

ОСНОВА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН С ПОВЕРХНОСТЯМИ ДВИЖЕНИЯ

доктор технических наук, профессор **О.Н. Бурмистрова**¹

Е.В. Тетеревлева¹

доктор технических наук, профессор **И.В. Григорьев**²

доктор технических наук, профессор **О.А. Куницкая**²

доктор технических наук, доцент **А.Ю. Мануковский**³

кандидат технических наук **С.Е. Рудов**⁴

аспирант **Д.С. Востриков**³

1 – ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

4 – ФГКВБОУ ВПО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Цель исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, – проанализировать научное описание свойств слабонесущих поверхностей движения лесных машин. Анализ показал, что универсальные математические модели взаимодействия колесного движителя с почвогрунтом строятся на положениях механики грунтов. Данный подход апробирован в науке о лесозаготовительном производстве, успешно используется современными отечественными и зарубежными исследователями. Однако с точки зрения разработки и реализации математического описания взаимодействия колесного движителя сверхнизкого давления, например, вездеходной колесной машины, с опорными поверхностями требуется учитывать соотношение сторон пятна контакта движителя с почвогрунтом, поскольку: давление движителя на грунт определяется как частное нагрузки на единственный движитель и площади пятна контакта; от соотношения длины и ширины пятна контакта зависит распределение сжимающего напряжения по глубине массива почвогрунта; несущая способность, характеризующая сопротивление сдвигу слоев почвогрунта, зависит не только от его физико-механических свойств, но и от параметров пятна контакта, что учитывается специальными поправочными коэффициентами, значения которых зависят от соотношения сторон пятна контакта; для учета числа проходов колесного вездехода по трассе и его скорости рассматривается реология почвогрунта, одной из характеристик воздействия движителя является время воздействия; при определении времени воздействия движителя на почвогрунт также используется значение длины пятна контакта.

Ключевые слова: лесные машины, лесозаготовки, колесные движители, почвогрунты, математическое моделирование

BASIS OF MATHEMATICAL INTERACTION MODELS OF WHEEL PROPELLERS OF FORESTRY MACHINES WITH SLIDING SURFACES

DSc (Engineering), Professor **O.N. Burmistrova**¹

E.V. Teterevleva¹

DSc (Engineering), Professor **I.V. Grigoryev**²

DSc (Engineering), Professor **O.A. Kunitskaya**²

DSc (Engineering), Associate Professor **A.Yu. Manukovsky**³

PhD (Engineering) **S.E. Rudov**⁴

post-graduate student **D.S. Vostrikov**³

1 – FSBEI HE "Ukhta State Technical University", Ukhta, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation

3 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",

Voronezh, Russian Federation

4 – Federal State Military Educational Institution of Higher Education "Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S.M. Budenny", Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract

The purpose of the research, the results of which are presented in this article, is to analyze the scientific description of the properties of weak bearing movement surfaces of forest machines. The analysis has showed that universal mathematical models of the wheel propeller interaction with soil are based on the provisions of soil mechanics. This approach has been tested in the science of forestry production. It is successfully used by modern domestic and foreign researchers. However, with regard to the development and implementation of a mathematical description of interaction of ultra-low pressure wheeled mover (for example, in all-terrain wheeled vehicle) with supporting surfaces, it is necessary to take into account the ratio of the sides of the mover's contact spot with the soil, since: mover pressure on the ground is defined as the partial load of a single mover and the area contact spots; the distribution of compressive stress over the depth of the soil mass depends on the ratio of the length and width of the contact spot; the bearing capacity characterizing the resistance to shear of the soil layers depends not only on its physical and mechanical properties, but also on the parameters of the contact spot, which is taken into account by special correction factors, the values of which depend on the aspect ratio of the contact spot. Soil rheology is considered to take into account the number of passes of a wheeled all-terrain vehicle along the route and its speed. One of the characteristics of the impact of the mover is exposure time. Value of the length of the contact spot is also used when determining the impact time of the mover on the soil.

Keywords: forest machines, logging, wheel movers, soils, mathematical modeling

Лесной почвогрунт представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из мягкого плодородного слоя, почвы – смеси органического вещества с минеральными частицами – и подстилающего слоя (либо слоев) неорганического грунта, причем граница слоев может быть размыта, слои могут быть перемешаны [1]. В ряде случаев лесозаготовительная техника работает на слабонесущих задернованных поверхностях, верхний (дерновый) слой которых прочнее подстилающего слоя [2].

Значения угла внутреннего трения φ , удельного сцепления C , модуля деформации E , коэффициента Пуассона ν , плотности ρ и толщины деформируемого слоя H для различных категорий лесного почвогрунта представлены в [1, 6–9]. Сведения об ориентировочных значениях угла внутреннего трения φ , удельного сцепления C и модуля деформации E заболоченных грунтов представлены на рис. 1 [2, 4, 5].

Универсальные математические модели взаимодействия колесного движителя с грунтом строятся в рамках теории движения автотранспорта в условиях бездорожья, основанной на положениях механики грунтов [4, 5]. Для вывода уравнения осадки опорной поверхности под воздействием движителя пользуются схемой, представленной на рис. 2.

В науке о лесозаготовительном производстве такой подход широко распространен и использовался, например, в работах [9–32], причем к настоящему времени были разработаны методы расчета показателей взаимодействия движителей с неоднородными опорными поверхностями [31, 32]. Отдельное направление исследований представляет собой изучение взаимодействия движителей с мерзлыми грунтами и снегом [33-36].

18	40	1,025
6		
5,5		0,115
19	7	0,19
	9	
13	35,5	1,315
14,5	11	0,315
13	13,5	0,395
	6,5	0,275
φ, о	С, кПа	Е, МПа

- Осушенное, гипново-осоково-лесной
- Лесное, березово-лесной в межкочечных понижениях
- Травяное, осоковый покров с межкочечными понижениями

Рис. 1. Свойства заболоченных грунтов [2, 4, 5]

Функция распределения сжимающего напряжения по глубине деформируемого грунта принимается с учетом затухания напряжения и геометрических свойств пятна контакта [4, 5]:

$$\sigma = \frac{Jp}{1 + (Az)^2}, \quad (1)$$

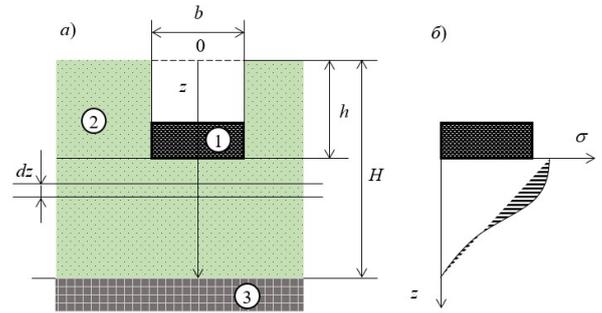


Рис. 2. Схема к расчету осадки опорной поверхности под воздействием движителя [4, 5]:

- а) – расчетная схема, 1 – движитель, 2 – деформируемая опорная поверхность, 3 – жесткое подстилающее основание, б) – эпюра нормального сжимающего напряжения, затухающего по глубине

где J – коэффициент, учитывающий форму и геометрию пятна контакта, A – коэффициент, учитывающий толщину деформируемого слоя грунта.

Коэффициенты J, A рассчитывают по формулам [4, 5]

$$J = \frac{0,03 + l/b}{0,6 + 0,43l/b}, \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{0,64 \cdot b \cdot (1 + b/H)}, \quad (3)$$

где l – длина пятна контакта, b – ширина пятна контакта.

При исследовании взаимодействия гусеничных движителей с почвогрунтом длину пятна контакта определяют исходя из длины горизонтальной проекции гусеницы на грунт. В этом случае длина пятна контакта условно не зависит от деформации почвогрунта и принимается как входной параметр. Для колесного движителя длину пятна контакта следует определять расчетным путем, причем с учетом радиальной деформации движителя h_z и грунта h [4, 5]:

$$l_1 = 2\sqrt{dh_z - h_z^2}, \quad (4)$$

$$l_2 = \sqrt{d \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (5)$$

$$l = l_1 + l_2 = 2\sqrt{dh_z - h_z^2} + \sqrt{d \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (6)$$

где d – диаметр колеса.

Радиальная деформация колесного движителя определяется его конструкцией и жесткостью, зависящей от рабочего внутреннего давления, а также механическими свойствами опорной поверхности (при прочих равных условиях, на прочных почвогрунтах радиальная деформация колеса выше, чем на слабонесущих) [9].

От соотношения длины и ширины пятна контакта зависит значение повышающего коэффициента J в формуле (2). Кроме того, давление движителя на грунт p , используемое в той же формуле, определяется как частное нагрузки на единичный движитель G_w и площади пятна контакта [9]

$$p = \frac{G_w}{bl} \quad (7)$$

С использованием уравнения нормального напряжения (1) определяют сжатие элементарного слоя почвогрунта под воздействием движителя [4, 5]

$$dh^* = \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (8)$$

как следствие, общая деформация сжатия деформируемого слоя почвогрунта определяется путем интегрирования [4, 5]:

$$h^* = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (9)$$

где z_1, z_2 – вертикальные координаты зоны распространения сжимающего нормального напряжения.

Фактическую осадку почвогрунта определяют с учетом воздействия сдвиговых напряжений, вызывающих увеличение глубины образующейся колеи. Влияние сдвиговых деформаций на фактическую осадку учитывают при помощи коэффициента потери несущей способности [4, 5]

$$h = k_p h^*, \quad (10)$$

где k_p – коэффициент учета потери несущей способности [4, 5]

$$k_p = \frac{p_s}{p_s - p}, \quad (11)$$

где p_s – несущая способность почвогрунта.

Интегрирование уравнения (9) приводит к получению формулы [4, 5]

$$h = \frac{Jp \operatorname{arctg} \left(\frac{AEz}{\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \right) \Big|_{z=z_1}^{z=z_2}}{A \sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \quad (12)$$

Согласно схеме на рис. 2, пределы интегрирования z_2 и z_1 равны соответственно $H - h$ и 0, следовательно [4, 5],

$$h = \frac{Jp \operatorname{arctg} \left(\frac{AE(H - h)}{\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \right)}{A \sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \quad (13)$$

Несущую способность почвогрунта определяют по формуле [4, 5]

$$p_s = \frac{\pi}{2} p_{s0} \alpha \operatorname{arctg} \frac{\pi \cdot (H - h)}{2b}, \quad (14)$$

где p_{s0} – несущая способность слоя почвогрунта неограниченной толщины, α – коэффициент, учитывающий ограниченную толщину деформируемого слоя почвогрунта.

Коэффициент α рассчитывают по уравнению [4, 5]

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \operatorname{arctg} \frac{\pi \cdot (H - h)}{2b} \quad (15)$$

Несущая способность слоя почвогрунта неограниченной толщины зависит не только от его физико-механических свойств, но и от параметров пятна контакта, что учитывается специальными поправочными коэффициентами [4, 5]

$$p_{s0} = K_{\beta 1} I_1 X_1 b + K_{\beta 2} I_2 X_2 + X_3 h, \quad (16)$$

где X_1, X_2, X_3 – коэффициенты учета влияния физико-механических свойств грунта, I_1, I_2 – коэффициенты учета геометрических параметров пятна контакта, $K_{\beta 1}, K_{\beta 2}$ – коэффициенты учета угла приложения нагрузки.

Расчет коэффициентов I_1, I_2 проводят по формулам [4, 5]

$$I_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad (17)$$

$$I_2 = \frac{l + b}{l + 0,5b} \quad (18)$$

В уравнениях (17), (18) вновь используется значение длины пятна контакта. Следовательно, жесткость колесного движителя оказывает влияние не только на нормальное давление на опорную поверхность и распространение сжимающих напряжений по глубине деформируемого грунта, но и на несущую способность почвогрунта под воздействием движителя.

Для расчета коэффициентов $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ получены уравнения [4, 5, 37, 38]

$$K_{\beta 1} = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, \quad (19)$$

$$K_{\beta 2} = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (20)$$

где β – отклонение угла приложения результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности [4, 5]

$$\beta = \arccos \frac{P}{\sqrt{P^2 + \tau^2}}, \quad (21)$$

где τ – касательное напряжение.

Для учета времени воздействия движителя на грунт, связанного с числом проходов машины по трассе и ее скоростью, используют поправочный коэффициент динамичности к давлению движителя на грунт [4, 5]

$$p = p_0 k_d, \quad (22)$$

где p_0 – давление движителя на опорную поверхность в статике, k_d – коэффициент динамичности, учитывающий время действия нагрузки.

Коэффициент динамичности рассчитывается с учетом принятой реологической модели грунта, в качестве которой чаще всего используется модель Максвелла [4, 5]

$$k_d \approx t / (t + t_p), \quad (23)$$

где t – суммарное время воздействия на грунт [4, 5];

$$t = n \frac{l}{v}, \quad (24)$$

где n – число проходов движителя по колее, v – поступательная скорость машины, t_p – время релаксации напряжений в грунте (экспериментальная величина, зависящая от типа и состояния грунта).

Резюмируя вышеизложенный анализ, отметим, что использование поправочного коэффициента динамичности в уравнении (22), полученного на основе

реологической модели Максвелла, обосновано для случаев изучения воздействия лесных машин на почвогрунты, толщина деформируемого слоя которых ограничена [9, 28].

Применение модели Максвелла при описании реологии поверхностей движения, например, колесных вездеходных машин, деформируемый слой которых не ограничен (например, заболоченных почвогрунтов), не вполне корректно, поскольку деформации таких поверхностей не затухают по времени [9, 28]. Кроме того, реализация математических моделей выполнена при значениях времени воздействия на почвогрунт, характерных для небольших рабочих скоростей машин, в пределах 5-10 км/ч [2, 9, 10, 27–30]. Рабочие скорости колесных вездеходных машин, форвардеров на магистральных волоках много выше и могут достигать 50 км/ч, следовательно, подход к моделированию развития деформаций лесных почв и грунтов во времени нуждается в уточнении.

В формуле (24) при определении времени воздействия движителя на почвогрунт также фигурирует длина пятна контакта. Следовательно, жесткость движителя оказывает влияние и на степень развития деформаций почвогрунта.

Предшественниками были получены уравнения для радиальной деформации колесных движителей лесных машин типовой конструкции, с рабочим внутренним давлением свыше 0,15 МПа [2, 9, 10, 27–30]. Для движителей сверхнизкого давления такие зависимости неизвестны, что осложняет разработку математической модели, позволяющей качественно прогнозировать показатели воздействия движителя сверхнизкого давления на опорную поверхность.

Универсальные математические модели взаимодействия колесного движителя лесных машин с почвогрунтом строятся на положениях механики грунтов. Данный подход апробирован в науке о лесозаготовительном производстве, успешно используется современными исследователями. Разработка и реализация математических моделей взаимодействия колесного движителя сверхнизкого давления с опорными поверхностями требует учитывать соотношение сторон пятна контакта движителя с почвогрунтом, поскольку: давле-

ние движителя на грунт определяется как частное нагрузки на единичный движитель и площади пятна контакта. От соотношения длины и ширины пятна контакта зависит распределение сжимающего напряжения по глубине массива почвогрунта. Несущая способность, характеризующая сопротивление сдвигу слоев почвогрунта, зависит не только от его физико-механических свойств, но и от параметров пятна контакта, что учитывается специальными поправочными коэффициентами, значения которых зависят от соотношения сторон пятна контакта. Для учета числа проходов колесного вездехода по трассе и его скорости рассматривается реология почвогрунта, одной из характеристик воздействия движителя является время воздействия. При определении времени воздействия движителя на почвогрунт также используется значение длины пятна контакта.

Для колесного движителя сверхнизкого давления длину пятна контакта следует определять расчетным путем, причем с учетом радиальной деформации движителя и грунта. Радиальная деформация колесного движителя определяется его конструкцией и жесткостью, зависящей от рабочего внутреннего давления, а также механическими свойствами опорной поверхности (при прочих равных условиях, на прочных почвогрунтах радиальная деформация колеса выше, чем на слабонесущих). Следовательно, жесткость колесного движителя оказывает влияние на целый комплекс параметров, определяющих показатели взаимодействия машины с грунтом.

Библиографический список

1. Григорьев, И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования / И. В. Григорьев. – Санкт-Петербург : ЛТА, 2006. – 236 с.
2. Дмитриева, М. Н. Моделирование взаимодействия колесного движителя малогабаритных лесных машин со слабонесущим грунтом : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Дмитриева Мария Николаевна. – Архангельск : С(А)ФУ, 2018. – 20 с.
3. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – Москва : Высшая школа, 1983. – 288 с.
4. Агейкин, Я. С. Пройдемость автомобилей / Я. С. Агейкин. – Москва : Машиностроение, 1981. – 232 с.
5. Агейкин, Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет / Я. С. Агейкин. – Москва : Машиностроение, 1972. – 184 с.
6. Математическая модель уплотняющего воздействия динамики поворота лесозаготовительной машины на боковые полосы трелевочного волока / И. В. Григорьев, А. Б. Былев, А. М. Хахина, А. И. Никифорова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2012. – № 8-1 (129). – С. 72–77.
7. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, E. Khitrov, A. Kalistratov [et al.] // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2014. – P. 407–414.
8. Оценка уплотнения почвогрунта при ударных воздействиях на расстоянии от места удара / И. В. Григорьев, В. А. Макуев, А. Б. Былев [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2014. – Т. 18. – № S2. – С. 30–35.
9. Хитров, Е. Г. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. ... канд. техн. наук : защищена 30.06.2015 / Хитров Егор Германович. – Архангельск, 2015. – 211 с.

10. Хитров, Е. Г. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта: науч. издание / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, А. М. Хахина. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2015. – 146 с.
11. The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding / I. Grigorev, O. Burmistrova, M. Stepanishcheva, G. Gasparian // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2014. – P. 501–508.
12. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel / V. Ivanov, M. Stepanishcheva, E. Khitrov, D. Iliushenko // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. – 2018. – P. 997–1003.
13. Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain / V. A. Ivanov, I. V. Grigorev, G. D. Gasparyan [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. – Vol. 41. – № 2. – P. 22–27.
14. Kochnev, A. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover / A. Kochnev, E. Khitrov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. – 2018. – P. 1005–1012.
15. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling / A. Y. Manukovsky, I. V. Grigorev, V. A. Ivanov [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. – 2018. – Vol. 41. – № 2. – P. 35–41.
16. Лисов, В. Ю. Повышение работоспособности трасс трелевки путем снижения интенсивности колеобразования : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. ... канд. техн. наук : защищена 24.12.2014 / Лисов Владимир Юрьевич. – Архангельск : С(А)ФУ, 2014. – 179 с.
17. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров / В. Я. Шапиро, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев, М. Ф. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – № 1 (361). – С. 61–69.
18. Калистратов, А. В. Моделирование циклического уплотнения в задачах снижения негативного воздействия лесных машин на почвогрунт : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Калистратов Александр Викторович. – Архангельск : САФУ, 2016. – 20 с.
19. Вариационный метод расчета параметров взаимодействия трелевочной системы с массивом мерзлых и оттаивающих почвогрунтов / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2019. – № 1 (41). – С. 68–77.
20. Хахина, А. М. Анализ зарубежных математических моделей взаимодействия движителей лесных машин с поверхностью движения / А. М. Хахина, И. В. Григорьев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5. – № 10 (36). – С. 548–551.
21. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Д. В. Лепилин, А. И. Жукова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2010. – № 6 (111). – С. 61–64.
22. Котенев, Е. В. Нормы выработки комплексов машин сортиментной заготовки древесины / Е. В. Котенев, В. Б. Песков, Е. Г. Хитров // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : матер. третьей междунар. науч.-техн. конференции. – 2018. – С. 187–189.
23. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation / I. Grigorev, A. Nikiforova, E. Khitrov [et al.] // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2014. – P. 443–446.

24. Экспериментальные исследования конусного индекса и физико-механических свойств заболоченного грунта / М. Н. Дмитриева, И. В. Григорьев, В. А. Лухминский [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7. – № 4 (28). – С. 167–174.
25. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds / S. Rudov, V. Shapiro, I. Grigorev [et al.] // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – P. 2052–2071.
26. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil / A. Yu. Zhuk, A. M. Nahina, I. V. Grigorev [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13. – № S8. – P. 6419–6430.
27. Песков, В. Б. Совершенствование моделей для оценки колееобразования и уплотнения почвогрунтов под воздействием движителей колесных лесных машин : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Песков Валерий Борисович. – Архангельск : С(А)ФУ, 2018. – 20 с.
28. Хахина, А. М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. д-ра техн. наук : защищена 26.06.2018 / Хахина Анна Михайловна. – Архангельск : С(А)ФУ, 2018. – 332 с.
29. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учетом деформации почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, В. А. Макуев [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2015. – Т. 19. – № 6. – С. 87–90.
30. Устинов, В. В. Оценка тягово-сцепных свойств колесных движителей лесных машин методами теории движения автотранспорта по бездорожью : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Устинов Владимир Владимирович. – Архангельск : САФУ, 2016. – 20 с.
31. Experimental findings in forest soil mechanics / M. F. Grigorev, A. I. Grigoreva, I. V. Grigorev [et al.] // EurAsian Journal of BioSciences. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 277–287.
32. Метод решения задачи о вдавливании штампа-двигателя в неоднородный массив грунта / Е. Г. Хитров, В. Б. Песков, Д. П. Казаков [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2 (38). – С. 116–120.
33. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 1 (367). – С. 106–119.
34. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 3 (39). – С. 73–78.
35. Особенности взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим почвогрунтом / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2019. – Т. 23. – № 1. – С. 52–61.
36. Зайчик, М. И. Проектирование и расчёт специальных лесных машин / М. И. Зайчик, С. Ф. Орлов. – Москва : Лесн. пром-сть, 1976. – 208 с.
37. Хитров, Е. Г. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колесного движителя / Е. Г. Хитров, И. М. Бартенев // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6. – № 4 (24). – С. 225–232.
38. Хитров, Е. Г. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах / Е. Г. Хитров, И. М. Бартенев // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6. – № 4 (24). – С. 233–239.

References

1. Grigorev I.V. *Snizhenie otricatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnyh trelevochnykh traktorov obos-novaniem rezhimov ih dvizheniya i tehnologicheskogo oborudovaniya* [Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by improving their movement modes and technological equipment]. Saint-Petersburg, 2006, 236 p. (in Russian).
2. Dmitrieva M.N. *Modelirovanie vzaimodeystviya kolesnogo dvizhitelja malogabaritnykh lesnykh mashin so slabonesushhim gruntom*. Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk [Modeling of the interaction of the wheel mover of small-sized forest vehicles with low-weight soil. PhD thesis abstract]. Arkhangelsk, 2018, 20 p. (in Russian).
3. Tsytovich N.A. *Mehanika gruntov* [Mechanics of soils]. Moscow, 1983. 288 p. (in Russian).
4. Ageikin Ya.S. *Prohodimost' avtomobilej* [Passability of cars]. Moscow, 1981. 232 p. (in Russian).
5. Ageikin Ya.S. *Vezdehodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli. Teorija i raschet* [All-Terrain wheeled and combined engines. Theory and calculation]. Moscow, 1972. 184 p. (in Russian).
6. Grigorev I.V., Bylev A.B., Hahina A.M., Nikiforova A.I. (2012) *Matematicheskaja model' uplotnjajushhego vozdeystviya dinamiki povorota lesozagotovi-tel'noj mashiny na bokovye polosy trelevochnogo voloka* [Mathematical model of the condensing impact the dynamics of the rotation of the logging cars on side of strip skidding track]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes of Petrozavodsk state University], no. 8-1 (129), pp. 72-77 (in Russian).
7. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A. (et al.) New approach for forest production inventory based on energy cost. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Ge-ology and Mining Ecology Management, SGEM 2014, pp. 407-414.
8. Grigoriev I.V., Makuev V.A., Bylev A.B. (et al.) (2014) *Otsenka uplotneniya pochvogrunta pri udarnykh vozdeystvijah na rasstojanii ot mesta udara* [Estimation of compaction of soils under impact conditions at a distance from the point of impact]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik* [Bulletin of Moscow state forest University - Forest Herald]. Vol. 18, no. S2, pp. 30-35 (in Russian).
9. Khitrov E.G. *Povyshenie jeffektivnosti trelevki obosnovaniem pokazatelej raboty lesnykh mashin pri operativnom kontrole svoystv pochvogrunta*. Diss. kand. tehn. nauk [Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest machines for operational control of soil properties. PhD thesis]. Arkhangelsk, 2015, 211 p. (in Russian).
10. Khitrov E.G., Grigorev I.V., Khakhina A.M. *Povyshenie jeffektivnosti trelevki obosnovaniem pokazatelej raboty lesnykh mashin pri operativnom kontrole svoystv pochvogrunta*. *Nauchnoe izdanie* [Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest machines for operational control of soil properties. Scientific publication]. Saint Petersburg, 2015, 146 p. (in Russian).
11. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2014, pp. 501-508.
12. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018, pp. 997-1003.
13. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D. (et al.) (2018) Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Vol. 41, no. 2, pp. 22-27.
14. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018, pp. 1005-1012.

15. Manukovsky A.Y., Grigorev I.V., Ivanov V.A. (et al.) (2018) Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Vol. 41, no. 2, pp. 35-41.
16. Lisov V.Yu. *Povyshenie rabotosposobnosti trass trelevki putem snizhenija intensivnosti koleeobrazovanija*. Diss. kand. tehn. nauk [Improving the performance of skidding tracks by reducing the intensity of the track formation. PhD thesis]. Arkhangelsk, 2014, 179 p. (in Russian).
17. Shapiro V.Ya., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Grigorev M.F. (2018) *Teoreticheskoe issledovanie processa razrusheniya massiva grunta sfe-richeskimi nozhami pri ispol'zovanii kombinirovannykh konstrukcij gruntometov dlja tusheniya lesnykh pozharov* [Theoretical study of the process of destruction of the soil mass with spherical knives when using combined structures of soil meters for extinguishing forest fires]. *Forest journal*, no. 1 (361), pp. 61-69 (in Russian).
18. Kalistratov A.V. *Modelirovanie ciklicheskogo uplotnenija v zadachah snizhenija negativnogo vozdejstviya lesnykh mashin na pochvogrunt*. *Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk* [Modeling of cyclic compaction in problems of reducing the negative impact of forest machines on the soil soil. PhD thesis abstract]. Arkhangelsk, 2016, 20 p. (in Russian).
19. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. (et al.) (2019) *Variacionnyj metod rascheta parametrov vzaimodejstviya trelevochnoj sistemy s massivom merzlykh i ottaivajushhih pochvogruntov* [Variational method for calculating parameters of interaction of a skidding system with an array of frozen and thawing soils]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], no. 1 (41), pp. 68-77 (in Russian).
20. Khakhina A.M., Grigorev I.V. (2017) *Analiz zarubezhnykh matematicheskikh modelej vzaimodejstviya dvizhitelej lesnykh mashin s poverhnost'ju dvizhenija* [Analysis of foreign mathematical models of interaction of forest machine movers with the surface of motion]. *Aktual'nye napravlenija nauchnykh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], Vol. 5, no. 10 (36), pp. 548-551 (in Russian).
21. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Lepilin D.V., Zhukova A.I. (2010) *Modelirovanie uplotnenija pochvogrunta v bokovykh polosah trelevochnogo voloka s uchetom izmenchivosti trassy dvizhenija* [Modeling of soil compaction in the side lanes of the skidding portage taking into account the variability of the traffic route]. *Uchenye zapiski Pet-rozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Research notes of the Petrozavodsk state University], no. 6 (111), pp. 61-64 (in Russian).
22. Kotenev E.V., Sands V.B., Khitrov E.G. *Normy vyrabotki kompleksov mashin sortimentnoj zagotovki drevesiny* [Production of machines CTL wood]. *Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie Materialy tret'ej mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Forests of Russia: politics, industry, science, education Materials of the third international scientific and technical conference], 2018, pp. 187-189 (in Russian).
23. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E. (et al.) Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2014, pp. 443-446.
24. Dmitrieva M.N., Grigorev I.V., Lukhminsky V.A. (et al.) (2017) *Jeksperimental'nye issledovanija konusnogo indeksa i fiziko-mehaničeskikh svojstv zabolochennogo grunta* [Experimental studies of the cone index and physical and mechanical properties of swampy soil]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 7, no. 4 (28), pp. 167-174 (in Russian).
25. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I. (et al.) (2019) Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol. 10, no. 1, pp. 2052-2071.
26. Zhuk A.Yu., Hahina A.M., Grigorev I.V. (et al.) (2018) Modeling of indenter pressed into heterogenic soil. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13, no. S8, pp. 6419-6430.
27. Peskov V.B. *Sovershenstvovanie modelej dlja ocenki koleeobrazovanija i uplotnenija pochvogruntov pod vozdejstviem dvizhitelej kolesnykh lesnykh mashin*. *Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk* [Improvement of models for assessing

the rut formation and compaction of soils under the influence of the movers of wheeled forest vehicles. PhD thesis abstract]. Arkhangelsk, 2018, 20 p. (in Russian).

28. Khakhina A.M. *Metody prognozirovaniya i povysheniya prohodimosti kolesnyh lesnyh mashin. Diss. dokt. tehn. nauk* [Methods to predict and improve cross-wheeled forest machines. DSc thesis]. Arkhangelsk, 2018, 332 p. (in Russian).

29. Khitrov E.G., Grigorev I.V., Makuev V.A. (et al.) (2015) *Model' dlja ocenki radial'noj deformacii koleasa lesnoj mashiny s uchetom deformacii pochvogrunta* [Model for estimating the radial deformation of the wheel of a forest machine taking into account the deformation of the soil]. *Lesnoj Vestnik*, Vol. 19, no. 6, pp. 87-90 (in Russian).

30. Ustinov V.V. *Ocenka tjagovo-scepnnyh svoystv kolesnyh dvizhitelej lesnyh mashin metodami teorii dvizheniya avtotransporta po bezdorozh'ju. Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk* [Evaluation of traction properties of wheeled forest vehicles by methods of the theory of off-road vehicle movement. PhD thesis abstract]. Arkhangelsk, 2016, 20 p. (in Russian).

31. Grigorev M.F., Grigoreva A.I., Grigorev I.V. (et al.) (2018) Experimental findings in forest soil mechanics. *EurAsian Journal of BioSciences*, Vol. 12, no. 2, pp. 277-287.

32. Khitrov E.G., Peskov V.B., Kazakov D.P. (et al.) (2018) *Metod reshenija zadachi o vдавливании shtampa-dvizhitelja v neodnorodnyj massiv grunta* [Method for solving the problem of pressing a stamp-mover into an inhomogeneous array of soil]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology], no. 2 (38), pp. 116-120 (in Russian).

33. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. (et al.) (2019) *Osobennosti kontaktного vzaimodejstviya trelevochnoj sistemy s merzlym pochvogruntom* [Features of contact interaction of the skidding system with frozen soil]. *Lesnoj zhurnal* [Forest journal], no. 1 (367), pp. 106-119 (in Russian).

34. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. (et al.) (2018) *Matematicheskoe modelirovanie processa uplotneniya merzlogo pochvogrunta pod vozdejstviem lesnyh mashin i trelevochnykh sistem* [Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of forest machines and skidding systems]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], no. 3 (39), pp. 73-78 (in Russian).

35. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. (et al.) (2019) *Osobennosti vzaimodejstviya trelevochnoj sistemy s otтаivajushhim pochvogruntom* [Features of interaction of the skidding system with thawing soil]. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*, Vol. 23, no. 1, pp. 52-61 (in Russian).

36. Zaychik M.I., Orlov S.F. *Proektirovanie i raschjot special'nyh lesnyh mashin* [Design and calculation of special forest machines]. Moscow, 1976, 208 p. (in Russian).

37. Khitrov E.G., Bartenev I.M. (2016) *Vliyanie ugla poperechnogo naklona poverkhnosti kacheniya na tyagovo-stsepnnye svoystva kolesnogo dvizhitelja* [Influence of the angle of the transverse slope of the rolling surface on the traction properties of the wheel mover]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry engineering Journal], Vol. 6, no. 4 (24), pp. 225-232 (in Russian).

38. Khitrov E.G., Bartenev I.M. (2016) *Raschet glubiny kolei kolesnogo dvizhitelja lesnykh traktorov na sklonakh* [Calculation of the depth of the track of the wheel mover of forest tractors on slopes]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, Vol. 6, no. 4 (24), pp. 233-239 (in Russian).

Сведения об авторах

Бурмистрова Ольга Николаевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и машин лесозаготовок» ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, Российская Федерация; e-mail: oburmistrova@ugtu.net.

Тетеревлева Елена Владимировна – старший преподаватель кафедры электрификации и автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, Российская Федерация; e-mail: teterevleva.elena.v@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: silver73@inbox.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Мануковский Андрей Юрьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: mayu1964@mail.ru.

Рудов Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры № 3 ФГКВБОУ ВПО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: 89213093250@mail.ru.

Востриков Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Vostrikov.9290105483@yandex.ru.

Information about authors

Burmistrova Olga Nikolaevna – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of logging Technologies and machines, FSBEI HE "Ukhta State Technical University", Ukhta, Russian Federation; e-mail: oburmistrova@ugtu.net.

Teterevleva Elena Vladimirovna – senior lecturer, Department of electrification and automation of technological processes, FSBEI HE "Ukhta State Technical University", Ukhta, Russian Federation; e-mail: teterevleva.elena.v@mail.ru.

Grigoryev Igor Vladislavovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru.

Kunitskaya Olga Anatolyevna – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Manukovsky Andrey Yuryevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: mayu1964@mail.ru.

Rudov Sergey Evgenyevich – PhD (Engineering), senior lecturer, Department no. 3, Federal State Military Educational Institution of Higher Education "Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S.M. Budienny", Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru.

Vostrikov Dmitry Sergeevich – post-graduate student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: Vostrikov.9290105483@yandex.ru.