

Исследование экологичности и вопросы сертификации движителей лесных машин

Е.Г. Хитров^{1a}, Е.В. Котенев^{1b}, А.В. Андронов^{1c}, С.А. Чжан^{2d}, В.А. Никифорова^{2e}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a yegorkhitrov@gmail.com, ^b kotenew@bk.ru, ^c andronovalexandr@gmail.com,

^d Schzan@rambler.ru, ^e nikiforovabr@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9708-8990>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Статья поступила 27.04.2020, принята 20.05.2020

В исследовании представлен алгоритм расчета показателей воздействия ходовой части лесной машины на почвогрунт, позволяющий дать оценку экологических последствий и создающий основу для разработки рекомендаций по экологической сертификации движителей лесозаготовительной техники. Материалом для исследования служат разработанные ранее математические модели, прогнозирующие уплотнение грунта и колеобразование, вызванное воздействием движителей лесных машин. При реализации алгоритма приняты три условия, предложенные независимыми исследователями, при которых движитель можно признать совместимым с почвогрунтом с точки зрения экологичности: 1) буксование движителя должно находиться в допустимых пределах, недопустимо застревание машины, вызванное потерей опорной проходимости; 2) относительное уплотнение почвогрунта должно быть в заданных допустимых пределах. Рекомендуемое значение относительного уплотнения составляет 1,1; 3) глубина колеи после однократного прохождения машины по участку лесосеки должна находиться в заданных допустимых пределах. Рекомендуемое значение глубины колеи после первого прохода машины составляет 0,2 м. При соблюдении условий 1–3 предлагается считать движитель полностью экологически совместимым с почвогрунтом («А»); при выполнении условий 1–2 — считать условно совместимым с почвогрунтом («В»); при выполнении лишь первого условия движитель считаем плохо совместимым с опорной поверхностью («С»). Невыполнение первого условия указывает на несовместимость движителя с почвогрунтом («D»). Проведена реализация алгоритма оценки и установлены границы варьирования номинального давления колесного, гусеничного и колесно-гусеничного движителя на лесной почвогрунт, в пределах которых движитель отвечает тому или иному классу экологической совместимости.

Ключевые слова: уплотнение; колеобразование; буксование; движители лесных машин; лесные почвогрунты.

Environmental research and certification issues for forest machines movers

E.G. Khitrov^{1a}, E.V. Kotenev^{1b}, A.V. Andronov^{1c}, S.A. Chzhan^{2d}, V.A. Nikiforova^{2e}

¹ St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky per., St. Petersburg, Russia

² Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a yegorkhitrov@gmail.com, ^b kotenew@bk.ru, ^c andronovalexandr@gmail.com,

^d Schzan@rambler.ru, ^e nikiforovabr@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9708-8990>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Received 27.04.2020, accepted 20.05.2020

The study presents an algorithm for calculating the indicators of the impact of the running gear of the forest machine on the soil, which makes it possible to assess the environmental consequences and creates the basis for the development of recommendations on environmental certification of movers of forestry equipment. The material for the study is the previously developed mathematical models that predict soil compaction and rutting caused by the action of the engines of forest machines. When implementing the algorithm, three conditions are proposed by independent researchers, under which the mover can be considered compatible with the soil from the point of view of environmental friendliness: 1) the mover slipping must be within acceptable limits, the car is not allowed to get stuck due to the loss of support patency; 2) the relative compaction of the soil should be within the specified permissible limits. The recommended relative compaction value is 1.1; 3) the gauge depth after a single passage of the machine through the cutting area should be within the specified permissible limits. The recommended gauge depth after the first pass of the machine is 0.2 m. Under the conditions 1-3, it is proposed to consider the mover as completely environmentally compatible with the soil ("A"). When conditions 1-2 are met, it is proposed to consider the vehicle to be condi-

tionally compatible with the soil ("B"). If only condition 1 is met, the vehicle is considered poorly compatible with the soil ("C"). Failure to comply with the first condition indicates the incompatibility of the mover with the soil ("D"). The estimation algorithm has been implemented and the boundaries for varying the nominal pressure of the wheeled, tracked and wheeled-tracked mover on the forest soil have been established, within which the mover corresponds to one or another class of environmental compatibility.

Keywords: soil compaction; rutting; skidding; forestry vehicles; forest soil.

Введение. Современные технологии заготовки древесины должны быть не только высокопроизводительными, но и экологически безопасными [1–3]. Негативное влияние движителей лесных машин на почвогрунт широко известно: под воздействием ходовой части происходит уплотнение и переуплотнение грунта, а также колеобразование. Эти явления нарушают функционирование корневой системы деревьев, оставляемых на доразживание, и в перспективе могут привести к заболачиванию участка леса. Снижение вреда почвогрунту на базе дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку научно-обоснованных рекомендаций по подбору параметров движителей лесных машин, является перспективным направлением совершенствования технологии лесозаготовок [2; 3].

Цель нашей работы — разработать и представить алгоритм расчета показателей воздействия ходовой части лесной машины на почвогрунт, позволяющий дать оценку экологических последствий и создающий основу для разработки рекомендаций по экологической сертификации движителей лесозаготовительной техники.

Материалом для исследования служат разработанные авторами ранее математические модели, прогнозирующие уплотнение грунта и колеобразование, вызванное воздействием движителей лесных машин.

Постановка задачи, основные уравнения математической модели. В качестве основных показателей воздействия движителя на почвогрунт примем уплотнение c , глубину колеи h и коэффициент буксования движителя S .

Приведем основные уравнения, образующие математическую модель, вывод их, основанный на положениях работ [4; 5], подробно рассмотрен в источниках [6–8], из которых они заимствованы.

Сжатие почвогрунта под воздействием движителя c определим как интеграл относительной деформации сжатия почвогрунта [4; 7]:

$$c = \int_0^{H-c} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} dz, \quad (1)$$

где ε — относительная деформация сжатия почвогрунта; H — толщина сжимаемого (мягкого) слоя почвогрунта; z — вертикальная координата, отсчитываемая вниз от пятна контакта движителя с почвогрунтом.

Поскольку:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2)$$

где σ — нормальное напряжение, распространяющееся по глубине почвогрунта z ; E — модуль деформации почвогрунта, запишем:

$$c = \int_0^{H-c} \frac{\sigma}{E-\sigma} dz. \quad (3)$$

Глубину колеи h также определим как интеграл, но с учетом дополнительных деформаций, вызванных сдвигом слоев почвогрунта при потере несущей способности [4; 7]:

$$h = \int_0^{H-h} \frac{\sigma}{E-\sigma} \cdot \frac{p_s \alpha_H}{p_s \alpha_H - p} dz, \quad (4)$$

где p_s — несущая способность почвогрунта; α_H — коэффициент учета толщины сжимаемого слоя почвогрунта; p — номинальное давление движителя по пятну контакта [1].

Зависимость напряжения σ по глубине сжимаемого слоя примем с учетом затухания [4]:

$$\sigma = \frac{Jpk_d}{1 + \left(\frac{z}{aB}\right)^2}, \quad (5)$$

где J — коэффициент учета соотношения сторон пятна контакта; a — коэффициент учета ширины пятна контакта; B — ширина пятна контакта; k_d — коэффициент учета времени воздействия нагрузки на почвогрунт.

Выражения для J , a [4]:

$$a = 0,64 \frac{H+B}{B}, \quad (6)$$

$$J = \frac{0,03B+L}{0,6B+0,43L}, \quad (7)$$

где L — длина пятна контакта.

Коэффициент динамичности при использовании реологической модели почвогрунта Гогенемзера – Прагера [9]:

$$k_d = 1 + \frac{E}{E_d} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{E_d}{\eta} t\right)\right), \quad (8)$$

где E_d — длительный модуль деформации почвогрунта; η — вязкость почвогрунта; t — время воздействия движителя.

Время воздействия движителя:

$$t = n \frac{L}{v}, \quad (9)$$

где n — число проходов движителя по колее; v — скорость машины.

Коэффициент α_H найдем по формуле [5]:

$$\alpha_H = 1 + \frac{0,5H^*h}{H \cdot (H-h-0,25H^*)}, \quad (10)$$

где H^* — коэффициент учета внутреннего трения почвогрунта.

Сила сопротивления движению машины, оказываемая деформируемым почвогрунтом, находится как интеграл [4; 6]:

$$F_r = B \int_0^h p dh. \quad (11)$$

Сила сцепления движителя с поверхностью почвогрунта рассчитывается по формуле [6; 9]:

$$F_t = \frac{BLG^2(p \tan \varphi + C)}{(G - C)^2} - S \frac{BL^2CG(p \tan \varphi + C)}{2t_g(G - C)} \quad (12)$$

$$- \frac{1}{S} \frac{BG^2t_g(p \tan \varphi + C)^2}{(G - C)^3} \ln \left(1 + S \frac{L(G - C)}{t_g(p \tan \varphi + C)} \right),$$

где t_g — шаг грунтозацепов; φ — угол внутреннего трения почвогрунта; C — удельное сцепление почвогрунта; G — модуль сдвига почвогрунта; S — коэффициент буксования.

Относительное уплотнение почвогрунта найдем по уравнению:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_0}{1 - \frac{c}{H}} \quad (13)$$

Входными параметрами, характеризующими почвогрунт, являются ρ , E , p_s , E_d , η , C , G , φ , H^* , H . Входными параметрами, характеризующими движитель, являются B , L , p , t_g , n , v .

Алгоритм расчета следующий. После задания значений исходных параметров уравнение (3) решается численно с учетом (5) – (9), численное решение уравнения (4) проводим с учетом (5) – (10). Следует провести серию расчетов при варьировании давления от 0 до p с шагом Δp (в примерах в нашей статье $\Delta p = 0,01$ МПа), тогда интеграл F_r по (11) найдем численно, например, при помощи метода трапеций. По формуле (12) определим максимум $F_t = F_{max}$ и соответствующее ему значение $S = S_{omn}$, это значение коэффициента буксования будет соответствовать максимально возможной силе сцепления движителя с поверхностью почвогрунта. Второе, действительное, значение S найдем как численное решение уравнения $F_r = F_t$, приравняв правые части формул (11) и (12). Относительное уплотнение почвогрунта рассчитаем по формуле (13) при найденном значении c , соответствующем давлению p .

Примем следующие условия, при которых движитель можно признать совместимым с почвогрунтом с точки зрения экологичности:

1. Буксование движителя должно находиться в допустимых пределах, иначе происходит срез слоев почвогрунта, и нарушается его структура. Недопустимо застревание машины, вызванное потерей опорной прочности [3].

2. Относительное уплотнение почвогрунта должно находиться в заданных допустимых пределах, иначе угнетается корневая система деревьев, оставляемых на доращивание, нарушаются биологические процессы в почвогрунте и происходит его деградация. Рекомендуемое значение относительного уплотнения составляет 1,1 [10].

3. Глубина колеи после однократного прохождения машины по участку лесосеки должна находиться в заданных допустимых пределах, иначе почвогрунт будет сильно поврежден, а при последующих проходах машины по участку колея будет лишь увеличиваться, в будущем возможно заболачивание лесосеки. Рекомендуемое значение глубины колеи после первого прохода машины составляет 0,2 м [10].

Условимся, что при соблюдении условий 1–3 движитель будем считать полностью экологически совместимым с почвогрунтом («А»); при выполнении условий 1–2 движитель будем считать условно совместимым с почвогрунтом («В»); при выполнении лишь 1-го условия движитель считаем плохо совместимым с опорной поверхностью («С»). Невыполнение 1-го условия показывает несовместимость движителя с почвогрунтом («D»).

Результаты реализации математической модели.

Представим результаты расчетов для трех категорий почвогрунта с параметрами, указанными в табл. 1, по [9; 11; 12].

Таблица 1. Параметры почвогрунта при моделировании

Параметр	Категория почвенно-грунтовых условий		
	слабонесущий почвогрунт, III	почвогрунт средней прочности, II	прочный почвогрунт, I
ρ , г/см ³	0,75	0,85	0,95
E , МПа	0,4	1	3
p_s , МПа	0,044	0,11	0,33
E_d , МПа	0,8	2	6
η , МПа·с	0,12	0,75	6,75
C , МПа	0,0053	0,0108	0,0252
G , МПа	0,22	0,25	0,28
φ , °	12	14	17
H^*	0,164	0,202	0,258
H , м	0,8	0,4	0,3

Пример результатов расчета представлен на рис. 1–4. Расчет выполнен для почвогрунта III категории, параметры колесного движителя $B = 0,7$ м; $L = 0,8$ м; $t_g = 0,14$; $n = 4$; $v = 1,39$ м/с (колесный форвардер 8x8).

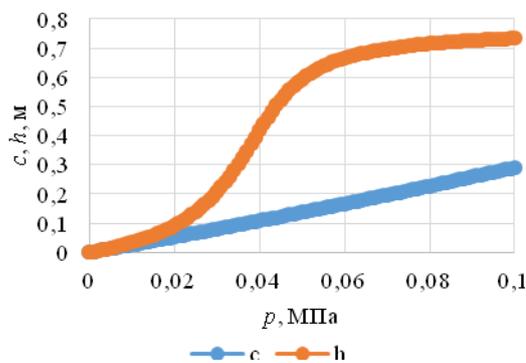


Рис. 1. Результаты расчета глубины колеи и уплотнения почвогрунта III категории под воздействием колесного движителя

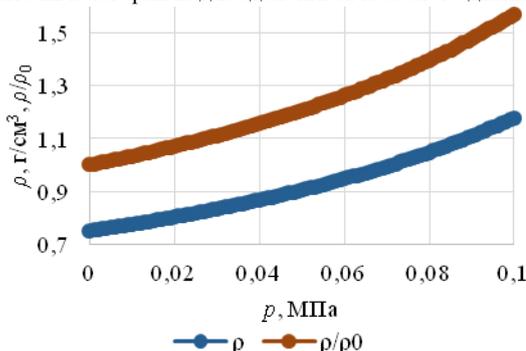


Рис. 2. Результаты расчета плотности и относительного уплотнения почвогрунта III категории под воздействием колесного движителя

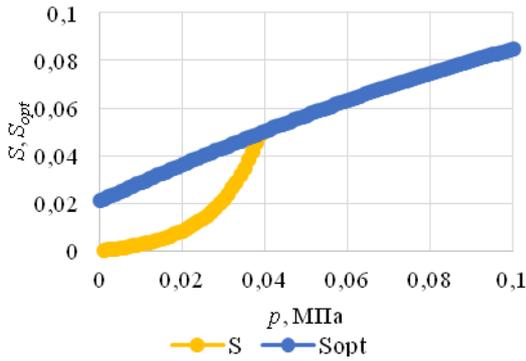


Рис. 3. Результаты расчета действительного и оптимального коэффициента буксования колесного движителя при работе на почвогрунте III категории

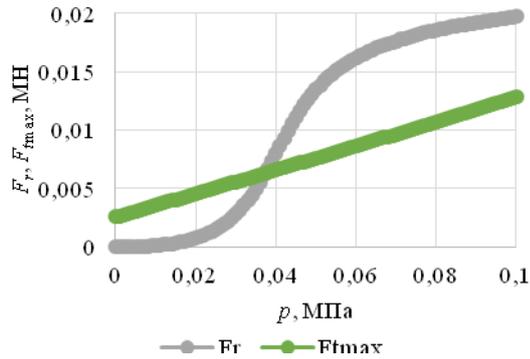


Рис. 4. Результаты расчета силы сопротивления и максимальной силы сцепления единичного колесного движителя при работе на почвогрунте III категории

Расчеты с использованием предлагаемого алгоритма выполнены для случаев работы колесных ($L = 0,8$ м, $n = 4$), колесно-гусеничных ($L = 2,12$ м, $n = 2$) и гусеничных машин ($L = 5$ м, $n = 1$) на почвогрунтах I–III категории. Результаты исследования экологической совместимости движителей представлены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка экологической совместимости движителей лесных машин в зависимости от их типа, давления на почвогрунт и категории почвогрунта

Тип	Категория почвогрунта		
	III	II	I
КД	«А»: < 0,028, «В»: 0,028–0,030 «С»: 0,030–0,038 «D»: > 0,038	«А»: < 0,059	«А»: < 0,1
КГД	«А»: < 0,019, «В»: 0,019–0,025 «С»: 0,025–0,1	«А»: < 0,039, «В»: 0,039–0,095 «С»: 0,095–0,1	«А»: < 0,1
ГД	«А»: < 0,016, «В»: 0,016–0,023 «С»: 0,023–0,1	«А»: < 0,032, «В»: 0,032–0,088 «С»: 0,088–0,1	«А»: < 0,096 «В»: 0,096–0,1

Примечание. КД — колесный движитель; КГД — колесно-гусеничный движитель; ГД — гусеничный движитель.

Литература

1. Porsinsky T., Pentek T., Bosner A., Stankic I. Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils // In Global Perspectives on Sustainable Forest Management. Okia, C.A., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 2012. P. 69–69.

Выводы. Предлагаемый алгоритм оценки реализован при стандартных параметрах движителя колесного форвардера; форвардера, оснащенного моногусеницами и гусеничного трелевочного трактора [10] при сочетаниях механических свойств, характерных для заданных категорий почвогрунта. В качестве одного из основных параметров движителя использована величина номинального давления на опорную поверхность [1] до 0,1 МПа. На практике сочетания входных параметров модели могут существенно отличаться от использованных, действительное значение давления может, в зависимости от жесткости движителя и почвогрунта, отличаться от номинального, поэтому в дальнейших исследованиях следует провести реализацию алгоритма оценки экологичности движителей в более широком спектре значений входных параметров модели. При принятых исходных данных установлено, что:

1. При работе на почвогрунтах I категории машины с колесным и колесно-гусеничным движителем полностью совместимы с опорной поверхностью с точки зрения экологического воздействия при номинальном давлении движителя в пределах 0,1 МПа; машины с гусеничным движителем полностью совместимы при давлении движителя до 0,096 МПа.

2. При работе на почвогрунтах II категории полностью совместимы с почвогрунтом колесные машины с номинальным давлением до 0,059 МПа, колесно-гусеничные с давлением до 0,039 МПа и гусеничные машины с давлением до 0,032 МПа. Условно совместимы колесные машины с давлением свыше 0,059 МПа, колесно-гусеничные машины с давлением 0,039–0,095 МПа и гусеничные машины с давлением 0,032–0,088 МПа. Плохо совместимы колесно-гусеничные машины с номинальным давлением свыше 0,095 МПа и гусеничные машины с номинальным давлением свыше 0,088 МПа.

3. При работе на почвогрунтах III категории полностью совместимы с почвогрунтом колесные машины с номинальным давлением до 0,028 МПа, колесно-гусеничные с давлением до 0,019 МПа и гусеничные машины с давлением до 0,016 МПа. Условно совместимы колесные машины с давлением 0,028–0,03 МПа, колесно-гусеничные машины с давлением 0,019–0,025 МПа и гусеничные машины с давлением 0,016–0,023 МПа. Плохо совместимы колесные машины с номинальным давлением 0,03–0,038 МПа, колесно-гусеничные машины с давлением свыше 0,025 МПа и гусеничные машины с номинальным давлением свыше 0,023 МПа. Колесные машины с номинальным давлением на грунт свыше 0,038 МПа не совместимы с почвогрунтами III категории.

Заметим, что верификация теоретических разработок возможна за счет сопоставления результатов моделирования со сведениями независимых зарубежных источников [10; 13–16], для этого следует привести значения механических свойств почвогрунта к интегральному сопротивлению зондированию по [12; 17–20].

2. 2. Божбов В.Е. Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Архангельск: С(А)ФУ, 2015. 20 с.
3. 3. Устинов В.В. Оценка тягово-сцепных свойств колесных

- двигателей лесных машин методами теории движения автотранспорта по бездорожью: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Архангельск: С(А)ФУ, 2016. 20 с.
4. Агейкин Я.С. Прокладимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
 5. Ларин В.В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. М., 2007. 530 с.
 6. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 997–1004.
 7. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. P. 012030. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012030>.
 8. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 1005–1012.
 9. Лухминский В.А. Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 20 с.
 10. Saari lahti M. Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact – Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors // Soil interaction model, Appendix Report. Helsinki, 2002. № 5. P. 1–43.
 11. Khitrov E.G., Andronov A.V., Martynov B.G., Spiridonov S.V. Interrelations of various soil types mechanical properties // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. P. 012032. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012032>.
 12. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Linking the deformation moduli and cone indices of forest and peatland soils // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 297–304.
 13. Li J., Huang H., Wang Y., Tian L., Ren L. Development on research of soft-terrain machine systems // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2015. № 46. P. 306–320.
 14. Wong J.Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour off-road vehicle performance and design // Elsevier second ed, 2010. 488 p.
 15. Wong J.Y. Theory of ground vehicles // John Wiley and Sons, New Jersey, fourth edition, 2008. 528 p.
 16. Williams R.C., Prowell B. Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results with WES Track Performance // Transportation Research Record, 1990. P. 121–128.
 17. Senneset K., Janbu N., Svano G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests // Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT-II, Amsterdam, 1982. P. 863–870.
 18. Van Impe W.F. The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar, Filed instrumentation and in-site measurements, Singapore, 1986. P. 51–70.
 19. Rohani B., Baladi G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil // U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. 41 p.
 20. Bengough A.G., Campbell D.J., O'Sullivan M.F., Smith K.A., Mullins C.E. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth // Soil and Environmental Analysis (2nd ed.), Marcel Dekker, New York, 2001. P. 377–403.
 21. Porsinsky T., Pentek T., Bosner A., Stankic I. Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils // In Global Perspectives on Sustainable Forest Management. Okia, C.A., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 2012. P. 69–69.
 22. Bozhbov V.E. Improving the efficiency of the skidding process by justifying the travel load of forwarders: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. Arhangel'sk: S(A)FU, 2015. 20 p.
 23. Ustinov V.V. Evaluation of traction properties of wheel drives of forest vehicles by methods of the theory of off-road traffic: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. Arhangel'sk: S(A)FU, 2016. 20 p.
 24. Agejkin YA.S. Permeability of cars. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
 25. Larin V.V. Methods for predicting and increasing the reference passability of multi-axis wheeled vehicles on the ground: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03. М., 2007. 530 p.
 26. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 997–1004.
 27. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. P. 012030. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012030>.
 28. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 1005–1012.
 29. Luhminskij V.A. Improving models and methods for predicting the cross-country performance of tracked forest vehicles: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. Arhangel'sk: S(A)FU, 2018. 20 p.
 30. Saari lahti M. Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact – Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors // Soil interaction model, Appendix Report. Helsinki, 2002. № 5. P. 1–43.
 31. Khitrov E.G., Andronov A.V., Martynov B.G., Spiridonov S.V. Interrelations of various soil types mechanical properties // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. P. 012032. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012032>.
 32. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Linking the deformation moduli and cone indices of forest and peatland soils // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 297–304.
 33. Li J., Huang H., Wang Y., Tian L., Ren L. Development on research of soft-terrain machine systems // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2015. № 46. P. 306–320.
 34. Wong J.Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour off-road vehicle performance and design // Elsevier second ed, 2010. 488 p.
 35. Wong J.Y. Theory of ground vehicles // John Wiley and Sons, New Jersey, fourth edition, 2008. 528 p.
 36. Williams R.C., Prowell B. Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results with WES Track Performance // Transportation Research Record, 1990. P. 121–128.
 37. Senneset K., Janbu N., Svano G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests // Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT-II, Amsterdam, 1982. P. 863–870.
 38. Van Impe W.F. The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar, Filed instrumentation and in-site measurements, Singapore, 1986. P. 51–70.

References

1. Porsinsky T., Pentek T., Bosner A., Stankic I. Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils // In Global Perspec-

19. Rohani B., Baladi G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil // U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. 41 p.
20. Bengough A.G., Campbell D.J., O'Sullivan M.F., Smith K.A., Mullins C.E. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth // Soil and Environmental Analysis (2nd ed.), Marcel Dekker, New York, 2001. P. 377–403.