

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4402

Обзор

Анализ исследований взаимодействия колёсного движителя лесных машин со слабонесущим почвогрунтом

Мария Н. Дмитриева¹, Игорь В. Григорьев^{2*}, Сергей Е. Рудов³

¹ Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, Россия, 394087, Воронежская область, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8; E-Mail: in2907@mail.ru (М. Д.)

² Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, 677007, г. Якутск, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3; E-Mail: silver73@inbox1.ru (И. Г.)

³ Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого, Россия, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3, К-64; E-Mail: 89213093250@mail.ru (С. Р.)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: silver73@inbox1.ru (И. Г.);
Tel.: +7-921-751-3866.

Получена: 16 января 2016 / Принята: 26 марта 2019 / Опубликовано: 4 апреля 2019

Аннотация: Лесозаготовительная техника работает в широком спектре почвенно-грунтовых условий, в т. ч. и на переувлажнённых, заболоченных грунтах с низкой несущей способностью. Для трелёвки древесины в подобных условиях могут использоваться малогабаритные колёсные лесные машины. Их использование позволяет существенно снизить отрицательное влияние на лесные экосистемы, выражающееся в переуплотнении и колееобразовании лесных почвогрунтов, а также негативное воздействие на корневые системы деревьев. До настоящего времени вопросы взаимодействия движителей малогабаритных лесных машин с поверхностями движения проработаны не в полной мере. Известные работы в области воздействия движителей на грунт относятся, в основном, к тяжёлым машинам. Вместе с тем положения механики грунтов предполагают существенное влияние геометрических параметров движителя на развитие деформаций основания. Таким образом, результаты выполненных ранее работ затруднительно использовать при обосновании параметров процесса трелёвки малогабаритными машинами. Кроме того, переувлажнённые, слабые почвогрунты обладают специфическими физико-механическими свойствами, со своими взаимосвязями и особенностями развития возникающих в них напряжений. Отмеченные обстоятельства требуют проведения отдельных исследований с целью дополнить научную картину взаимодействия движителей малогабаритных колёсных лесных машин с почвогрунтами. Полагаем, что результаты исследований явятся базой для оптимизации параметров процесса трелёвки с использованием подобной техники, а также совершенствования параметров колёсных лесных машин. В статье приведён анализ физико-механических свойств почвогрунтов как поверхностей

движения трелёвочной техники и подходов к оценке параметров взаимодействия колёсного движителя с почвогрунтом.

Ключевые слова: колёсные лесные машины, трелёвка, почвогрунты, уплотнение, колееобразование.

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4402

Review

Interaction of wheeled forestry machines with non-cohesive soil

Mariy Dmitrieva¹, Igor Grigorev^{2*}, Sergey Rudov³

¹ Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov, Russia, 394087, Voronezh region, Voronezh, 8, Timiryazev str.; e-Mail: bastrikov@gmail.com (M. D.)

² Yakut state agricultural Academy, Russia, 677007, Yakutsk, sh. Sergelyakhskoe, 3 km, building 3; E-Mail: silver73@inbox.ru (I. G.)

³ Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, Russia, 194064, Saint-Petersburg, K-64, Tikhoretskiy Prospekt, 3; E-Mail: 89213093250@mail.ru (S. R.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: silver73@inbox.ru (I. G.); Tel.: +7-921-751-3866.

Received: 16 January 2019 / Accepted: 26 March 2019 / Published: 4 April 2019

Abstract: Logging equipment operates in a wide range of soil conditions including waterlogged boggy grounds with low-load-bearing capacity. Small wheeled forest machines may be used for skidding in such conditions. Their use may significantly reduce the negative impact of skidding on forest ecosystems that is manifested in forest soil compaction and rutting, as well as in harming trees' root system. Until now the issues of interaction between a wheeled drive of a small-sized forest machine and the ground surface have not been clarified as the research of a skidding machine impact on the ground has been done mainly for heavy machines. Yet the laws of motion presuppose a significant impact of the wheeled drive's geometric parameters on the ground deformation development. Thus, the results of previous work may not be used to justify the parameters of skidding by small machines. In addition, waterlogged weak soils have specific physical and mechanical properties and their relationships and features of the development of arising stresses. These circumstances require further research to complement the scientific picture of the interaction between small-sized wheeled forestry machines and soils. We believe that the results of our research will be the basis for optimizing the parameters of the skidding process using such equipment, as well as improving the parameters of wheeled forest machines. The article presents an analysis of the physical and mechanical properties of soils as surfaces for skidding machines movement and approaches to assess the parameters of the interaction between a wheeled machine and the soil.

Keywords: wheeled forestry machines, timber, soils, compaction, rutting

1. Введение

Лесозаготовительная техника работает в широком спектре почвенно-грунтовых условий, в т. ч. и на переувлажнённых, заболоченных грунтах с низкой несущей способностью [1], [2], [3]. Для трелёвки древесины в подобных условиях пользуются малогабаритными тракторами. До настоящего времени вопросы взаимодействия движителей малогабаритных лесных машин с поверхностями движения проработаны не в полной мере.

Известные работы в области воздействия движителей на грунт относятся, например [4—9], в основном, к тяжёлым машинам. Вместе с тем положения механики грунтов предполагают существенное влияние геометрических параметров движителя на развитие деформаций основания [10—13]. Таким образом, результаты выполненных ранее работ затруднительно использовать при обосновании параметров процесса трелёвки малогабаритными машинами.

Кроме того, переувлажнённые, слабые почвогрунты обладают специфическими физико-механическими свойствами, со своими взаимосвязями и особенностями развития возникающих в них напряжений [10], [11].

К важнейшим механическим свойствам грунта, характеризующим его деформативность, относят модуль общей деформации E , удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ . Помимо E , C , φ при моделировании процессов взаимодействия движителя с грунтом в теоретических расчётах используют ещё несколько характеристик грунта: модуль сдвига G , удельный вес γ , коэффициент Пуассона ν , толщину деформируемого слоя грунта H [9—11].

Для приближенной оценки модуля деформации E [МПа], внутреннего сцепления C [кПа] и угла внутреннего трения φ [°] связных грунтов в зависимости от коэффициента пористости и показателя текучести в [13] получены следующие общие формулы:

$$E = (A_{aE} + B_{aE} I_L) \cdot e^{(A_{bE} + B_{bE} I_L)} \quad (1)$$

$$C = (A_{aC} + B_{aC} I_L) \cdot e^{(A_{bC} + B_{bC} I_L)} \quad (2)$$

$$\varphi = (A_{a\varphi} + B_{a\varphi} I_L) \cdot e^{(A_{b\varphi} + B_{b\varphi} I_L)}, \quad (3)$$

где A_{aE} , B_{aE} , A_{bE} , B_{bE} , A_{aC} , B_{aC} , A_{bC} , B_{bC} , $A_{a\varphi}$, $B_{a\varphi}$, $A_{b\varphi}$, $B_{b\varphi}$ — числовые коэффициенты (представлены в таблицах 1—3), I_L — показатель текучести, характеризующий консистенцию грунта, e — коэффициент пористости грунта.

Показатель текучести грунта рассчитывается по формуле [14], [15]:

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}, \quad (4)$$

где W — абсолютная влажность грунта; W_p — влажность грунта на границе пластичности; W_L — влажность грунта на границе текучести.

Коэффициент пористости рассчитывается по формуле [14], [15]:

$$e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}, \quad (5)$$

где γ_s — объёмный вес скелета грунта, γ_d — объёмный вес грунта в сухом состоянии.

Таблица 1. Коэффициенты для расчёта угла внутреннего трения [13]

Тип грунта	$A_{a\varphi}$	$B_{a\varphi}$	$A_{b\varphi}$	$B_{b\varphi}$
Супесь	22,496	-7,808	-0,390	-0,250
Суглинок	21,128	-11,793	-0,315	-0,722
Глина	16,887	-11,977	-0,204	-2,506

Таблица 2. Коэффициенты для расчёта внутреннего сцепления [13]

Тип грунта	A_{aC}	B_{aC}	A_{bC}	B_{bC}
Супесь	4,586	-3,775	-1,475	-1,118
Суглинок	19,239	-14,366	-1,204	-0,647
Глина	42,573	-19,656	-1,136	-0,220

Таблица 3. Коэффициенты для расчёта модуля деформации [13]

Тип грунта	A_{aE}	B_{aE}	A_{bE}	B_{bE}
Супесь	10,670	-7,273	-1,524	-0,974
Суглинок	11,366	-7,575	-1,403	-1,089
Глина	15,217	-10,679	-0,969	-1,975

Формулы (1)—(3) следует использовать при I_L и e в пределах, указанных в таблице 4.

Таблица 4. Пределы изменения показателя текучести и коэффициента пористости при расчёте физико-механических свойств по формулам (1)—(3) [9]

Тип грунта	I_L	e
Супесь	-1—1	0,6—1,4
Суглинок	-0,4—1	0,6—1,4
Глина	0—1	0,7—1,4

Графики на рисунках 1—3 иллюстрируют формулы (1)—(3).

Расчёты показывают, что E , C и φ у супесей, глин и суглинков по формулам (1)—(3) изменяются в пределах, указанных в таблице 5.

Таблица 5. Диапазоны изменения физико-механических свойств грунтов, результаты расчёта по формулам (1)—(3) [16]

Тип грунта	Диапазон изменения		
	E , МПа	C , кПа	φ , °
Супесь	11,84—32,55	0,34—10,03	1,47—23,76
Суглинок	6,59—26,19	2,61—40,49	1,64—23,60
Глина	1,97—18,16	14,52—63,84	1,69—21,50

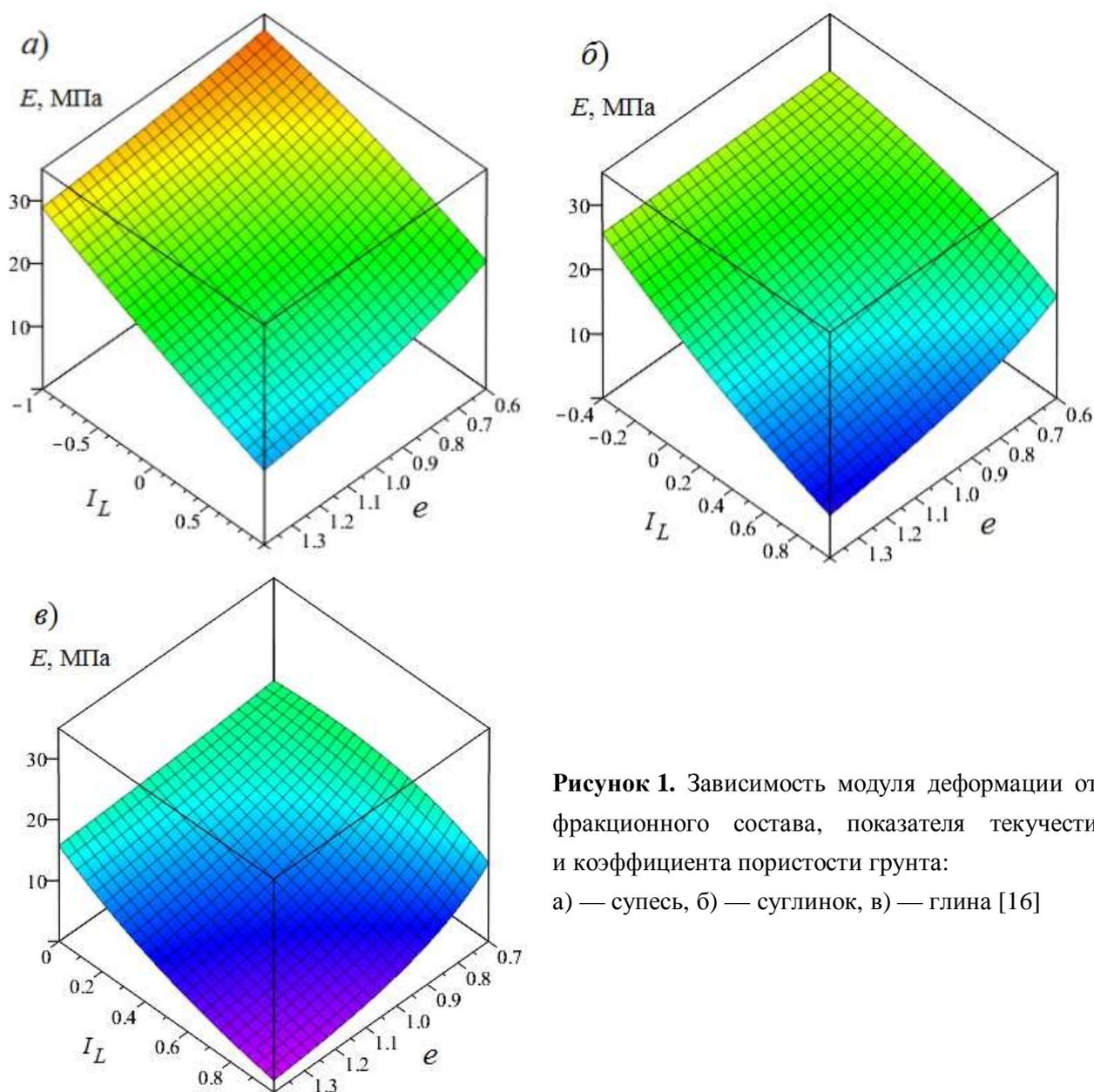


Рисунок 1. Зависимость модуля деформации от фракционного состава, показателя текучести и коэффициента пористости грунта:
 а) — супесь, б) — суглинок, в) — глина [16]

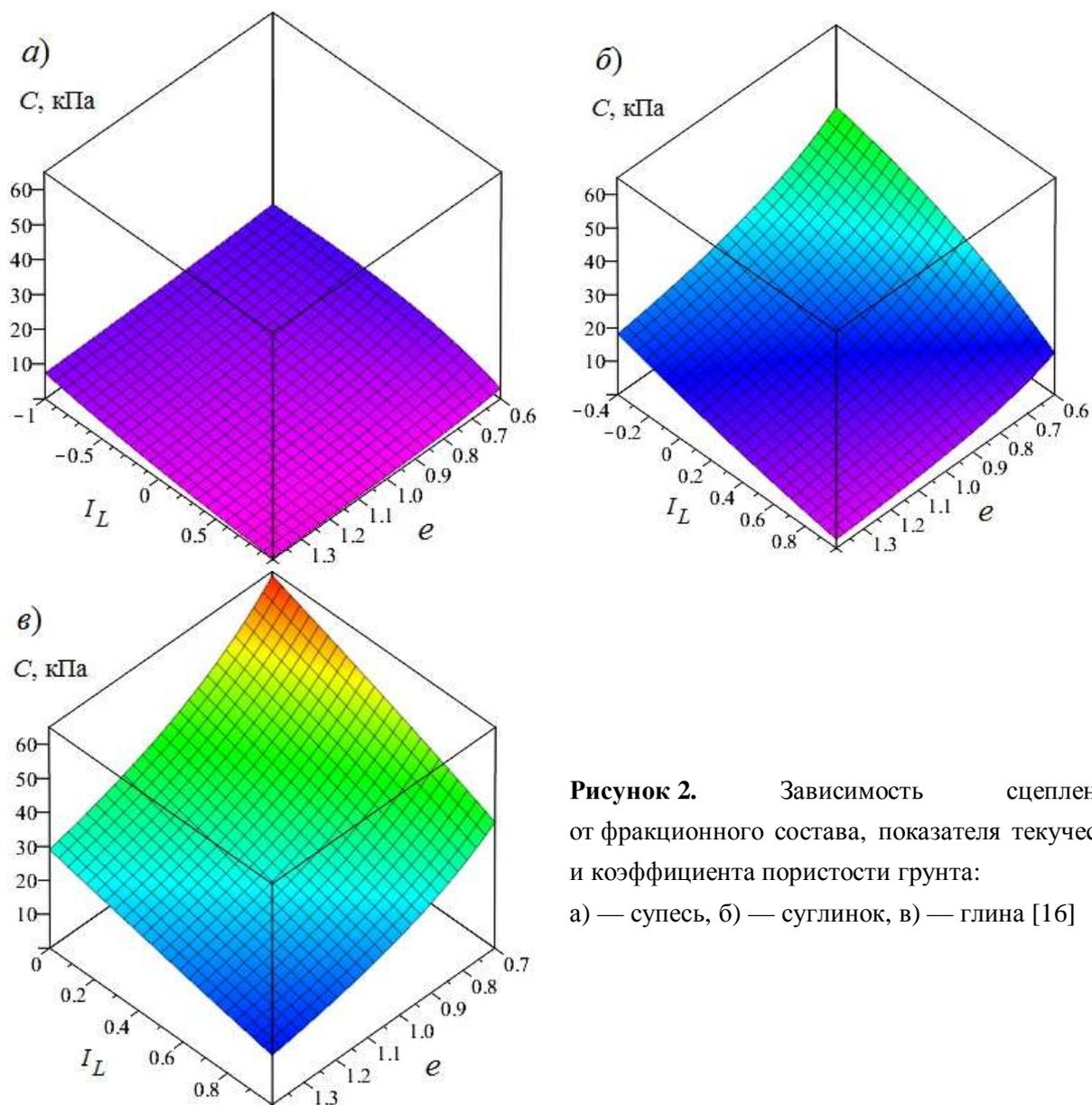


Рисунок 2. Зависимость сцепления от фракционного состава, показателя текучести и коэффициента пористости грунта:
а) — супесь, б) — суглинок, в) — глина [16]

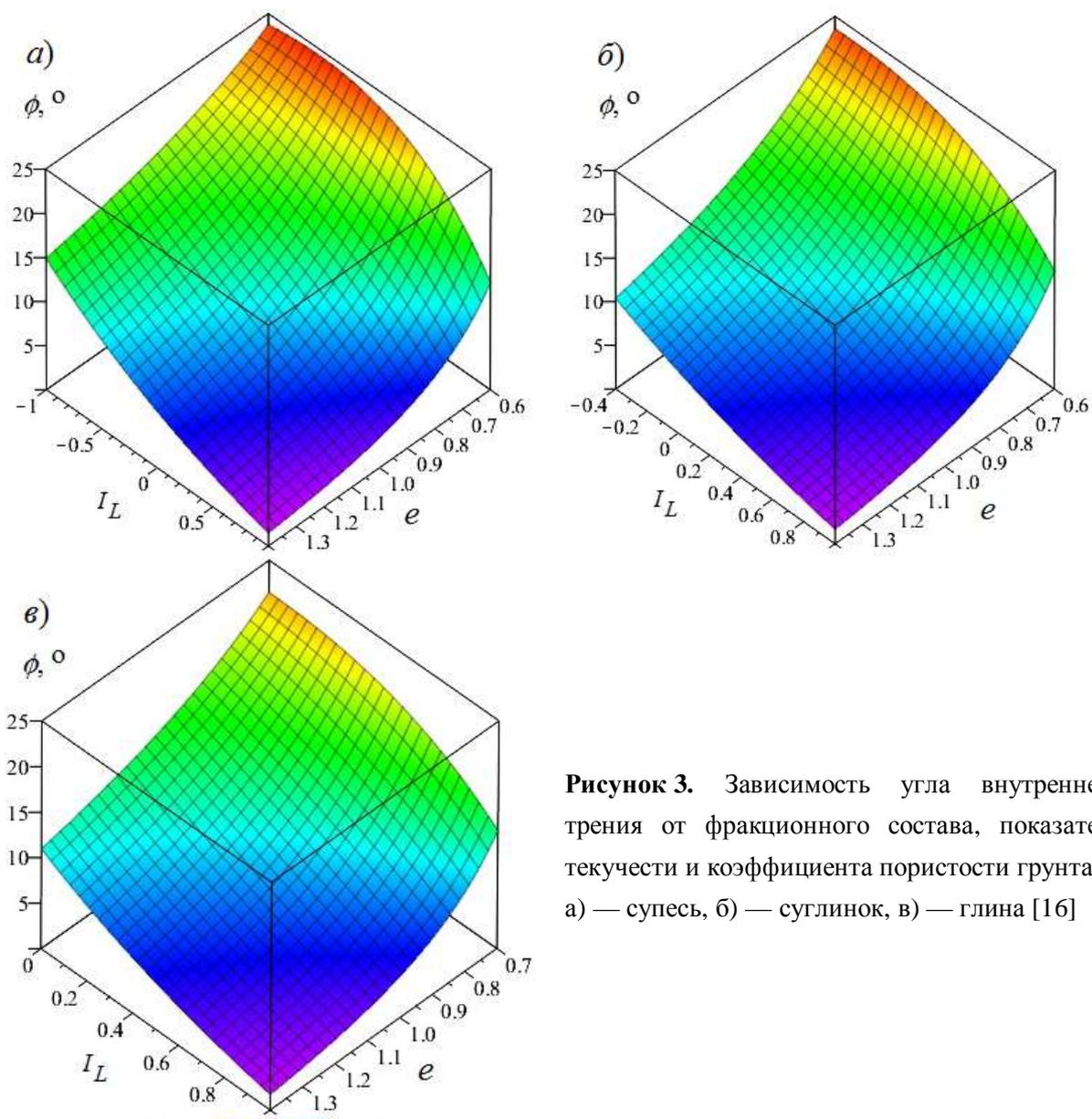


Рисунок 3. Зависимость угла внутреннего трения от фракционного состава, показателя текучести и коэффициента пористости грунта: а) — супесь, б) — суглинок, в) — глина [16]

Ранее неоднократно отмечалось, что грунтовые условия лесосек специфичны, и использование результатов и оценок свойств, полученных для «классических» глин, суглинков и супесей, не корректно. В связи с чем была разработана и апробирована классификация лесных грунтов, представленная в таблице 6.

Таблица 6. Классификация лесных почвогрунтов по физико-механическим свойствам [5], [9], [16], [17]

Параметры	Категории почвогрунта		
	III (слабый)	II (нормальный)	I (прочный)
E , МПа	0,4	1	3
G , МПа	0,74	1,99	6,53
C , кПа	5	12	24
φ , °	11	15	16
γ , кН/м ³	7,5	8,5	9,5
H , м	0,8	0,4	0,3
ν	0,35	0,25	0,15

Таблицу 6 принято дополнять формулами, позволяющими выразить через модуль деформации прочие механические свойства лесного грунта [9]:

$$G = 1,9937E^{1,0798} \quad (6)$$

$$C = 10,774E^{0,7737} \quad (7)$$

$$\varphi = 13,669E^{0,1818} \quad (8)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168} \quad (9)$$

$$H = 0,4714E^{-0,479} \quad (10)$$

$$\nu = 0,2420E^{-0,422} \quad (11)$$

Графически зависимости C , φ , γ , H , ν , G от E представлены на рисунках 4—9.

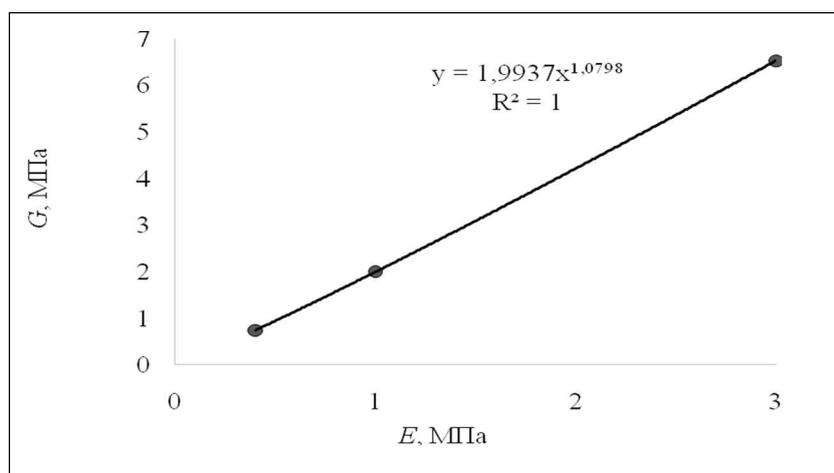


Рисунок 4. Зависимость модуля сдвига лесного грунта от модуля деформации [9]

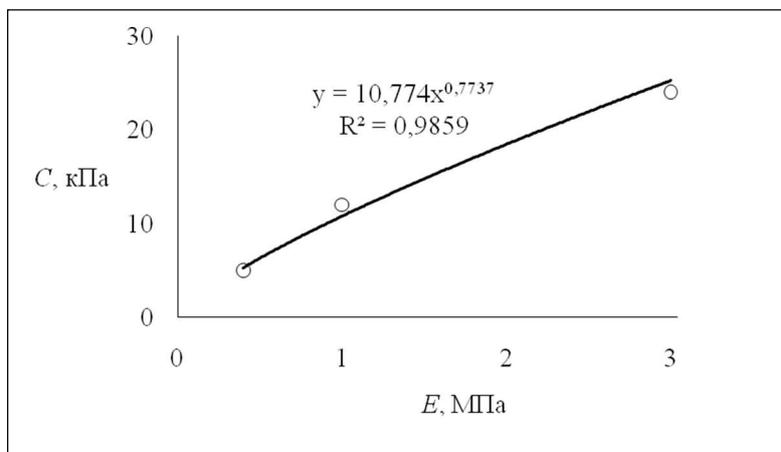


Рисунок 5. Зависимость удельного сцепления лесного грунта от модуля деформации [9]

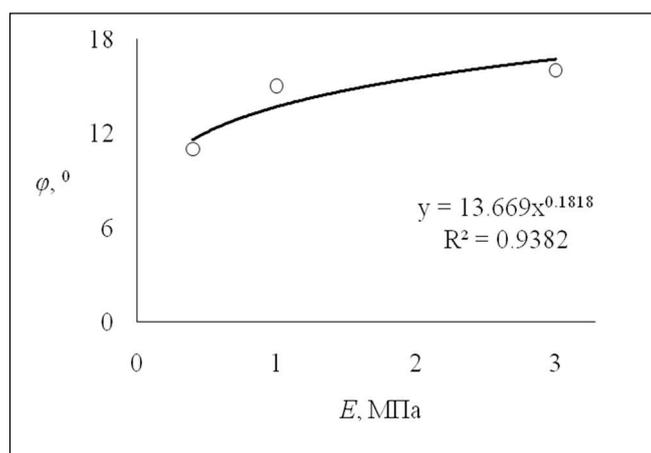


Рисунок 6. Зависимость угла внутреннего трения лесного грунта от модуля деформации [9]

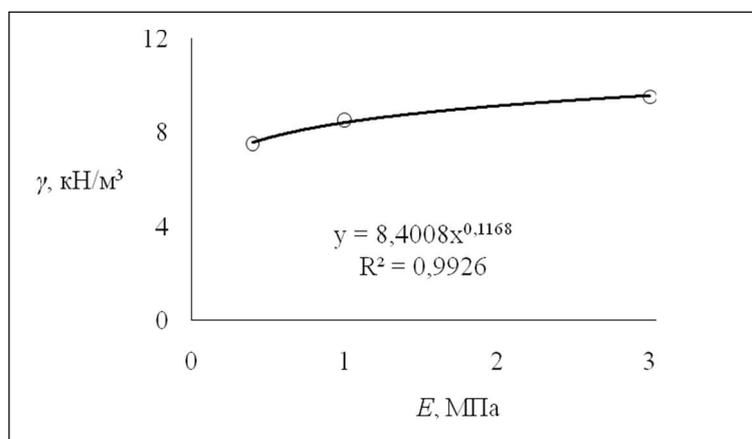


Рисунок 7. Зависимость объёмного веса лесного грунта естественного сложения от модуля деформации [9]

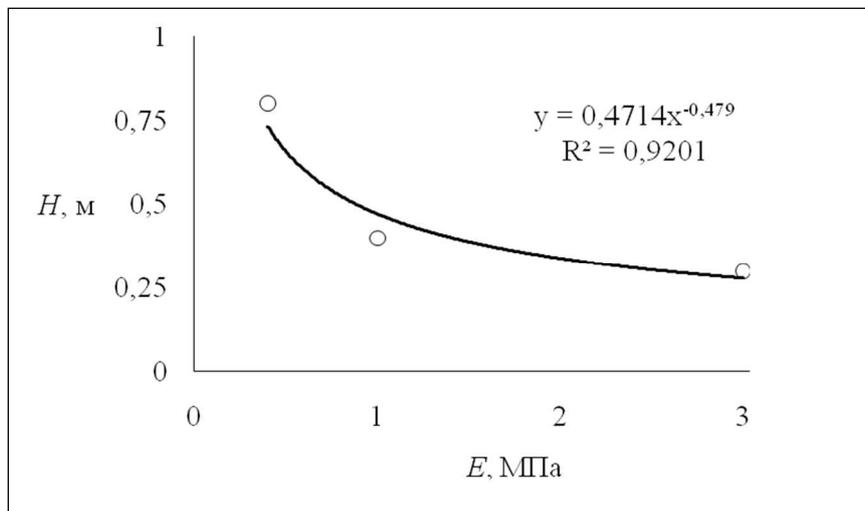


Рисунок 8. Зависимость толщины деформируемого слоя лесного грунта от модуля деформации [9]

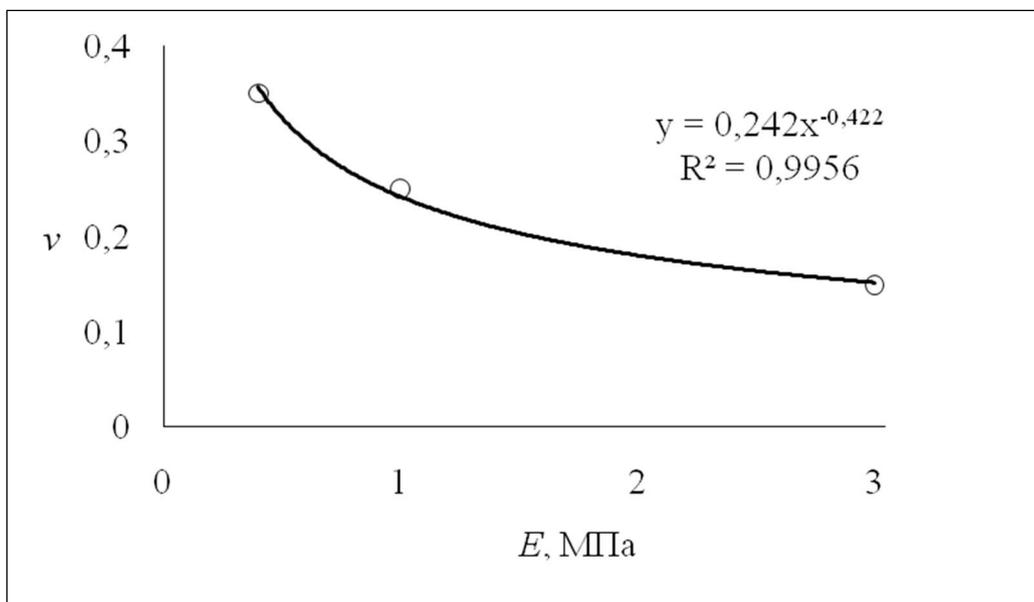


Рисунок 9. Зависимость коэффициента Пуассона лесного грунта от модуля деформации [9]

Сведения о физико-механических свойствах заболоченных грунтов, собранные в работах [10], [11], представлены в таблице 7.

Таблица 7. Физико-механические свойства заболоченных грунтов [10], [11]

Вид болота	Характеристика дернового покрова	Толщина дернового покрова, см	$\varphi, ^\circ$	$C, \text{кПа}$	$E, \text{кПа}$
Моховое	Преобладают сфагновые мхи без кустарника	33,5—38,5	12—14	5—8	260—290
	Преобладают сфагновые мхи с кустарником	35—36	13—16	10—17	360—430
	Преобладают гипновые мхи с кустарником	27—28	11—15	8—14	290—340
Третьяное	Осоковый покров с развитыми осоковыми кочками	35—42	18—20	26—45	1050—1580
	Осоковый покров с межкочечными понижениями	10—11	3—8	4—14	140—240
Лесное	Берёзово-лесной в межкочечных понижениях	5—5,5	5—7	4—10	90—140
Осушенное	Гипново-осоково-лесной	38—42	16—20	30—50	650—1400

Известна рекомендация вычислять модуль сдвига по модулю деформации с использованием формулы [18]:

$$G = \frac{E_y}{2 \cdot (1 + \nu)} \approx \frac{5E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (12)$$

где E_y — модуль упругости грунта.

Время релаксации напряжений, значение которого используется при расчёте динамического коэффициента, учитывающего скорость движителя, оценивают по формуле [10], [11]:

$$t_p = \frac{0,5}{\varphi} \quad (13)$$

Считаем целесообразным проработать вопрос взаимосвязей физико-механических свойств заболоченных грунтов с целью получить зависимости, более пригодные для расчётов.

Обратим внимание, что значения физико-механических свойств заболоченных грунтов резко меньше значений тех же свойств лесных почвогрунтов даже III категории и супесей, глин и суглинков. По этой причине использовать численные результаты и инженерные зависимости, полученные для случаев работы трелёвочных машин на лесных почвогрунтах, не корректно.

Внимание исследователей в лесоинженерном деле традиционно сосредоточено на оценке эксплуатационных показателей трелёвочной техники в различных природно-производственных условиях [19—22]. Для оценки тягово-цепных свойств колёсных лесных машин в широком спектре почвенно-грунтовых условий разработаны различные математические модели процесса взаимодействия колёсного движителя с почвогрунтом лесосеки [4], [7—9], [16], [17], [23].

Например, в работе [9] предложена математическая модель, предназначенная для расчёта тягово-цепных свойств колёсного движителя трелёвочной машины, базирующаяся на работах учёных в области теории движения автомобиля в условиях бездорожья. Подобные модели предложены в серии работ, например в [16], [17], относящихся к исследованию проходимости форвардеров и скиддеров.

За основу принимается методика расчёта показателей процесса взаимодействия движителя машины с грунтом, предложенная в работах профессора Я. С. Агейкина [10], [11].

Воздействие движителя-колеса заменяется влиянием эквивалентного штампа с переменной шириной b и длиной l . Геометрические параметры переменны, т. к. штамп считается эластичным. Это необходимо для учёта радиальной жёсткости колеса, зависящей от его конструкции и давления в камере шины.

Оценка жёсткости колеса выполняется либо при помощи формулы Хейдекеля [10], считающейся не вполне точной, либо при помощи эмпирических зависимостей, а также формул, полученных путём аппроксимации расчётных данных, например [24]:

$$h_z = 1,53 G_w^{0,5} B^{0,25} P_w^{-0,5} D^{0,25} K_F^{0,75} h^{-0,44} P_w^{0,25} G_w^{-0,25}, \quad (14)$$

где G_w — нагрузка на колесо, P_w — внутреннее давление в шине, h — глубина колеи, образующейся при проходе колеса (осадка эквивалентного штампа), B — ширина колеса, D — диаметр колеса, K_F — коэффициент формы пятна контакта.

Формула (14) получена и апробирована для случаев работы машин с шириной шины более 0,6 м, что делает её использование в нашей работе не корректным.

Известно, что форма пятна контакта движителя с почвогрунтом варьируется от близкой к прямоугольной до близкой к эллиптической. Заметное влияние на форму пятна оказывают

механические свойства поверхности движения, в связи с чем площадь пятна контакта на сравнительно прочных лесных грунтах рассчитывают по формуле:

$$F = K_F bl, \quad (15)$$

где K_F — коэффициент учёта формы пятна контакта [25]:

$$K_F = 0,8949E^{-0,12}, \quad (16)$$

где E — модуль деформации почвогрунта [МПа].

Для случаев работы малогабаритного трелёвочного трактора на слабонесущих грунтах следует принять форму пятна контакта прямоугольной и отказаться от коэффициента формы.

Предложена следующая формула для описания связи нормального давления со стороны движителя и осадки эквивалентного штампа [10], [11]:

$$P = \frac{P_s Eh}{JP_s ab \arctg\left(\frac{H-h}{ab}\right) + hE}, \quad (17)$$

где P — усреднённое по площади пятна контакта значение нормального давления, возникающего при воздействии штампа, P_s — несущая способность грунта, J — коэффициент, учитывающий соотношение длины и ширины пятна контакта штампа с поверхностью грунта, a — коэффициент, учитывающий толщину деформируемого слоя грунта, H — толщина деформируемого слоя грунта.

Формула (17) получена из решения дифференциального уравнения погружения штампа в деформируемый массив грунта при допущении о том, что модуль деформации массива много больше нормального давления. Это обстоятельство делает невозможным её использование в случае расчёта параметров взаимодействия движителя со слабонесущим грунтом, когда давление сопоставимо с модулем деформации.

Важной характеристикой грунта является несущая способность, представляющая собой напряжение, по мере приближения к которому зависимость осадки штампа от усреднённого напряжения по пятну контакта начинает значимо отклоняться от линейной.

Несущую способность грунта расчётным путём можно определить по следующей формуле [13]:

$$P_s = P_{s0} \alpha_z, \quad (18)$$

где P_{s0} — несущая способность слоя грунта неограниченной толщины; α_z — коэффициент учёта толщины деформируемого слоя грунта, рассчитываемый по формуле [13]:

$$\alpha_z = 1 + \frac{H^* h}{2H \cdot (H - h - 0,25H^*)}, \quad (19)$$

где H^* — вспомогательная величина, определяемая по формуле [13]:

$$H^* = \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4}\right) \tan \frac{3\varphi}{4}\right] b \cos \frac{3\varphi}{4} \tan \varphi \quad (20)$$

В разрабатываемой задаче толщина деформируемого слоя не ограничена, в связи с чем зависимость (18) упрощается.

После подбора необходимых выражений для переменных величин уравнение (17) решается численно относительно осадки штампа h (глубины колеи).

После расчёта глубины колеи определяют силу сопротивления грунта поступательному перемещению движителя (как интеграл от нормального давления в пределах от 0 до h) и силу сцепления движителя с поверхностью (для этого пользуются различными выражениями для оценки сопротивления грунта, заключённого между протекторами шины, среза и силы трения резины о грунт). По рассчитанным значениям сил сцепления и сопротивления вычисляют коэффициенты сцепления μ_T и сопротивления μ_R , разность которых представляет собой коэффициент тяги μ_P (при отрицательном коэффициенте тяги проходимость машины не обеспечена). Пример результатов расчётов тягово-сцепных свойств движителя и глубины колеи для типового форвардера представлен на рисунках 10, 11 [16], [26], [27].

Рассмотренный подход был апробирован и подтверждён как экспериментально, так и путём сопоставления расчётных данных с результатами, полученными исследователями за рубежом. Полагаем целесообразным использовать общую концепцию работ [9], [17] в нашем исследовании после проработки специфических вопросов, характерных для малогабаритной трелёвочной техники и слабонесущих грунтов, отмеченных выше по тексту.

Анализ зарубежных публикаций [28—49], резюмированных в работах [50—53], показывает, что коллеги широко используют эмпирические модели (т. н. *WES*-модели) для оценки тягово-сцепных свойств и глубины колеи, образующейся под воздействием колёсного движителя, наиболее распространённые из них представлены в таблицах 8, 9.

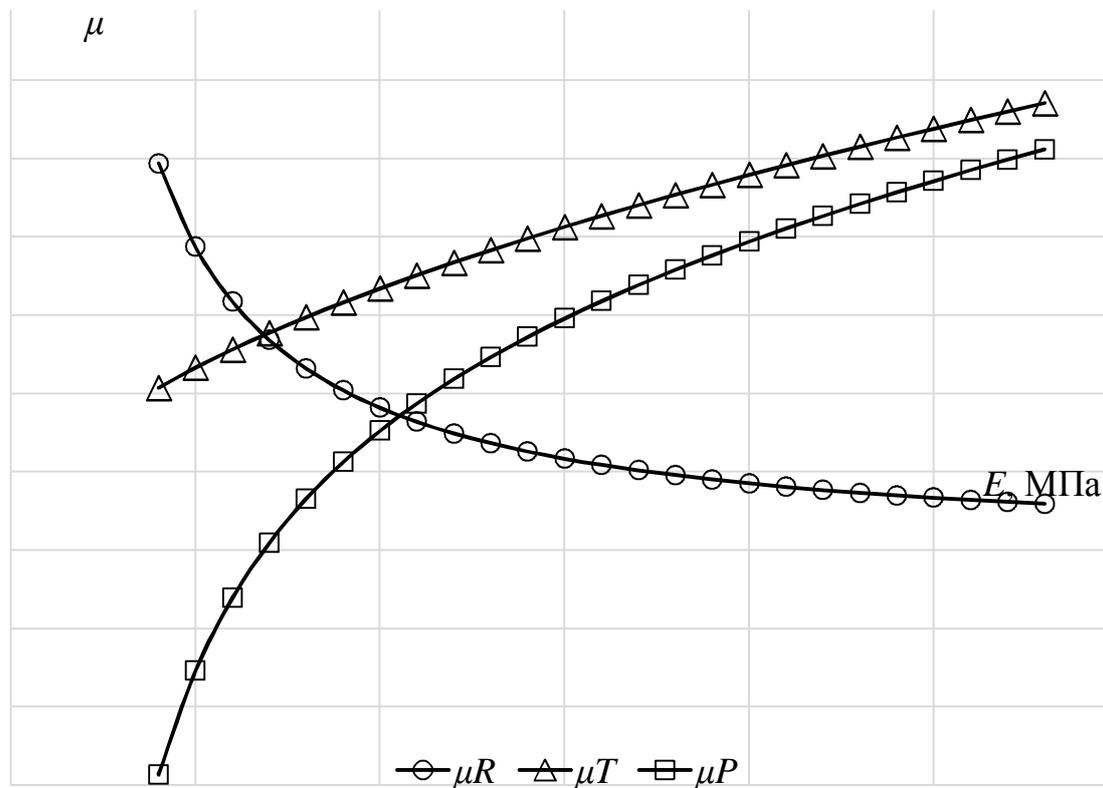


Рисунок 10. Результаты расчёта тягово-сцепных свойств колёсного движителя форвардера [16], [26], [27]

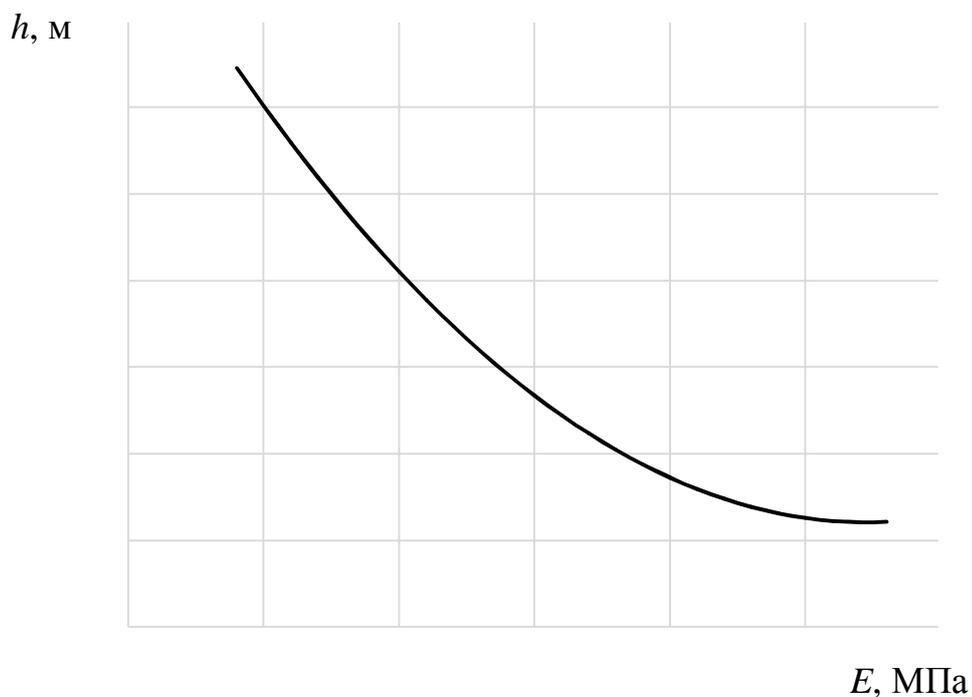


Рисунок 11. Результаты расчёта глубины колеи после однократного прохода колёсного движителя форвардера [16], [26], [27]

Таблица 8. Распространённые зарубежные эмпирические модели для оценки тягово-цепных свойств колёсных машин

Модель	Источник	Область применения
$\mu_P = \frac{N_{RCI} - 2,59}{1,25 N_{RCI} - 1,19} \quad (21)$	[28]	Связные грунты, крупногабаритная техника
$\mu_R = 0,8 - \frac{1,31}{N_{RCI} - 0,95} \quad (22)$		
$\mu_T = 0,04 + \frac{0,2}{N_{RCI} - 1,35} \quad (23)$		
$\mu_P = 1,51 - \frac{12,37}{N_{CI} + 5,94} \quad (24)$	[29]	Связные грунты, тяжёлая военная техника
$\mu_R = 0,04 + \frac{0,2}{N_{CI} - 1,5} \quad (25)$		
$\mu_T = 0,75 \cdot [1 - \exp(-0,3C_N S_R)] \quad (1.26)$	[30]	Пашня, сельскохозяйственные тракторы
$\mu_P = 0,75 \cdot [1 - \exp(-0,3C_N S_R)] - \left(0,04 + \frac{1,2}{C_N}\right)$		
$\mu_R = 0,04 + \frac{1,2}{C_N} \quad (27)$		
$\mu_P = 0,12 N_R^{0,88} \cdot [1 - 0,61 \cdot (1 - S_R)^4] \quad (28)$	[31], [32]	Комбинированные движители
$\mu_R = 3 \cdot (1 + S_R) \cdot N_R^{-2,7} \quad (29)$		
$N_R = \frac{1,6 \cdot m \cdot CI \cdot B^{0,85} D^{1,15}}{W_W} \sqrt{\frac{h_Z}{H_T}}, \quad (30)$		
$\mu_R = 0,28 \cdot \left(\frac{MMP}{CI}\right)^{1,95} + HG, \quad (31)$	[33]	Комбинированные движители
$\mu_{P20\%} = 0,56 - \frac{0,47}{N_{CI}} \quad (32)$	[34]—[36]	Пашня, сельскохозяйственные тракторы
$\mu_R = 0,07 + \frac{0,2}{N_{CI}} \quad (33)$		
$\mu_P = \left(0,56 - \frac{0,47}{N_{CI}}\right) \cdot [1 - \exp(-4,838S_R - 0,061N_{CI}S_R)] \quad (34)$	[37]	Слабонесущие грунты, техника с шириной шины более 0,8 м
$\quad (35)$		

Модель	Источник	Область применения
$\mu_{P_{20\%}} = 0,56 - \frac{0,47}{N_{CI}} \quad (36)$		
$\mu_{P_{MAX}} = 0,796 - \frac{0,92}{N_{CI}} \quad (37)$		
$\mu_R = 0,049 + \frac{0,287}{N_{CI}} \quad (38)$		
$\mu_T = 0,88 \cdot [1 - \exp(-0,1N_B)] \cdot [1 - \exp(-7,5S_R)] + 0,04 \quad (1.39)$ $\mu_P = 0,88 \cdot [1 - \exp(-0,1N_B)] \cdot [1 - \exp(-7,5S_R)] - \left(\frac{1}{N_B} + \frac{0,05S_R}{N_B^{0,5}} \right)$ $\mu_R = \frac{1}{N_B} + 0,04 + \frac{0,05S_R}{N_B^{0,5}} \quad (.40)$	[38]	Пашня, сельскохозяйственные тракторы
$\mu_T = 0,47 \cdot [1 - \exp(-0,2N_C S_R)] + 0,28 \left(\frac{G_W}{W_R} \right) - \left(\frac{0,22}{N_C} + 0,20 \right) \quad (41)$ $\mu_R = -0,1 \cdot \left(\frac{G_W}{W_R} \right) + \frac{0,22}{N_C} + 0,20 \quad (42)$	[39]	Тяжёлая техника, шины низкого давления
$\mu_P = A_1 \cdot [1 - \exp(-A_2 N_C S_R)] \quad (43)$ $\mu_R = (A_3 - A_6) \cdot \left(\frac{G_W}{W_R} \right) + \frac{A_4}{N_C} + A_5 + A_3 \cdot \left(\frac{G_W}{W_R} \right) - \left(\frac{A_4}{N_C} - A_5 \right) \quad (44)$ $\quad (45)$	[40]	Все грунты, в т. ч. слабонесущие
$\mu_R = \frac{1,15}{C_N} + 0,06 \cdot \left(\frac{G_W}{W_R} \right) \quad (46)$	[41]	Слабонесущие грунты, комбинированный движитель
$\mu_R = 0,8 - \frac{3,2}{N_{CI} + 1,91} \quad (47)$	[42], [43]	Военная техника, результаты
$\mu_R = 0,017 - \frac{0,453}{N_{CI}} \quad (48)$		стендовых испытаний

Модель	Источник	Область применения
$\mu_{p0} = 0,76 \cdot [1 - \exp(-0,07N_{CC}S_R)]$ (49)	[44], [45]	Супеси, узкие шины сельскохозяйственных тракторов
$\mu_{T0} = 0,36 \cdot [1 - \exp(-0,35N_{CC}S)]$ (50)		
$\mu_R = 0,054 + \frac{0,323}{N_{CI}}$ (51)	[46]	Пашня, сельскохозяйственные тракторы
$\mu_R = 0,037 + \frac{0,321}{N_{CI}}$ (52)		

***Примечание:** m — число осей; W_W — общий вес машины; кН; MMP — значение максимального давления в контакте, при котором ещё сохраняется подвижность машины; HG — коэффициент; учитывающий гистерезисные потери при деформации шины; S_R — коэффициент буксования; W_R — номинальная нагрузка на колесо.

Таблица 9. Распространённые зарубежные эмпирические модели для оценки глубины колеи, образующейся под воздействием колёсного движителя

Модель:	Источник:	Область применения:
$z = \frac{0,989}{N_{CI}^{1,23}}$ (53)	[47]	Слабонесущие грунты
$z = \frac{0,875}{N_{CI}^{1,36}}$ (54)	[47]	Все типы грунта, широкие шины
$z = 0,01 + \frac{0,61}{N_{CI}}$ (55)	[47]	Все типы грунта, широкие шины
$z = 0,059 + \frac{0,49}{N_{CI}}$ (56)	[47]	Комбинированный движитель, слабонесущие грунты
$z = -0,026 + \frac{0,629}{N_{CI}}$ (57)	[47]	Минеральные грунты
$z = \frac{0,678}{N_{CI}^{1,46}}$ (58)	[47]	Минеральные грунты
$z = \frac{0,142}{N_{CI}^{0,83}} \cdot D$ (59)	[48]	Комбинированный движитель, слабонесущие грунты
$z = \frac{0,432}{C_N^{0,79}} \cdot D$ (60)	[43]	Комбинированный движитель, слабонесущие грунты
$z = \frac{0,13}{N_M^{0,88}} \cdot D$ (61)	[43]	Комбинированный движитель, слабонесущие грунты

Для расчёта с использованием моделей по таблицам 8, 9 необходимо вычислить вспомогательные коэффициенты, сведённые в таблицу 10.

Таблица 10. Вспомогательные коэффициенты для расчёта по эмпирическим моделям*

Параметр	Источник
$C_N = \frac{CI \cdot B \cdot D}{G_w} \quad (62)$	[40]
$N_{CC} = \frac{CI \cdot B \cdot D}{G_w} \sqrt{\frac{h_z}{H_T}} \quad (63)$	[49]
$N_{CI} = \frac{CI \cdot B \cdot D}{G_w} \cdot \sqrt{\frac{h_z}{H_T}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{B}{2D}} \quad (64)$	[50]
$N_R = \frac{CI \cdot B^{0,85} \cdot D^{1,15}}{G_w} \cdot \sqrt{\frac{h_z}{H_T}} \quad (65)$	[32]
$N_M = \frac{CI \cdot B^{0,8} \cdot D^{0,8}}{G_w} \cdot h_z^{0,4} \quad (66)$	[43]
$N_B = \frac{CI \cdot B \cdot D}{G_w} \cdot \left(\frac{1 + 5 \frac{h_z}{H_T}}{1 + 3 \frac{B}{D}} \right) \quad (67)$	[28]
$N_{RCI} = \frac{RCI \cdot B \cdot D}{G_w} \cdot \sqrt{\frac{h_z}{H_T}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{B}{2D}} \quad (68)$	[50]

*Примечание: B — ширина колеса; D — диаметр колеса; G_w — нагрузка на колесо; H_T — высота шины; h_z — радиальная деформация шины; RCI — скорректированное значение конусного индекса.

Исходя из параметров движителя (ширина колеса B , диаметр колеса D , высота шины H_T , нагрузка на колесо G_w , коэффициент буксования S_R , радиальная деформация шины h_z) и параметра грунта (конусный индекс CI) в результате расчётов по моделям получают оценку проходимости машины. Также большинство авторов отмечают, что трелёвка удовлетворяет экологическим требованиям при глубине колеи $z < 0,2$ м [50—53].

Модели, представленные в таблицах 8, 9, имеют большой практический интерес. Они базируются на результатах регрессионного анализа данных, полученных в ходе полевых испытаний техники.

Однако среди них представлены лишь три модели, полученные при испытаниях малогабаритной техники, в которые не заложены факторы, оказывающие существенное влияние на тягово-сцепные свойства движителя и глубину колеи — угол наклона поверхности

движения и давление в шине, характеризующее её эластичность (в ряде случаев присутствует только радиальная деформация шины h_z , однако не приводятся рекомендации по её оценке) и др.

Как было отмечено выше по тексту, характеристикой грунта в зарубежных моделях является конусный индекс CI , определяемый зондированием грунта при помощи стандартного конусного пенетromетра. Ранее в работах [9], [54] были получены и апробированы формулы для оценки конусного индекса по модулю деформации лесного почвогрунта. Зависимости были использованы для сопоставления результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными зарубежных учёных. Полагаем целесообразным проработать вопрос оценки конусного индекса по физико-механическим свойствам слабонесущих заболоченных грунтов. При наличии зависимости, позволяющей рассчитать конусный индекс по значениям физико-механических свойств грунта, появится возможность сопоставить результаты нашего исследования с экспериментальными *WES*-моделями.

4. Обсуждение и заключение

Большинство отечественных моделей и зависимостей, входящих в них, разработаны и апробированы для случаев работы машин с шириной шины более 0,6 м на сравнительно прочных грунтах, что делает их использование при описании взаимодействия движителя малогабаритного трелёвочного трактора с поверхностью движения не корректным. В частности, основополагающие формулы для связи осадки штампа и давления по пятну контакта получены из решения дифференциального уравнения погружения штампа в деформируемый массив грунта при допущении о том, что модуль деформации массива много больше нормального давления.

Анализ зарубежных публикаций показывает, что коллеги широко используют эмпирические модели (*WES*-модели) для оценки тягово-сцепных свойств и глубины колеи, образующейся под воздействием колёсного движителя. Они базируются на результатах регрессионного анализа данных, полученных в ходе полевых испытаний техники. Среди них имеется сравнительно мало моделей, полученных при испытаниях малогабаритной техники, а в представленных не заложены факторы, оказывающие существенное влияние на тягово-сцепные свойства движителя и глубину колеи — угол наклона поверхности движения и давление в шине, характеризующее её эластичность, и др.

Характеристикой грунта в зарубежных моделях является конусный индекс, определяемый зондированием грунта при помощи стандартного конусного пенетromетра. Ранее были получены и апробированы формулы для оценки конусного индекса по модулю деформации лесного почвогрунта. Зависимости были использованы для сопоставления результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными зарубежных учёных.

Список литературы

1. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия / В. Сюнев, А. Соколов, А. Коновалов, В. Катаров, А. Селиверстов, Ю. Герасимов, С. Карвинен, Э. Вялькю. — Йёнсуу: НИИ Леса Финляндии, 2008. — 126 с.
2. *Матвейко, А. П.* Технология и машины лесосечных работ / А. П. Матвейко, А. С. Федоренчик. — Минск : Технопринт, 2002. — 480 с.
3. Средообразующие технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона Российской Федерации / И. В. Григорьев, А. И. Жукова, О. И. Григорьева, А. В. Иванов. — Санкт-Петербург : ЛТА, 2008. — 176 с.
4. *Григорьев, И. В.* Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования / И. В. Григорьев. — Санкт-Петербург : ЛТА, 2006. — 236 с.
5. *Григорьев, И. В.* Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Григорьев Игорь Владиславович. — Санкт-Петербург : ЛТА, 2006. — 36 с.
6. *Анисимов, Г. М.* Управление качеством лесных гусеничных и колёсных машин в эксплуатации / Г. М. Анисимов, М. Ф. Семенов. — Санкт-Петербург : ЛТА, 1997. — 106 с.
7. *Анисимов, Г. М.* Новые концепции теории лесосечных машин / Г. М. Анисимов, Б. М. Большаков. — Санкт-Петербург : ЛТА, 1998. — 114 с.
8. *Анисимов, Г. М.* Основы минимизации уплотнения почвы трелёвочными системами / Г. М. Анисимов, Б. М. Большаков. — Санкт-Петербург : ЛТА, 1998. — 106 с.
9. *Хитров, Е. Г.* Повышение эффективности трелёвки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, А. М. Хахина. — Санкт-Петербург, 2015.
10. *Агейкин, Я. С.* Вездеходные колёсные и комбинированные движители. Теория и расчёт / Я. С. Агейкин. — Москва : Машиностроение, 1972. — 184 с.
11. *Агейкин, Я. С.* Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. — Москва : Машиностроение, 1981. — 232 с.
12. *Вольская, Н. С.* Теория автомобиля / Н. С. Вольская, Я. С. Агейкин. — Москва : МГИУ, 2008. — 320 с.
13. *Ларин, В. В.* Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колёсных машин на местности : дис. д-ра ... техн. наук : 05.05.03 / Ларин Василий Васильевич. — Москва, 2007. — 530 с.
14. *Гольштейн, М. Н.* Механические свойства грунтов / М. Н. Гольштейн. — Москва : Стройиздат, 1973. — 375 с.

15. *Гольштейн, М. Н.* Механика грунтов, основания и фундаменты / М. Н. Гольштейн, А. А. Царьков, И. И. Черкасов. — Москва : Транспорт, 1981. — 320 с.
16. *Устинов, В. В.* Оценка тягово-сцепных свойств колёсных движителей лесных машин методами теории движения автотранспорта по бездорожью : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / Устинов Владимир Владимирович. — Архангельск : САФУ, 2016. — 21 с.
17. *Божбов, В. Е.* Повышение эффективности процесса трелёвки путём обоснования рейсовой нагрузки форвардеров / В. Е. Божбов, Д. А. Ильющенко, Е. Г. Хитров. — Санкт-Петербург, 2015.
18. *Цытович, Н. А.* Механика грунтов. Краткий курс / Н. А. Цытович. — Москва : Высш. шк., 1983. — 288 с.
19. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, E. Khitrov, A. Kalistratov, V. Bozhbov, V. Ivanov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. — 2014. — С. 407—414.
20. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation / I. Grigorev, A. Nikiforova, E. Khitrov, V. Ivanov, G. Gasparian // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. — 2014. — С. 443—446.
21. *Анисимов, Г. М.* От чего зависит эффективность тракторной трелёвки / Г. М. Анисимов // Лесная промышленность. — 1981. — № 5. — С. 29—31.
22. *Анисимов, Г. М.* Новая концепция взаимодействия трелёвочного трактора с волоком / Г. М. Анисимов // Межвузовский сборник научных трудов. — Санкт-Петербург : Изд-во ЛТА, 1997. — С. 12.
23. *Катаров, В. К.* Обоснование применимости технологических процессов лесосечных работ по степени воздействия на пути первичного транспорта леса : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Катаров Василий Кузьмич. — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2009. — 20 с.
24. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учётом деформации почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, В. А. Макуев, А. М. Хахина, С. Ю. Калинин // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2015. — Т. 19, № 6. — С. 87—90.
25. *Хахина, А. М.* Влияние модуля деформации на форму пятна контакта движителя с почвогрунтом / А. М. Хахина, В. В. Устинов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. — 2015. — Т. 3, № 9—2 (20—2). — С. 287—290.
26. *Хитров, Е. Г.* Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колёсного движителя / Е. Г. Хитров, И. М. Бартенев // Лесотехнический журнал. — 2016. — Т. 6, № 4 (24). — С. 225—232.

27. *Хитров, Е. Г.* Расчёт глубины колеи колёсного движителя лесных тракторов на склонах / Е. Г. Хитров, И. М. Бартнев // Лесотехнический журнал. — 2016. — Т. 6, № 4 (24). — С. 233—239.
28. *Turnage, G. W.* Tire selection and performance prediction for off-road wheeled-vehicle operations / G. W. Turnage // Proceedings of the 4th International ISTVS Conference, Stockholm — Kiruna, Sweden, April 24— 28. — 1972. — I: 62—82.
29. *Turnage, G. W.* Using dimensionless prediction terms to describe off-road wheel vehicle performance / G. W. Turnage // Transaction ASAE Paper. — 1972. — No 72—634.
30. *Wismer, R. D.* Off-road traction prediction for wheeled vehicles / R. D. Wismer, H. J. Luth // Transaction ASAE. — 1973. — No 17 (1). — P. 8—10, 14.
31. *Rowland, D.* Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance / D. Rowland // Proceedings of the 4th International ISTVS Conference, Stockholm — Kiruna, Sweden, April 24— 28. — 1972. — I: 353—384.
32. *Rowland, D.* Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles / D. Rowland, J. W. Peel. — Institute of mechanical engineering, 1975. — 81 p.
33. *Larminie, J. C.* Standards for mobility requirements of military vehicles / J. C. Larminie // Journal of Terramechanics. — 1988. — No 25 (3). — P. 171—189.
34. The empirical prediction of tractor- implement field performance / D. Gee-Clough, M. McAllister, G. Pearson, D. W. Evernden // Journal of terramechanics. — 1978. — No 15 (2). — P. 81—94.
35. *Gee-Clough, D.* A comparison of the mobility number and bekkar approaches to traction mechanics and recent advances in both methods at the N. I. A. E / D. Gee-Clough // Journal of terramechanics. — 1978. — No 15 (2). — P. 81—94; Proceedings of the 6th international conference of ISTVS, August 22—25, 1978, Vienna, Austria. — II: 735—756.
36. *Dwyer, M. J.* Computer models to predict the performance of agricultural tractors on heavy draught operations / M. J. Dwyer // Proceedings of the 8th International conference of ISTVS, Cambridge, England, August 6—10. — 1984. — III: 933—952.
37. *Dwyer, M. J.* Tractive performance of a wide, low-pressure tyre compared with conventional tractor drive tyres / M. J. Dwyer // Journal of terramechanics. — 1987. — No 24 (3). — P. 227—234.
38. *Brixius, W. W.* Traction prediction equations for bias ply tires / W. W. Brixius // ASAE paper. — 1987. — No 87—1622.
39. *Ashmore, C.* An empirical equation for predicting tractive performance of log- skidder tires / C. Ashmore, C. Burt, J. Turner // Transactions of the ASAE. — 1987. — No 30 (5). — P. 1231—1236.
40. *Vechinski, C. R.* Evaluation of an empirical traction equation for forestry tires / C. R. Vechinski, E. E. Johnson, R. L. Raper // Proceedings of the 11th International ISTVS Conference, Lake Tahoe, Nevada, USA, September 27—30. — 1993. — 1: 265—273.

41. *Rummer, R.* Factors affecting the rolling resistance of rubber-tired skidders / R. Rummer, C. Ashmore // ASAE Paper. — 1985. — No 85—1611. — 15 p.
42. *Maclaurin, E. B.* The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres / E. B. Maclaurin // Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, August 20—24. — 1990. — I: 177—186.
43. *Maclaurin, E. B.* The use of mobility numbers to predict the tractive performance of wheeled and tracked vehicles in soft cohesive soils / E. B. Maclaurin // Proceedings of the 7th European ISTVS Conference, Ferrara, Italy, 8—10 October. — 1997. — P. 391—398.
44. *Sharma, K. A.* Traction data analysis in reference to a unique zero condition / K. A. Sharma, K. P. Pandley // Journal of terramechanics. — 1998. — No 35 (3). — P. 179—188.
45. *Sharma, K. A.* Matching tyre size to weight, speed and power available for maximising pulling ability of agricultural tractors / K. A. Sharma, K. P. Pandley // Journal of terramechanics. — 2001. — No 28 (2). — P. 71—88.
46. *McAllister, M.* Reduction in the rolling resistance of tyres for trailed agricultural machinery / M. McAllister // Journal of agricultural engineering research. — 1983. — No 28. — P. 127—137.
47. *Rantala, M.* Metsämaan raiteistumisherkkyyden ennustamismenetelmien vertailu käytännön puunkorjuuoloissa. Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos / M. Rantala // Metsäteknologian tutkielma MMM-tutkintoa varten, 2001. — 49 p.
48. *Rummukainen, A.* Manoeuvrability of forwarders and its prediction on peatlands / A. Rummukainen, J. Ala-Ilomäki // ISTVS, Third European conference. Off the road vehicles and machinery in agriculture, earthwork and forestry. 15—17 September, 1986, Warsaw, Poland. — 1986. — II: 75—81.
49. *Freitag, D. R.* Adimensional analysis of the performance of pneumatic tires on soft soils / D. R. Freitag // U S Army Waterways Experiment Station, Report. — 1965. — No 3—688.
50. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Dynamic terrain classification / M. Saarilahti. — Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 22 p.
51. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Soil interaction model / M. Saarilahti. — Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 39 p.
52. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors / M. Saarilahti. — Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 28 p.
53. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors, Interpretation and application of the results / M. Saarilahti. —

Helsinki : University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 15 p.

54. Расчёт конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта / Е. Г. Хитров, Г. В. Григорьев, И. Н. Дмитриева, Д. А. Ильюшенко // Системы. Методы. Технологии. — 2014. — № 4 (24). — С. 127—131.

References

1. Comparison of technology of logging operations the logging companies of the Republic of Karelia / V. Syuney, A. Sokolov, A. Konovalov, V. Cathars, A. Seliverstov, Yuri Gerasimov, S. Karvinen, E. Valikko. — Joensuu : Forest research Institute of Finland, 2008. — 126 p.
2. *Matveyko, A. P.* Technology and machinery of logging operations / A. P. Matveyko, A. S. Fedorenchik. — Minsk : Tekhnoprint, 2002. — 480 p.
3. Sidodadi technology development of cutting areas in the North-West region of the Russian Federation / I. V. Grigorev, A. I. Zhukova, O. I. Grigoreva, A. V. Ivanov. — St. Petersburg : LTA, 2008. — 176 p.
4. *Grigorev, I. V.* Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidders justification modes of their movement and technological equipment / I. V. Grigorev. — St. Petersburg : LTA, 2006. — 236 p.
5. *Grigorev, I. V.* Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidders justification modes of their movement and technological equipment : abstract Diss. Dr. Techn. Sciences / Grigorev Igor` Vladislavovich. — St. Petersburg : LTA, 2006. — 36 p.
6. *Anisimov, G. M.* The Management of quality tracked and wheeled forest machines in use / G. M. Anisimov, M. F. Semenov. — St. Petersburg : LTA, 1997. — 106 p.
7. *Anisimov, G. M.* A New concept of the theory of harvesting machines / G. M. Anisimov, B. M. Bolshakov. — St. Petersburg : LTA, 1998. — 114 p.
8. *Anisimov, G. M.* Foundations minimize soil compaction logging systems / G. M. Anisimov, B. M. Bolshakov. — St. Petersburg : LTA, 1998. — 106 p.
9. *Khitrov, E. G.* Improving the efficiency of the trellis by substantiating the performance of forest machines in the operational control of the properties of soil / I. G. Khitrov, I. V. Grigorev, A. M. Khakhina. — St. Petersburg, 2015.
10. *Ageikin, Ya. S.* Off-road wheeled and combined propulsion. The theory and analysis / Ya. S. Ageikin. — Moscow : Mashinostroenie, 1972. — 184 p.
11. *Ageikin, Ya. S.* Permeability of automobiles / Ya. S. Ageikin. — Moscow : Mashinostroenie, 1981. — 232 p.
12. *Volskaya, N. S.* With. Car theory / N. S. Volsky, Ya. S. Ageikin. — Moscow : MGIU, 2008. — 320 p.
13. *Larin, V. V.* Methods of forecasting of supporting patency of multiaxial wheeled vehicles on the ground : Diss. Doc. tech. Sciences : 05.05.03 / Larin Vasilij Vasil`evich. — Moscow, 2007. — 530 p.

14. *Holstein, M. N.* Mechanical properties of soils / M. N. Holstein. — Moscow : Stroyizdat, 1973. — 375 p.
15. *Holstein, M. N.* Soil mechanics, bases and foundations / M. N. Holstein, A. I. Tsarkov, I. I. Cherkasov. — Moscow : Transport, 1981. — 320 p.
16. *Ustinov, V. V.* Evaluation of traction properties wheeled propulsion of forest machines by methods of the theory of the movement of vehicles on the road: the author's : abstract Diss. kand. tech. Sciences : 05.21.01 / Ustinov Vladimir Vladimirovich. — Arkhangelsk : SAFU, 2016. — 21 p.
17. *Bozhbov, V. E.* Increase of efficiency of process of skidding by study regular load forwarders / V. E. Bozhbov, D. A. Ilyushchenko, E. G. Khitrov. — St. Petersburg, 2015.
18. *Tsitovich, N. A.* The Mechanics of soil. Short course / N. A. Tsytovich. — Moscow : Higher school, 1983. — 288 p.
19. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, E. Khitrov, A. Kalistratov, V. Bozhbov, V. Ivanov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. — 2014. — P. 407—414.
20. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation / I. Grigorev, A. Nikiforova, E. Khitrov, V. Ivanov, G. Gasparian // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. — 2014. — P. 443—446.
21. *Anisimov, G. M.* What determines the efficiency of tractor skidding / G. M. Anisimov // Forest industry. — 1981. — No 5. — P. 29—31.
22. *Anisimov, G. M.* A New concept of interaction of a skidder with a fiber / G. M. Anisimov // Interuniversity collection of scientific works. — St. Petersburg : Ed. LTA, 1997. — P. 12.
23. *Katarov, V. K.* Justification of applicability of technological processes of logging operations on the degree of impact on the primary forest transport : autoref. dis. kand. tech. Sciences / Katarov Vasilij Kuz'mich. — Petrozavodsk : PetrSU, 2009. — 20 p.
24. A Model for estimating radial deformation of the wheels of the forest machine, taking into account the deformation of the soil-ground / E. G. Khitrov, I. V. Grigorev, V. A. Makuev, A. M. Chahina, S. Kalinin // Bulletin of Moscow state forest University — Forest Herald. — 2015. — Vol. 19, No 6. — P. 87—90.
25. *Chahina, A. M.* Effect of deformation modulus on the shape of the contact patch of the propeller with the soils / A. M. Chahina, V. V. Ustinov Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice. — 2015. — Vol. 3, No 9—2 (20—2). — P. 287—290.
26. *Khitrov, E. G.* Influence of the angle of the transverse slope of the rolling surface on the traction properties of the wheel mover / E. G. Khitrov, I. M. Bartenev // Forestry journal. — 2016. — Vol. 6, No 4 (24). — P. 225—232.

27. *Khitrov, E. G.* Calculation of the track depth of the wheel drive of forest tractors on the slopes / E. G. Khitrov, I. M. Bartenev // Forestry journal. — 2016. — Vol. 6, No 4 (24). — P. 233—239.
28. *Turnage, G. W.* Tire selection and performance prediction for off-road wheeled-vehicle operations / G. W. Turnage // Proceedings of the 4th International ISTVS Conference, Stockholm — Kiruna, Sweden, April 24— 28. — 1972. — I: 62—82.
29. *Turnage, G. W.* Using dimensionless prediction terms to describe off-road wheel vehicle performance / G. W. Turnage // Transaction ASAE Paper. — 1972. — No 72—634.
30. *Wismer, R. D.* Off-road traction prediction for wheeled vehicles / R. D. Wismer and H. J. Luth // Transaction ASAE. — 1973. — No 17 (1). — P. 8—10, 14.
31. *Rowland, D.* Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance / D. Rowland // Proceedings of the 4th International ISTVS Conference, Stockholm — Kiruna, Sweden, April 24— 28. — 1972. — I: 353—384.
32. *Rowland, D.* Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles / D. Rowland, J. W. Peel. — Institute of mechanical engineering, 1975. — 81 p.
33. *Larminie, J. C.* Standards for mobility requirements of military vehicles / J. C. Larminie // Journal of Terramechanics. — 1988. — No 25 (3). — P. 171—189.
34. The empirical prediction of tractor- implement field performance / D. Gee-Clough, M. McAllister, G. Pearson, D. W. Evernden // Journal of terramechanics. — 1978. — No 15 (2). — P. 81—94.
35. *Gee-Clough, D.* A comparison of the mobility number and bekkar approaches to traction mechanics and recent advances in both methods at the N. I. A. E / D. Gee-Clough // Journal of terramechanics. — 1978. — No 15 (2). — P. 81—94; Proceedings of the 6th international conference of ISTVS, August 22—25, 1978, Vienna, Austria. — II: 735—756.
36. *Dwyer, M. J.* Computer models to predict the performance of agricultural tractors on heavy draught operations / M. J. Dwyer // Proceedings of the 8th International conference of ISTVS, Cambridge, England, August 6—10. — 1984. — III: 933—952.
37. *Dwyer, M. J.* Tractive performance of a wide, low-pressure tyre compared with conventional tractor drive tyres / M. J. Dwyer // Journal of terramechanics. — 1987. — No 24 (3). — P. 227—234.
38. *Brixius, W. W.* Traction prediction equations for bias ply tires / W. W. Brixius // ASAE paper. — 1987. — No 87—1622.
39. *Ashmore, C.* An empirical equation for predicting tractive performance of log- skidder tires / C. Ashmore, C. Burt, J. Turner // Transactions of the ASAE. — 1987. — No 30 (5). — P. 1231—1236.
40. *Vechinski, C. R.* Evaluation of an empirical traction equation for forestry tires / C. R. Vechinski, E. E. Johnson, R. L. Raper // Proceedings of the 11th International ISTVS Conference, Lake Tahoe, Nevada, USA, September 27—30. — 1993. — 1: 265—273.

41. *Rummer, R.* Factors affecting the rolling resistance of rubber-tired skidders / R. Rummer, C. Ashmore // ASAE Paper. — 1985. — No 85—1611. — 15 p.
42. *Maclaurin, E. B.* The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres / E. B. Maclaurin // Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, August 20—24. — 1990. — I: 177—186.
43. *Maclaurin, E. B.* The use of mobility numbers to predict the tractive performance of wheeled and tracked vehicles in soft cohesive soils / E. B. Maclaurin // Proceedings of the 7th European ISTVS Conference, Ferrara, Italy, 8—10 October. — 1997. — P. 391—398.
44. *Sharma, K. A.* Traction data analysis in reference to a unique zero condition / K. A. Sharma, K. P. Pandley // Journal of terramechanics. — 1998. — No 35 (3). — P. 179—188.
45. *Sharma, K. A.* Matching tyre size to weight, speed and power available for maximising pulling ability of agricultural tractors / K. A. Sharma, K. P. Pandley // Journal of terramechanics. — 2001. — No 28 (2). — P. 71—88.
46. *McAllister, M.* Reduction in the rolling resistance of tyres for trailed agricultural machinery / M. McAllister // Journal of agricultural engineering research. — 1983. — No 28. — P. 127—137.
47. *Rantala, M.* Metsämaan raiteistumisherkkyyden ennustamismenetelmien vertailu käytännön puunkorjuuoloissa. Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos / M. Rantala // Metsäteknologian tutkielma MMM-tutkintoa varten, 2001. — 49 p.
48. *Rummukainen, A.* Manoeuvrability of forwarders and its prediction on peatlands / A. Rummukainen, J. Ala-Ilomäki // ISTVS, Third European conference. Off the road vehicles and machinery in agriculture, earthwork and forestry. 15—17 September, 1986, Warsaw, Poland. — 1986. — II: 75—81.
49. *Freitag, D. R.* Adimensional analysis of the performance of pneumatic tires on soft soils / D. R. Freitag // U S Army Waterways Experiment Station, Report. — 1965. — No 3—688.
50. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Dynamic terrain classification / M. Saarilahti. — Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 22 p.
51. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Soil interaction model / M. Saarilahti. — Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 39 p.
52. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors / M. Saarilahti. — Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 28 p.
53. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors, Interpretation and application of the results / M. Saarilahti. —

- Helsinki : University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 15 p.
54. Calculation of the cone index by the value of the deformation modulus of forest soil / E. G. Khitrov, G. V. Grigorev, I. N. Dmitrieva, D. Ilyushenko // Systems. Methods. Technologies. — 2014. — № 4 (24). — P. 127—131.

© Дмитриева М. Н., Григорьев И. В., Рудов С. Е., 2019