почвогрунтов, в том числе мерзлых и оттаивающих, при взаимодействии с различными движителями на склонах рассмотрены в работах [18-22].

Следствием решения указанной проблемы является установление закономерностей формирования колеи определенной глубины, оказывающей влияние на эффективность использования трелевочных систем на базе колесных, полугусеничных и гусеничных лесных машин.

Математические модели, посвященные прогнозированию результатов воздействия движителей лесных машин на почвогрунты лесосек, в том числе предложенные в [18-22], всегда нуждаются в опытных данных о таких характеристиках почвогрунтов как несущая способность, модуль общей деформации, коэффициент Пуассона и других параметров, что способствует большей достоверности и надежности расчетов.

Получение таких опытных данных в производственных условиях достаточно затруднительно, и связано со значительными финансовыми, временными, и организационными затратами. В связи с

этим, во многих проанализированных работах, исследователи ограничивались таким методом научного проникновения, как лабораторный эксперимент, предусматривающий использование различных модельных лотков и штампов.

В этой связи особенную ценность представляют приведенные в работе [23] экспериментальные данные применительно к работе на склонах с применением лесных машин с тремя отмеченными типами движителей, полученные в результате масштабного натурного эксперимента, о величине сопротивления проникновения в почвогрунт штампа R_p , плотности

частиц D_p и объемной D_s плотности в целом, пористости почвогрунта P_s .

Особую значимость имеет показатель P_s как функция двух параметров плотности D_p и D_s , установленный для контрольного замера P_{sk} и трех замеров P_{s1} , P_{s2} и P_{s3} (нумерация соответствует очередности движителей 1 – колесный, 2 – полугусеничный и 3 – гусеничный).

В табл. 1 приведены данные о пористости P_s при различных углах наклона склона и глубине отбора проб почвы при эксплуатации лесных машин с различными типами движителей.

Таблица 1

Влияние техники на пористость почвы

Table 1

The effect of technology on soil porosity

Угол наклона Angle of inclination	Глубина изъятия пробы Sampling depth	Пористость, % Porosity, %			
		Контроль Control	Колесный Wheeled	Полугусеничный Semi-tracked	Гусеничный Tracked
0-5%	50-100 мм	56,4	49,1	50,1	51,6
	100-150 мм	53,1	46,5	48,4	49,5
	150-200 мм	46,2	43,2	45,6	47,5
5-10%	50-100 мм	55,9	48,2	50,4	51,2
	100-150 мм	52,7	45,1	48,5	50,3
	150-200 мм	48,2	42	43,5	48,2
10-15%	50-100 мм	56,1	47,8	50,3	52,6
	100-150 мм	52,7	45,8	49,7	50,1
	150-200 мм	46,8	38,6	42,3	43,6
15-20%	50-100 мм	55,8	48,4	53,2	53,6
	100-150 мм	53,4	45,1	48,5	50,2
	150-200 мм	47,5	40,5	43,5	49,8

Хорошо известен факт, что снижение пористости ухудшает водо-воздушный и тепловой режимы почвогрунтов, и, соответственно, ухудшает их лесорастительные свойства. Поэтому уменьшение пористости почвогрунтов под воздействием движителей лесных машин может быть однозначно отнесено к негативному экологическому воздействию, наряду с уплотнением и колееобразованием.

Результаты

Необходимо отметить, что отношение данных контрольных замеров P_{sk} к данным трех значений P_{si} ($i=1, 2, 3$) после 3-х кратного прохода движи-

теля является величиной относительного уплотнения $\bar{\rho}$, поскольку плотность частиц есть величина постоянная, а уменьшается только объемная плотность за счет уплотнения почвогрунта.

Этот вывод позволяет на основании указанных относительных данных о пористости почвогрунта выполнить сравнительные исследования о влиянии типа движителя и угла наклона склона на процесс уплотнения краевой части массива по его глубине.

Так, на рис. 1 представлена зависимость величины $\bar{\rho}$ от вида движителя (колесный, полугусеничный, гусеничный) и глубины отбора

проб h , мм. Данные рис. 1 соответствуют углу наклона склона $\alpha=5^\circ$.

Как следует из рис. 1, колесный движитель обуславливает максимальное уплотнение верхней части почвогрунта (до 150 мм), тогда как остальные движители производят более равномерное уплотнение по всей глубине массива.

Влияние угла наклона склона на величину относительного уплотнения на различных глубинах отражено на рис. 2 для одного вида движителя – колесного, при трех значениях $\alpha=5^\circ, 10^\circ$ и 20° .

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что при минимальном угле наклона склона (кривая 1) по мере удаления от его поверхности на глубину более 150 мм наблюдается резкое снижение величины относительного уплотнения. С ростом величины α указанная тенденция проявляется не столь существенно.

Результаты исследований зависимости $\bar{\rho}(h)$ для трех движителей представлены на рис. 3 (кривая 1 – колесный, 2 – полугусеничный, 3 – гусеничный) при значении $\alpha=10^\circ$.

Как видим, применение колесного движителя приводит к существенному росту величины $\bar{\rho}$, тогда как воздействие на почвогрунт двух других движителей практически равнозначно.

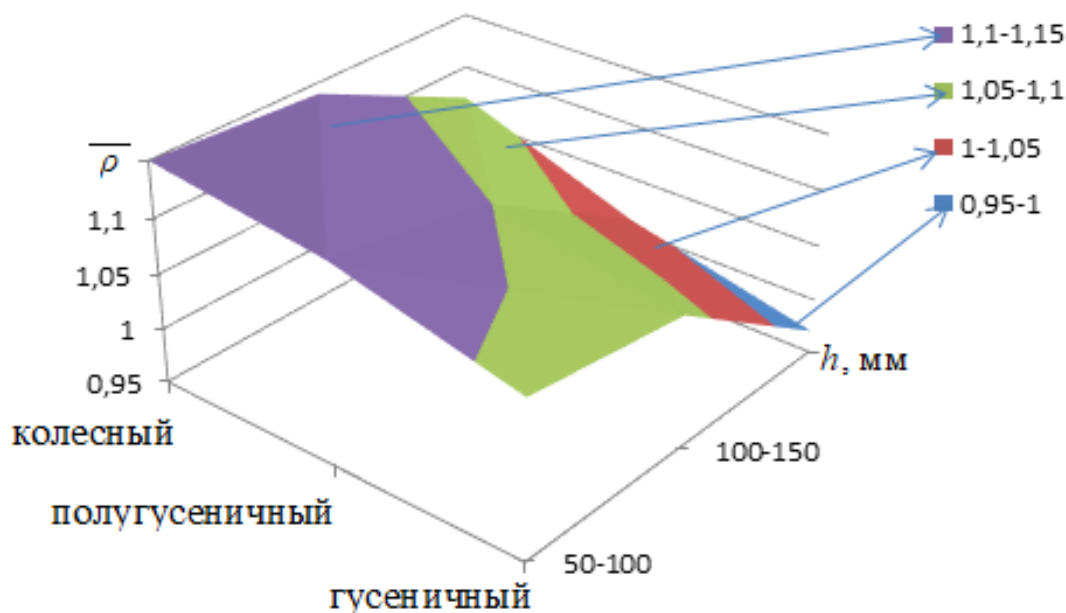


Рисунок 1. Зависимость относительного уплотнения почвогрунта от удаления от поверхности склона для различных движителей

Figure 1. Dependence of the relative compaction of the soil on the distance from the slope surface for various propellers

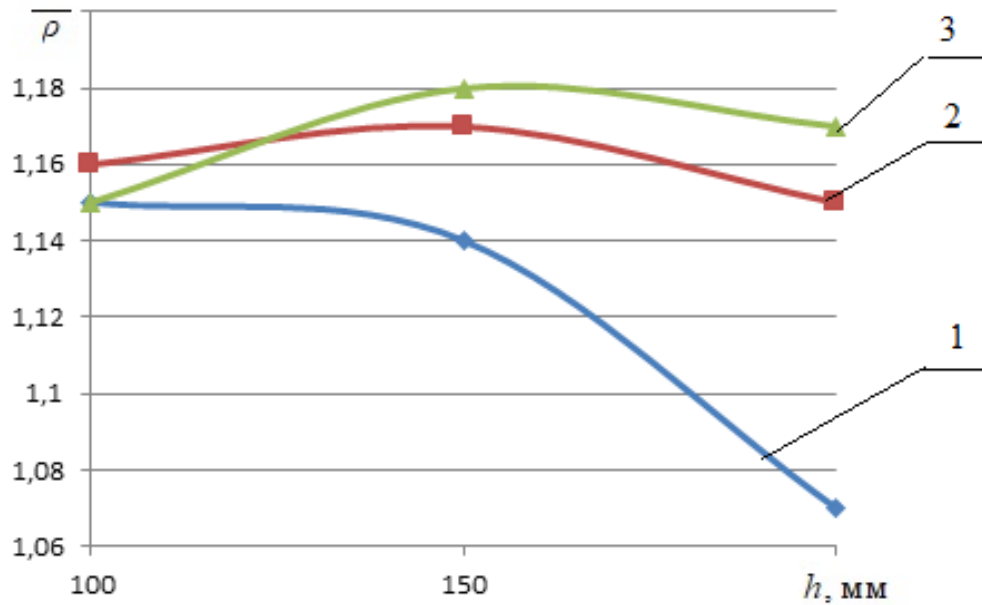


Рисунок 2. Зависимость $\bar{\rho}$ (h) при различных углах наклона склона:

1 - $\alpha=5^\circ$; 2 - $\alpha=10^\circ$; 3 - $\alpha=20^\circ$

Figure 2. Dependence of $\bar{\rho}$ (h) at different slope angles:

1 - $\alpha=5^\circ$; 2 - $\alpha=10^\circ$; 3 - $\alpha=20^\circ$

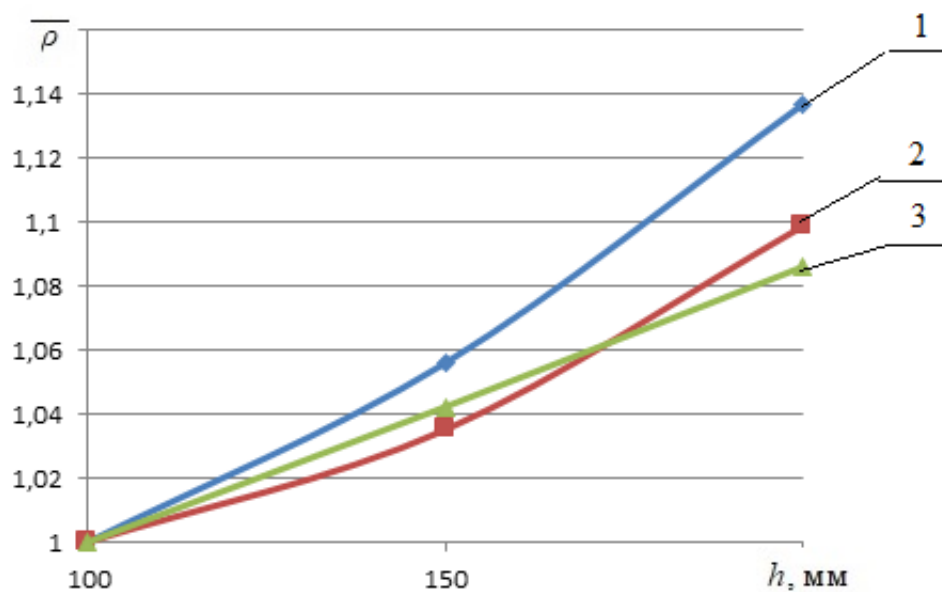


Рисунок 3. Влияние различных движителей на величину относительного уплотнения почвогрунта:

1 – колесный движитель, 2 – полугусеничный движитель, 3 – гусеничный движитель

Figure 3. The effect of various propellers on the relative compaction of the soil:

1 – wheeled propulsion, 2 – semi-tracked propulsion, 3 – tracked propulsion

Важным следствием полученных результатов является возможность произвести сравнительную оценку величины давления q , который движитель оказывает на почву при многократном (N) проходе лесной машины по одному и тому же участку волока, или технологического коридора.

В работе [6] установлена связь между плотностью ρ_N почвогрунта и величиной давления движителя q при изменении параметра N – количества циклов прохода по одному и тому же участку волока, или технологического коридора.

Обобщая полученную в [6] формулу, представим ее в виде многопараметрической функции f :

$$\rho_N = \rho_0 + \rho_0 f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) q (1 + \chi \lg N), \quad (1)$$

где ρ_0 - начальная плотность почвогрунта до первого прохода движителя, параметры λ_i : λ_1 - модуль общей деформации E , λ_2 - глубина H распространения деформации в массиве, λ_3 - ширина b движителя, λ_4 - коэффициент Пуассона ν , λ_5 - коэффициент ω формы и размера опорной поверхности, χ – коэффициент интенсивности накопления необратимых деформаций, который при отсутствии экспериментальных данных принимается $\chi=1$.

Разделив обе части (1) на величину начальной плотности ρ_0 , получаем в левой части величину относительного уплотнения на определенном цикле прохода движителя:

$$\bar{\rho}(N) = 1 + f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) q (1 + \chi \lg N), \quad (2)$$

т.е. при прочих равных условиях для одного и того же движителя имеем при $\chi=1$ соотношение пропорциональности:

$$\bar{\rho}(N) - 1 \sim q(1 + \lg N), \quad (3)$$

откуда выразим соотношение для прогноза давления в виде

$$q \sim \frac{\bar{\rho}(N) - 1}{1 + \lg N}. \quad (4)$$

Основываясь на данных табл. 1, после их трансформации в относительном виде для определения величины $\bar{\rho}$ при $N=3$ представляется возможным выполнить сравнительный анализ величины давления движителя q_i ($i=1,2,3$) различного типа.

Поскольку система неравенств имеет вид:

$$q_1 > q_2 > q_3, \quad (5)$$

то наибольший интерес имеет оценка (рисунок 4) прогноза относительного увеличения величины q_1 для колесного движителя с ростом угла наклона склона α° и глубины отбора пробы h , мм.

В процессе расчетов величина q_1 отнесена к базовым (минимальным) значениям параметров $\alpha=0-5^\circ$ и $h=50-100$ мм с целью выявления тенденции изменения давления движителя по мере роста угла наклона склона и увеличения глубины колеи.

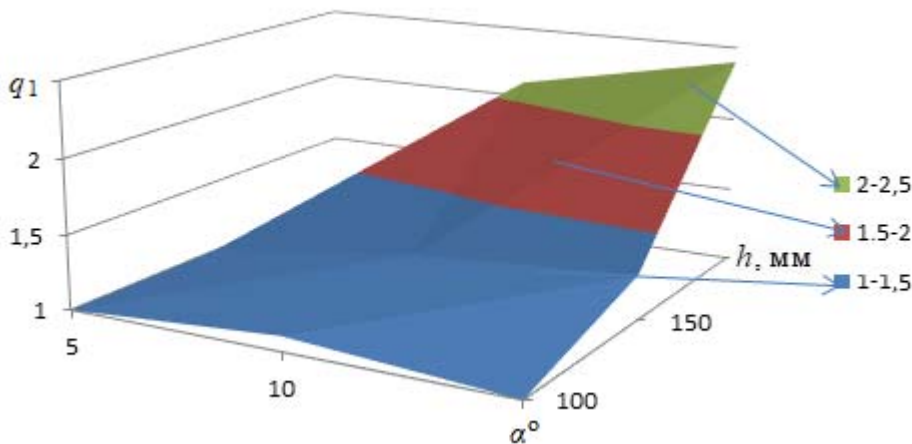


Рисунок 4. Влияние угла наклона склона и глубины отбора проб на величину относительного увеличения давления движителя

Figure 4. The effect of the slope angle and sampling depth on the magnitude of the relative increase in propellant pressure

Обсуждение

Как видим, с ростом угла наклона склона при многократном проходе колесного движителя на глубине до 200 мм величина давления движителя увеличивается в 2-2,5 раза по сравнению с условиями, соответствующими базовым значениям параметров α и h .

Для двух других движителей аналогичные оценки показывают существенно меньшее (не более 20-25%) влияние параметров α и h на возможность роста давления движителя на почву.

Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют о необходимости оперативного определения пористости почвогрунта для различных природно-производственных условий работ на склоне с целью прогноза возможного увеличения величины давления движителя различных лесных машин на краевую часть массива по всей глубине образованной колеи.

Такой прогноз является весьма важным, поскольку в практике освоения лесных массивов на склонах принято использовать в качестве путей первичного транспорта различные ущелья и каналы с уклоном до 20° , не являющиеся постоянными водотоками, если их расположение совпадает с продольной осью лесосеки [2, 24].

При этом, при использовании машин с интегрированными в трансмиссию лебедками, или в паре с отдельными самоходными лебедками, допустимый по эксплуатационным показателям машин угол уклона может существенно увеличиваться. Если при принятии организационно-технологических решений, заключающихся, прежде всего, в выборе системы машин, и составлении схемы транспортного освоения лесного участка, не учитывать прогноз изменения пористости почвогрунтов под воздействием движителей лесных машин, то это может привести к достаточно негативным экологическим последствиям. Которые будут заключаться, прежде всего, в том, что внутренний сток в переуплотненном почвогрунте существенно снизится, и при обильных дождях или активном снеготаянии существенно возрастет поверхностный сток. Это, в свою очередь, приведет к резкому увеличению интенсивности эрозионных процессов, снижению эффективности, или полной остановке лесовосстановительных процессов.

Полученные результаты подтверждают данные работ [25-], что в сложных природно-производственных условиях, включая работу на склонах, машины с полугусеничными движителями имеют определенное преимущество, по сравнению с колесными и гусеничными.

Как и гусеничные движители, они оказывают значительно меньшее негативное воздействие на почвогрунты, по сравнению с колесными, и при этом имеют преимущество, заключающееся в возможности быстрого перевода на чисто колесный ход, когда в полугусеничном отпадает необходимость.

К примеру, для рассматриваемых условий, колесный трактор, типа МТЗ, для трелевки, или выполнения других работ на склоне, переоснащается на полугусеничный ход (рис. 5).



Рисунок 5. Задняя ось трактора МТЗ, переоснащенного на полугусеничный ход
Figure 5. The rear axle of the MTZ tractor, re-equipped with a half-track

Переоснащение на полугусеничный ход занимает около 30 мин, и дает следующие преимущества: существенно увеличивается сила тяги, повышается устойчивость трактора (уменьшается опрокидывающий момент за счет увеличения веса), уменьшается давление движителя на опорную поверхность, а, следовательно, интенсивность негативного экологического воздействия на почвогрунты.

После окончания трелевки, или выполнения иных работ на склоне, трактор переоснащается на колесный ход, и может выполнять транспортные, или иные технологические операции, на больших скоростях, свойственных колесным тракторам.

Как было отмечено выше, колесные лесные машины, с тандемами, также могут быть переоснащены на гусеничный ход, что также приводит к рассмотренным выше для тракторов на полугусеничном ходу положительным эффектам.

Как показали результаты исследований, гусеничные тракторы оказывают наименьшее уплотняющее воздействие на почвогрунты, но они лишены преимуществ в рабочих скоростях, свойственных колесным машинам. Кроме этого, гусеничные тракторы, в подавляющем большинстве случаев, приходится перевозить с одного рабочего участка на другой при помощи специального трала, а это достаточно затратно, особенно для мелких и тем более малообъемных лесозаготовительных предприятий. Колесные тракторы между рабочими участками могут перемещаться своим ходом, включая дороги общего пользования, выезд на которые гусеничным тракторам запрещен. Во многом именно это обстоятельство сыграло в пользу распространения именно колесных лесных машин на лесозаготовительных предприятиях Российской Федерации. И оно осо-

бенно важно в условиях дефрагментированного лесосечного фонда, свойственного для лесов на склонах.

Результаты исследования, с точки зрения требований среднего освоения лесных массивов на склонах, позволяют рекомендовать обязательное переоснащение работающих на них колесных машин на гусеничный или полугусеничный ход, а также обязательный учет прогнозных показателей плотности и пористости почвогрунтов после многократного воздействия на них движителей лесных машин при принятии организационно-технологических решений, связанных с разработкой схемы транспортного освоения разрабатываемого лесного участка.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований, для их практического применения, планируется разработать прикладную программу, позволяющую при введении в качестве исходных данных параметров склона и используемых на нем лесных машин автоматически получать прогнозные показатели изменения плотности и пористости почвогрунта.

Список литературы

1. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 3 (399). С. 140-152.
2. Лонгишвили А.И. Исследование некоторых вопросов первичной транспортировки древесины в хлыстах в горных условиях. Автореферат канд. техн. наук. Спец. 05.20.01. Тбилиси: Грузинский ордена трудового красного знамени сельскохозяйственный институт. 1974. – 34 с.
3. Чемшикова Ю.М., Давтян А.Б., Григорьева О.И. Транспортно-технологические системы для лесоразведения на базе гусеничных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. редактор Н.С. Захаров. 2020. С. 400-403.
4. Тетеревлева Е.В., Гринько О.И., Григорьева О.И. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колесных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. редактор Н.С. Захаров. 2020. С. 374-377.
5. Григорьев И.В., Чураков А.А., Григорьева О.И. Перспективная конструкция вездехода для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы. материалы международной научно-технической конференции. 2017. С. 136-139.
6. Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И., Войнаш С.А. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров // Машиностроение: новые концепции и технологии. Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2020. С. 45-49.

7. Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. ред. Н. С. Захаров. 2018. С. 79-83.
8. Григорьева О.И. Новая машина для проведения рубок ухода за лесом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 2-2 (13-2). С. 116-119.
9. Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И. Перспективы импортозамещения в производстве лесохозяйственных и лесопожарных машин в России // Лесозаготовка и комплексное использование древесины. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2020. С. 66-69.
10. Григорьева О.И. Повышение эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия. 2016. С. 70-73.
11. Григорьева О.И. Перспективные направления повышения эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2017. С. 56-58.
12. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. Материалы научно-технической конференции. 2016. С. 112-114.
13. Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьев И.В. Анализ естественного лесовозобновления в Алексеевском участковом лесничестве Республики Саха (Якутия) // Forest Engineering. Материалы научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 72-75.
14. Никитина Е.И., Куницкая О.А., Николаева Ф.В. Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике. Сборник научных статей по материалам Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием в рамках «Северного форума – 2020» (29–30 сентября 2020 г., Якутск) и Международной научной онлайн летней школы – 2020 (6–20 июля 2020 г., Якутск). 2020. С. 138-148.
15. Куницкая О.А., Никитина Е.И., Николаева Ф.В. Особенности лесозаготовки в Республике Саха Якутия // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 308-313.
16. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. редактор Н.С. Захаров. 2020. С. 323-326.
17. Куницкая О.А., Степанова Д.И., Григорьев М.Ф. Перспективные направления развития транспортно-технологических систем лесного комплекса России // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции / под общ. ред. В.А. Гулевского. 2018. С. 109-114.
18. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. №2 (374). С. 101-117.
19. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Пучнин А.Н. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой // Лесотехнический журнал. 2019. Т.9. №1 (33). С. 116-128.

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

21. 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 // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 3-16.

22. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2 (139). С. 87-91.

23. Гурьев А.Ю., Григорьев И.В., Дмитриев А.С., Каляшов В.А., Должиков И.С., Дьяченко В.М. Экспериментальные исследования экологической безопасности лесных машин с колесным, гусеничным и полугусеничным двигателем при работе на склонах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 1. С. 59-68.

24. Каляшов В.А., До Туан А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // Resources and Technology. 2022. Т. 19. № 2. С. 1-47.

25. Дмитриев А.С., Кривошеев А.А. Оптимальные параметры колесных тракторов для оснащения полугусеничным ходом // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Девятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2023. С. 70-71.

26. Дмитриев А.С., Должиков И.С., Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Дьяченко В.М., Швецов А.С. Теоретическое обоснование параметров двигателя колесно-гусеничной лесной машины // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 163-170.

27. Должиков И.С., Куницкая О.А., Кривошеев А.А., Дмитриев А.С. Перспективы использования колесных тракторов малого и среднего класса для тяги для выполнения лесохозяйственных работ // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Девятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2023. С. 75-76

28. Герц Э.Ф., Куницкая О.А., Макуев В.А., Дмитриев А.С., Тихонов Е.А., Григорьева О.И. Средоадаптирующие технологии разработки лесосек в условиях Свердловской области // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 1. С. 52-63.

29. 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.

30. Добрецов Р.Ю., Дмитриев А.С., Григорьев И.В. Проблемы и перспективы использования в лесном комплексе машин с полугусеничным двигателем // Вестник АГАТУ. 2022. № 4 (8). С. 95-105.

References

1. Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P. Formation of a track by a forest machine mover on the slope of a thawing cryolithozone soil, taking into account the effect of solifluction // Izvestia of Higher Educational Institutions. Forest Journal. 2024. No. 3 (399). pp. 140-152.

2. Longishvili A.I. Investigation of some issues of primary transportation of wood in whips in mountainous conditions. Abstract of the Candidate of Technical Sciences. Special 05.20.01. Tbilisi: Georgian Order of the Red Banner of Labor Agricultural Institute. 1974. – 34 p.

3. Chemshikova Yu.M., Davtyan A.B., Grigoreva O.I. Transport and technological systems for afforestation based on tracked all-terrain vehicles // Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Editor N.S. Zakharov. 2020. pp. 400-403.

4. Teterevleva E.V., Grinko O.I., Grigoreva O.I. Transport and technological machines for extinguishing forest fires based on wheeled all-terrain vehicles // Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Editor N.S. Zakharov. 2020. pp. 374-377.
5. Grigorev I.V., Churakov A.A., Grigoreva O.I. Perspective design of an all-terrain vehicle for forestry // Transport and transport-technological systems. materials of the international scientific and technical conference. 2017. pp. 136-139.
6. Grigoreva O.I., Davtyan A.B., Grinko O.I., Voynash S.A. The concept of a universal machine for performing forestry work and extinguishing forest fires // Mashinostroenie: new concepts and technologies. All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. Krasnoyarsk, 2020. pp. 45-49.
7. Grigoreva O.I. Efficiency of transport and technological systems for forestry // Transport and transport and technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Ed. by N. S. Zakharov. 2018. pp. 79-83.
8. Grigoreva O.I. A new machine for logging forest care // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3. No. 2-2 (13-2). pp. 116-119.
9. Grigoreva O.I., Davtyan A.B., Grinko O.I. Prospects of import substitution in the production of forestry and forest fire fighting machines in Russia // Forest exploitation and integrated use of wood. Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference. Krasnoyarsk, 2020. pp. 66-69.
10. Grigoreva O.I. Improving the efficiency of logging of forest care // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Second All-Russian Scientific and Practical conference with international participation dedicated to the 65th anniversary of higher forest education in the Republic of Karelia. 2016. pp. 70-73.
11. Grigoreva O.I. Promising directions for improving the efficiency of logging of forest care // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the third All-Russian scientific and practical conference with international participation. 2017. pp. 56-58.
12. Grigoreva O.I., Nguyen F.Z. Promising equipment for logging of forest care // Forests of Russia: politics, industry, science, education. Materials of the scientific and technical conference. 2016. pp. 112-114.
13. Grigoreva O.I., Grigorev M.F., Grigorev I.V. Analysis of natural reforestation in the Alekseevsky district forestry of the Republic of Sakha (Yakutia) // Forest Engineering. Materials of the scientific and practical conference with international participation. 2018. pp. 72-75.
14. Nikitina E.I., Kunitskaya O.A., Nikolaeva F.V. The project of organization of logging in the conditions of the Aldan forestry with the use of multi-operational logging complexes // Modern problems and achievements of agricultural science in the Arctic. A collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Student Scientific and Practical conference with international participation within the framework of the Northern Forum 2020 (September 29-30, 2020, Yakutsk) and the International Online Scientific Summer School 2020 (July 6-20, 2020, Yakutsk). 2020. pp. 138-148.
15. Kunitskaya O.A., Nikitina E.I., Nikolaeva F.V. Features of logging in the Republic of Sakha Yakutia // Land management, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects of development. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 255th anniversary of Land Management in Yakutia and the Year of Science and Technology. Yakutsk, 2021. pp. 308-313.
16. Rudov S.E., Kunitskaya O.A. Theoretical studies of ecological compatibility of wheeled forest vehicles and permafrost soils of cryolithozones forests // Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Editor N.S. Zakharov. 2020. pp. 323-326.
17. Kunitskaya O.A., Stepanova D.I., Grigorev M.F. Promising directions for the development of transport and technological systems of the Russian forest complex // Energy efficiency and energy conservation in modern production and society. Materials of the international scientific and practical conference. Under the general editorship of V.A. Gulevsky. 2018. pp. 109-114.

18. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Investigation of the process of destruction of frozen and thawing soils under the influence of a skidding system // Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine. 2020. No.2 (374). pp. 101-117.
19. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorev M.F., Puchnin A.N. Features of accounting for the state of an array of frozen soils during cyclic interaction with a skidding system // Forestry journal. 2019. Vol.9. No.1 (33). pp. 116-128.
20. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Modeling of interaction of forest machines with soil when working on slopes // Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine. 2021. No.6 (384). pp.121-134.
21. Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Khitrov E.G., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Kalita O.N. Influence of variable coefficients of resistance to movement and adhesion on forwarder performance // The woodworking industry. 2021. No. 1. pp. 3-16.
22. Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymsky A.A., Grigoreva O.I. Determination of precipitation during the movement of a logging machine on a two-layer base // Scientific notes of Petrozavodsk State University. 2014. No. 2 (139). pp. 87-91.
23. Guryev A.Yu., Grigorev I.V., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Dolzhikov I.S., Dyachenko V.M. Experimental studies of environmental safety of forest machines with wheeled, tracked and semi-tracked propulsion when working on slopes // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2024. No. 1. pp. 59-68.
24. Kalyashov V.A., Do Tuan A., Khitrov E.G., Grigoreva O.I., Guryev A.Yu., Novgorodov D.V. Modern machine systems and technologies of wood harvesting and reforestation in conditions of mountain cutting areas // Resources and Technology. 2022. Vol. 19. No. 2. pp. 1-47.
25. Dmitriev A.S., Krivosheev A.A. Optimal parameters of wheeled tractors for equipping with a half-track // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Ninth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. Petrozavodsk, 2023. pp. 70-71.
26. Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Khitrov E.G., Dyachenko V.M., Shvetsov A.S. Theoretical substantiation of the parameters of the propulsion of a wheeled tracked forest machine // The system. Methods. Technologies. 2024. No. 1 (61). pp. 163-170.
27. Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Krivosheev A.A., Dmitriev A.S. Prospects of using wheeled tractors of small and medium class for traction to perform forestry work // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Ninth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. Petrozavodsk, 2023. pp. 75-76.
28. Hertz E.F., Kunitskaya O.A., Makuyev V.A., Dmitriev A.S., Tikhonov E.A., Grigoreva O.I. Environment-saving technologies for the development of cutting areas in the Sverdlovsk region // The woodworking industry. 2023. No. 1. pp. 52-63.
29. Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Ecological safety of forest machines on a half-track // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2023. No. 5. pp. 44-51.
30. Dobretsov R.Yu., Dmitriev A.S., Grigorev I.V. Problems and prospects of using semi-tracked vehicles in the forest complex // Herald of AGATHU. 2022. No. 4 (8). pp. 95-105.

Сведения об авторах

Гурьев Александр Юрьевич – аспирант кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>, e-mail: sashafuryjager96@gmail.com.

Шатино Владимир Яковлевич - доктор технических наук, профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Каляшов Виталий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Начертательной геометрии и инженерной графики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, e-mail: vit832@yandex.ru.

Морковин Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: morkovin-vladimir@mail.ru.

Дьяченко Владимир Михайлович – аспирант кафедры Машин автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>, e-mail: Volodya.Dyachenko1986@mail.ru.

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

Information about the authors

Alexander Yu. Guryev – postgraduate student of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>, e-mail: sashafuryjager96@gmail.com.

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, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Vitaly A. Kalyashov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, e-mail: vit832@yandex.ru.

Vladimir A. Morkovin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: morkovin-vladimir@mail.ru.

Vladimir M. Dyachenko – Postgraduate student of the Department of Machines of Automated Systems, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>, e-mail: Volodya.Dyachenko1986@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, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author