

Теоретическое обоснование допустимого среднего давления на грунт движителя лесной машины, работающей на склоне

До Туан Ан^{1a}, Г.В. Григорьев^{2b}, В.А. Каляшов^{3c}, А.Ю. Гурьев^{4d}, Е.Г. Хитров^{2e}

¹ Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства, Шоссе 21, Суан Май, район Чуонгми, Ханой, Вьетнам

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

^a anhdo.dhln@gmail.com, ^b vtl-lta@mail.ru, ^c vit832@yandex.ru, ^d sashafuryjager96@gmail.com, ^e yegorkhitrov@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-9421-360X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6368-3967>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

Статья поступила 27.02.2022, принята 19.04.2022

Во многих странах мира достаточно большие запасы лесных ресурсов находятся на горных склонах. Такие природно-производственные условия характерны для Дальнего Востока Российской Федерации, многих стран Азиатско-Тихоокеанского региона, в том числе Социалистической Республики Вьетнам, США, ряда европейских стран (Чехия, Австрия, и т. д.). Работы по заготовке древесины в условиях горных лесосек существенно снижают производительность и повышают риски для людей и техники. Во многих индустриально развитых странах мира преобладают машинные способы заготовки древесины, включая освоение лесов на горных склонах. Колесные лесные машины, работающие на горных склонах, прежде всего оснащаются специальными гусеницами. Необходимо учитывать, что экосистемы горных лесов являются очень ранимыми, и при неправильном проведении работ, избыточном негативном воздействии на почвогрунт на них могут возникать и быстро развиваться процессы водной и ветровой эрозии. Особенно опасным для экосистем лесов на склонах является процесс образования колеи под воздействием движителей лесных машин. Именно колея волока служит концентратором водной и, часто, ветровой эрозии. Кроме того, превышение несущей способности почвогрунта может приводить к возникновению оползней, соскальзыванию машины по склону. В статье представлено теоретическое обоснование допустимого среднего давления движителя работающей на склоне лесной машины на почвогрунт при ограничении глубины образующейся колеи.

Ключевые слова: горные леса; леса на склонах; лесосечные работы; трелевка; лесные машины; почвогрунты; образование колеи.

Theoretical justification of the permissible average pressure on the soil produced by the forest machine mover operating on the slope

Do Tuan An^{1a}, G.V. Grigoriev^{2b}, V.A. Kalyashov^{3c}, A.Yu. Guriev^{4d}, E.G. Hitrov^{2e}

¹ Vietnam National Forestry University; 21, Highway, Suan Mai, Truongmi District, Hanoi City, Vietnam

² St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

³ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

⁴ Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha, Yakutia

^a anhdo.dhln@gmail.com, ^b vtl-lta@mail.ru, ^c vit832@yandex.ru, ^d sashafuryjager96@gmail.com, ^e yegorkhitrov@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-9421-360X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6368-3967>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

Received 27.02.2022, accepted 19.04.2022

In many countries of the world, quite large reserves of forest resources are located on mountain slopes. Such natural-production conditions are typical for the Far East of the Russian Federation, many countries of the Asia-Pacific Region (APR), including the Socialist Republic of Vietnam, the USA, and a number of European countries (Czech Republic, Austria, etc.). Logging operations in mountainous areas significantly reduce productivity and increase risks for people and machinery. In many industrialized countries of the world, machine logging methods dominate, including the development of forests on mountain slopes. Wheeled forest machines operating on mountain slopes are primarily equipped with special tracks. It is necessary to take into account the fact that ecosystems of mountain forests are very vulnerable, in case of wrong execution of works, so, in case of excessive negative impact on soil, processes of water and wind erosion can arise and develop quickly on them. Especially dangerous for forest ecosystems on slopes is the process of rutting un-

der the influence of forest machine movers. It is the rut that serves as a concentrator of water and often wind erosion. Besides, exceeding the bearing capacity of the soil can result in landslides and machines sliding down the slope. The article presents theoretical substantiation of permissible average pressure of a forestry machine, operation on a slope, on the ground when limiting the depth of a formed rut.

Keywords: mountain forests; forests on slopes; logging; skidding; forest machines; soils; rutting.

Введение. Многие страны мира обладают значительными запасами леса, произрастающего на сильно пересеченной местности с крутыми склонами. Такие леса, в том числе, характерны и для Российской Федерации (Дальний Восток, часть Сибири, часть Краснодарского края и др.), и для Социалистической Республики Вьетнам, в которой более 70 % естественных лесов произрастает в горной местности.

Как известно, эффективность проведения лесосечных работ, в том числе и на склонах, складывается из экономических и экологических показателей. Экономические показатели считаются хорошими при достижении возможного минимума себестоимости заготовленной древесины, т. е. минимизации затрат на подготовительные, вспомогательные и основные работы, объем которых во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [1–5].

Экологические показатели лесосечных работ считаются хорошими при достижении возможного минимума отрицательного воздействия на лесную экосистему и, соответственно, при достижении минимума затрат на последующее лесовосстановление. При этом степень отрицательного воздействия лесосечных работ на лесную экосистему также во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [6–10].

Цель работы: теоретическое обоснование допустимого среднего давления движителя работающей на склоне лесной машины на почвогрунт при нормативном ограничении глубины образующейся колеи.

Материалы и методы исследования. Используются справочные данные о физико-механических свойствах лесных почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Используются методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования. Известно уравнение для расчета глубины колеи, образующейся под воздействием движителя [11–14]:

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \arctg \frac{H - h}{ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \quad (1)$$

где p — среднее давление движителя по пятну контакта; E — модуль общей деформации грунтового основания; J — коэффициент, учитывающий соотношение сторон пятна контакта; a — коэффициент, учитывающий глубину распространения деформаций в грунтовом основании; b — средняя ширина пятна контакта; p_s — несущая способность почвогрунта; H — глубина распространения деформаций.

Уравнение (1) сложно в использовании на практике. В результате интерполяции правой части уравнения (1) и последующего выражения h нами получена следующая более удобная формула:

$$h = \frac{H(H + A(3x_1 - 4x_2))}{4A(x_1 - 2x_2)} - \frac{H \sqrt{(H + A(x_1 - 4x_2))^2 + 4H Ax_1}}{4A(x_1 - 2x_2)} \quad (2)$$

где обозначено:

$$x_1 = \arctg \frac{H}{ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, x_2 = \arctg \frac{H}{2ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \quad (3)$$

$$A = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}$$

Следует отметить, что при неограниченной толщине деформируемого слоя (для слабонесущих почвогрунтов) из (2) следует оценка:

$$h_m = \lim_{H \rightarrow \infty} h = Ax_1 = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{2E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \quad (4)$$

На основе аппроксимации результатов [11–18] нами получено уравнение для расчета несущей способности почвогрунта:

$$p_s = q_s \delta_\beta, \quad (5)$$

где

$$q_s = 5,22C + \frac{109C + 1,5B}{10000} \varphi^2, \quad (6)$$

$$\delta_\beta = 1 - \frac{56 + \varphi}{10000} \beta, \quad (7)$$

где C — сцепление частиц почвогрунта; φ — угол внутреннего трения частиц почвогрунта.

Для завершения формирования математической модели, позволяющей рассчитать глубину колеи, образующейся под воздействием гусеничного движителя, работающего на склоне, приведем уравнения для расчета параметров J , a [13; 14]:

$$J = \frac{0,03 + \frac{l}{b}}{0,6 + 0,43 \frac{l}{b}} \quad (8)$$

$$a = 0,64 \frac{H + b}{H}, \quad (9)$$

где l — средняя длина пятна контакта.

Значения глубины колеи, полученные по предлагаемому уравнению (2), сопоставлены с результатами решения уравнения (1) (рис. 1) (расчет выполнен при $E = 1$ МПа, $p_s = 0,1$ МПа, $b = 0,6$ м, $\beta = 15^\circ$, $H = 2b/\cos\beta$, $l = 5b$).

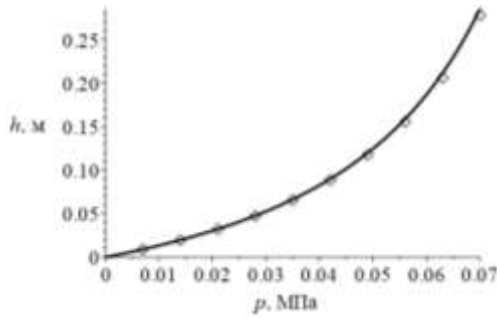


Рис. 1. Сопоставление результатов решения уравнения (1) (маркеры) и значений глубины колеи по предлагаемому уравнению (14) (сплошная линия)

График показывает хорошую сходимость результатов, полученных по уравнению (1), апробированному ранее, и по предлагаемому уравнению (2). При изменении исходных данных к решению в пределах, харак-

терных для гусеничных лесных машин, сходимость аналогична.

Для обоснования параметров движителей гусеничных лесных машин, обеспечивающих надежную работу техники на склонах, вначале примем критерий допустимой глубины колеи. Известны результаты исследований, показывающие, что глубина колеи свыше 0,2 м неприемлема с точки зрения экологического воздействия на почвогрунт. Кроме того, при колее свыше 0,2 м существенно снижаются показатели проходимости техники [15–24]. Выполним расчет давления $p = p_{adm}$, при котором расчетное значение глубины колеи h по формуле (2) не превысит 0,2 м. Угол наклона оставим переменной величиной $\beta = var$, прочие параметры для расчета $b = 0,6$ м, $l = 5b$, $H = 2b/\cos\beta$. Рассмотрим три категории прочности почвогрунта, физико-механические свойства которых изменяются в соответствии с табл. 1, составленной на основе сведений [11–18].

Таблица 1. Физико-механические свойства почвогрунта по категориям прочности

Параметры	Категории прочности		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
E , МПа	0,4	1	3
G , МПа	0,74	1,99	6,53
C , кПа	0,005	0,012	0,024
φ , °	11	15	16
q_s , МПа	0,047	0,095	0,233

Источник: [11–18]

Результаты численного решения уравнения (2) относительно $p = p_{adm}$ представлены на рис. 2–4.

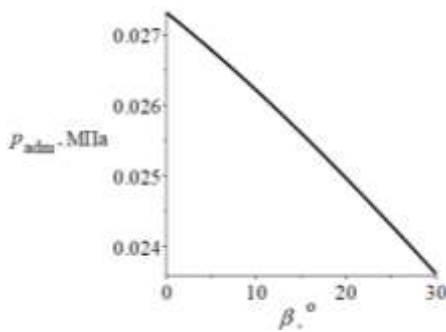


Рис. 2. Допустимое среднее давление гусеничного движителя, ограниченное глубиной колеи 0,2 м, в зависимости от угла наклона грунтовой поверхности (почвогрунты III категории прочности)

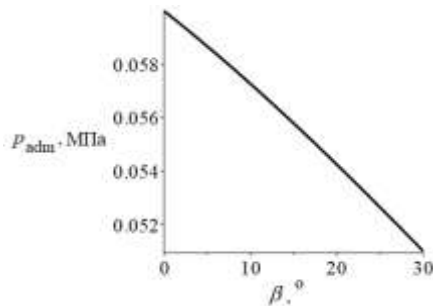


Рис. 3. Допустимое среднее давление гусеничного движителя, ограниченное глубиной колеи 0,2 м, в зависимости от угла наклона грунтовой поверхности (почвогрунты II категории прочности)

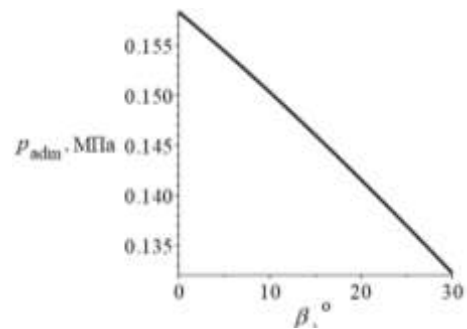


Рис. 4. Допустимое среднее давление гусеничного движителя, ограниченное глубиной колеи 0,2 м, в зависимости от угла наклона грунтовой поверхности (почвогрунты I категории прочности)

На рис. 5 проиллюстрировано соотношение допустимого среднего давления гусеничного движителя, ограниченное глубиной колеи 0,2 м, и несущей способности почвогрунта в зависимости от угла наклона опорной поверхности.

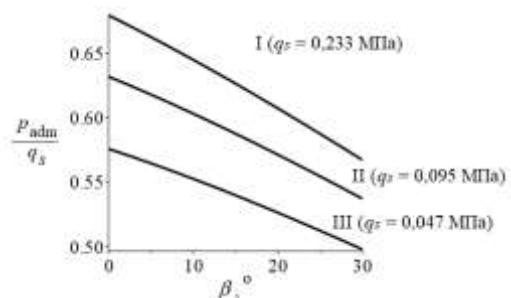


Рис. 5. Соотношение допустимого среднего давления гусеничного движителя, ограниченное глубиной колеи 0,2 м, и несущей способности почвогрунта в зависимости от угла наклона

Поскольку в общем случае угол наклона опорной поверхности является переменной величиной на участке, где работает лесная техника, следует задаться его верхней оценкой. Исходя из рекомендаций производителей, ограничивающих максимальный наклон поверх-

ности движения машин, примем предельно допустимое значение $\beta = 30^\circ$.

Тогда получим оценки среднего давления гусеничного движителя, допустимого по критерию глубины образующейся колеи, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Среднее давление гусеничного движителя, допустимое по критерию глубины образующейся колеи на склоне 30°

Показатель	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
Допустимое среднее давление p_{adm} , МПа	0,024	0,051	0,132
Несущая способность грунта q_s , МПа	0,047	0,095	0,233
Соотношение давления и несущей способности p_{adm}/q_s	0,51	0,54	0,57

В случае, если задается количественная характеристика прочности почвогрунта (несущая способность q_s), среднее давление гусеничного движителя, допустимое по глубине колеи, можно оценить при помощи графика, построенного на основе данных табл. 2 (рис. 6), либо рассчитать по формуле, полученной в результате аппроксимации табличных данных:

$$p_{adm} = q_s \cdot (0,642 + 0,035 \ln q_s), \quad (10)$$

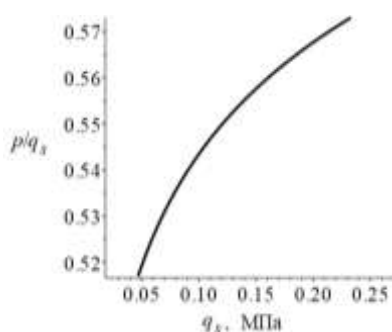


Рис. 6. Среднее давление гусеничного движителя, допустимое по критерию глубины образующейся колеи на склоне 30°

Выводы

В результате работы выполнено теоретическое обоснование допустимого среднего давления движителя работающей на склоне лесной машины на почвогрунт при ограничении глубины образующейся колеи. Это позволяет на уровне принятия проектных решений повысить экологическую совместимость лесных машин с лесной средой при работе на склонах.

Авторский вклад. До Туан Ань: проведение расчетов и интерпретация их результатов (50 %); Г.В. Григорьев: разработка программы для проведения расчетов (12,5 %), В.А. Каляшов: разработка программы для проведения расчетов (12,5 %); А.Ю. Гурьев: анализ проблематики исследования (10 %); О.И. Григорьева: анализ проблематики исследования (10 %); Е.Г. Хитров: общее руководство работой (5 %).

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

Литература

- Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Пути повышения эффективности работы лесных машин // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55-63.
- Григорьев И.В., Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Рудов С.Е. Перспективы создания лесозаготовительных комплексов на базе отечественных строительных и сельскохозяйственных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 10. С. 3-10.
- Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Просужих А.А., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Современные подходы к повышению энергоэффективности и экономичности лесных машин // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. ст. по итогам шестой междунар. науч. конф. (29-30 июня 2020 г.). Казань, 2020. С. 138-140.
- Куницкая О.А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Шестой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (22 мая 2020 г.). Петрозаводск, 2020. С. 86-87.
- Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Организационно-технические решения для повышения коэффициента технической готовности лесных машин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. (9-10 июня 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 162-167.
- Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (22 окт. 2020 г.). Тюмень, 2020. С. 323-326.
- Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Моделирование процесса динамического уплотнения почвогрунта // IX Междунар. конф. по математическому моделированию, посвящ. 75-летию В.Н. Врагова: тез. докладов (27 июля-01 авг. 2020 г.). Якутск, 2020. С. 144.
- 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: сб. науч. ст. по материалам Всерос. студенческой науч.-практической конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума - 2020» (29-30 сент. 2020 г.) и Междунар. науч. онлайн летней школы - 2020 (6-20 июля 2020 г.). Якутск, 2020. С. 138-148.
- Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect

of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. V. 19. № 2. P. 439-447.

References

- Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. V. 18. № 3. P. 95-102.
- Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки, и физико-механических свойств почвогрунта // Resources and Technology. 2021. V. 18. № 1. P. 94-124.
- Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 94-99.
- Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Методика и результаты экспериментальных исследований взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 66-71.
- Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
- Ларин В.В. Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. М., 2007. 530 с.
- Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. СПб., 2018. 318 с.
- Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2020. 319 с.
- Рудов С.Е., Хитров Е.Г., Рудов М.Е., Устинов В.В. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 1 (12). С. 223-228.
- Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 1005-1012.
- Калистратов А.В., Иванов В.А., Коротков Р.К., Хитров Е.Г., Григорьев Г.В. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы) // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 190-193.
- Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пелымский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта // Учен. записки Петрозаводского гос. ун-та. 2013. № 8 (137). С. 77-80.
- Лухминский В.А. Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 2018. 179 с.
- He R., Sandu C., Khan A.K., Guthrie A.G., Schalk Els P., Hamersma H.A. Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications // Journal of Terramechanics. 2019. V. 81. P. 3-22.
- Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // International Review of Automatic Control. 2021. V. 14. № 3. P. 172-178.
- Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Rudov S.E., Davtyan A.B. Ways to improve the efficiency of forest machines // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2020. № 1. P. 55-63.
- Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Rudov S.E. Prospects for creating logging complexes based on domestic construction and agricultural machinery // Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization). 2020. № 10. P. 3-10.
- Manukovskij A.YU., Zorin M.V., Prosuzhikh A.A., Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V. Modern approaches to improving energy efficiency and efficiency of forest machines // Prioritetnye napravleniya innovacionnoj deyatel'nosti v promyshlennosti: sb. st. po itogam shestoj mezhdunar. nauch. konf. (29-30 iyunya 2020 g.). Kazan', 2020. P. 138-140.
- Kunickaya O.A. Proactive service for forest machines // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy SHevoj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (22 maya 2020 g.). Petrozavodsk, 2020. P. 86-87.
- Kunickaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Grigor'ev M.F., Grigor'eva A.I. Organizational and technical solutions to increase the factor of technical availability of forest machines // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (9-10 iyunya 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 162-167.
- Rudov S.E., Kunickaya O.A. Theoretical studies of ecological compatibility of wheeled forest machines and permafrost soils of cryolithozone forests // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (22 okt. 2020 g.). Tyumen', 2020. P. 323-326.
- Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'ev M.F., Grigor'eva A.I. Modeling of dynamic compaction of soil // IX Mezhdunar. konf. po matematicheskomu modelirovaniyu, posvyashch. 75-letiyu V.N. Vragova: tez. dokladov (27 iyulya-01 avg. 2020 g.). YAkutsk, 2020. P. 144.
- Nikitina E.I., Kunickaya O.A., Nikolaeva F.V. Project of logging organization in conditions of Aldan forestry with the use of multi-operational logging complexes // Sovremennye problemy i dostizheniya agrarnoy nauki v Arktike: sb. nauch. st. po materialam Vseros. studencheskoj nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem v ramkah «Severnogo foruma - 2020» (29-30 sent. 2020 g.) i Mezhdunar. nauch. onlajn letnej shkoly - 2020 (6-20 iyulya 2020 g.). YAkutsk, 2020. P. 138-148.
- Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. V. 19. № 2. P. 439-447.
- Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. V. 18. № 3. P. 95-102.
- Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Rudov S.E., Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V. Experimental studies of forwarder productivity with regard to its operational characteristics, logging parameters, and physical and mechanical properties of soil // Resources and Technology. 2021. V. 18. № 1. P. 94-124.
- Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A. Substantiation of initial requirements of mathematical model of interaction of wheeled vehicles on low pressure pneumatics with forest soils // Systems. Methods. Technologies. 2020. № 2 (46). P. 94-99.
- Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A. Methods and results of experimental studies of interaction of wheeled vehicles on low pressure

- pneumatics with forest soils // *Systems. Methods. Technologies*. 2020. № 1 (45). P. 66-71.
14. Agejkin Y.A.S. *Drivability of Cars*. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
 15. Larin V.V. *Methods of prognostication of the supportability of multi-axle wheeled vehicles on the ground: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03. M., 2007. 530 p.*
 16. Hahina A.M. *Methods of the prognostication and improvement of the cross-country ability of the wheeled forest machines: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. SPb., 2018. 318 p.*
 17. Hitrov E.G. *Complex substantiation of parameters and operating modes of forest machine propulsion systems: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. Voronezh, 2020. 319 p.*
 18. Rudov S.E., Hitrov E.G., Rudov M.E., Ustinov V.V. *Calculation of traction and coupling properties of a wheeled skidder using data from foreign colleagues // Aktual'nye napravleniya nauch. issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2015. V. 3. № 1 (12). P. 223-228.
 19. Kochnev A., Khitrov E. *Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings*, 2018. P. 1005-1012.
 20. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Hitrov E.G., Grigor'ev G.V. *Investigation of the filtration coefficient of forest soil (case of soddy-podzolic soil) // Systems. Methods. Technologies*. 2014. № 2 (22). P. 190-193.
 21. Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskij A.A., Hitrov E.G., Hahina A.M. *Experimental determination of the stress relaxation time of the forest soil // Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2013. № 8 (137). P. 77-80.
 22. Luhminskij V.A. *Improvement of models and methods for predicting the permeability of goose-nosed forest machines: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. SPb., 2018. 179 p.*
 23. He R., Sandu C., Khan A.K., Guthrie A.G., Schalk Els P., Hamersma H.A. *Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications // Journal of Terramechanics*. 2019. V. 81. P. 3-22.
 24. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. *Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // International Review of Automatic Control*. 2021. V. 14. № 3. P. 172-178.