

Расчет жесткости лесного грунта под воздействием колесного движителя

А.В. Андронов^{1а}, А.А. Егорин^{1б}, С.С. Петросян^{1с}, М.В. Степанищева^{2д}, Ю.М. Елизаров^{2е}

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

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

^а andronovalexandr@gmail.com, ^б lesbisnes@mail.ru, ^с petrosyan1974@yandex.ru,

^д marina01031977@inbox.ru, ^е transportgruz@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-8246-3583>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-5493-1092>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>,

^е <https://orcid.org/0000-0002-0565-1641>

Статья поступила 17.01.2022, принята 10.02.2022

Воздействие движителей лесных машин на грунт имеет сложный характер и обусловлено не только непосредственно движением машин по опорной поверхности, но и динамическими нагрузками. Динамические нагрузки возникают, например, при встрече движущегося трактора с препятствием либо при обработке деревьев, движущихся в захвате с переменной скоростью. Для реализации математических моделей, раскрывающих отмеченные эффекты, необходимо установить значения параметров, характеризующих деформативные свойства грунта, находящегося под воздействием движителя. Модели, апробированные ранее, используют расчетные схемы, предполагающие описание грунта как упруго-вязко-пластического тела, составленного из нескольких элементов с различными параметрами. При этом упругие элементы характеризуются жесткостями. К сожалению, сведения о жесткости грунтов, находящихся под воздействием колесных движителей, до настоящего времени представлены в научной и профессиональной литературе скорее фрагментарно. Цель нашей работы — предложить подход к определению и зависимостям, предназначенным для количественного определения жесткости лесного грунта по его физико-механическим свойствам и параметрам движителя. Теоретическую основу исследования составляет математическая модель вдавливания штампа-движителя в деформируемый массив грунта. Для получения практических зависимостей проведен вычислительный эксперимент. В результате расчетов получены зависимости, которые не противоречат данным, полученным ранее, и позволяют рассчитать жесткость грунта с использованием значений его физико-механических свойств, определяемых по стандартизованным методикам.

Ключевые слова: лесной грунт; харвестер; форвардер; скиддер; уплотнение; сжатие; динамика.

Evaluation of forest soil stiffness under influence of a wheeled forestry vehicle

A.V. Andronov^{1а}, A.A. Egorin^{1б}, S.S. Petrosian^{1с}, M.V. Stepanischeva^{2д}, Yu.M. Elizarov^{2е}

¹ St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

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

^а andronovalexandr@gmail.com, ^б lesbisnes@mail.ru, ^с petrosyan1974@yandex.ru,

^д marina01031977@inbox.ru, ^е transportgruz@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-8246-3583>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-5493-1092>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>,

^е <https://orcid.org/0000-0002-0565-1641>

Received 17.01.2022, accepted 10.02.2022

The impact of forestry vehicles on the ground is complex. It is caused not only by the movement of machines on the bearing surface, but also by the dynamic loads. Dynamic loads arise, for example, when a moving tractor encounters an obstacle, or when processing trees moving in the grapple at a variable speed. To implement mathematical models that reveal the noted effects, it is necessary to establish the values of the parameters characterizing the deformative properties of the soil under the influence of the vehicle. The models tested earlier use design schemes that describe the soil as an elastic-viscous-plastic body composed of several elements with different parameters. In this case, the elastic elements are characterized by the stiffness. Unfortunately, information on the stiffness of soils under the influence of wheeled forestry vehicles has been presented in the scientific and professional literature rather fragmentarily. The purpose of this work is to propose an approach to the definition and dependencies designed to quantify the stiffness of forest soil by its physical and mechanical properties and propeller parameters. The theoretical basis of the study is a mathematical model of indentation of a driving stamp into a deformable soil mass. To obtain practical dependencies, a computational experiment is carried out. As a result

of the calculations, dependences are obtained that do not contradict the data obtained earlier and allow calculating the stiffness of the soil using the values of its physical and mechanical properties determined by standardized methods.

Keywords: forest soil; harvester; forwarder; skidder; compaction; compression; dynamics.

Введение. Современные колесные лесные машины, в частности, харвестеры, форвардеры и скиддеры, широко используются в отечественной практике заготовки древесины. Приобретая такую дорогостоящую технику, лесозаготовители ориентируются на достижение высоких технико-экономических показателей лесосечных работ, неотъемлемой частью которых становится экологичность [1–4]. Важно отметить, что воздействие движителей лесных машин на грунт имеет сложный характер [4–6] и обусловлено не только непосредственно движением машин по опорной поверхности, но и динамическими нагрузками. Динамические нагрузки возникают, например, при встрече движущегося трактора с препятствием либо при обработке деревьев, движущихся в захвате с переменной скоростью.

Для реализации математических моделей, раскрывающих отмеченные эффекты, необходимо установить значения параметров, характеризующих деформативные свойства грунта, находящегося под воздействием движителя [1; 7–9]. Модели, апробированные ранее, используют расчетные схемы, предполагающие описание грунта как упруго-вязко-пластического тела [1; 6; 9], составленного из нескольких элементов с различными параметрами. При этом упругие элементы характеризуются жесткостями.

К сожалению, сведения о жесткости грунтов, находящихся под воздействием колесных движителей, до настоящего времени представлены в научной и профессиональной литературе скорее фрагментарно.

Цель нашей работы — предложить подход к определению и зависимостям, предназначенным для количественного определения жесткости лесного грунта по его физико-механическим свойствам и параметрам движителя.

Методы исследования. Теоретическую основу исследования составляет математическая модель вдавливания штампа-движителя в деформируемый массив грунта [1; 8; 9]. Для получения практических зависимостей проведен вычислительный эксперимент.

Результаты исследования и заключение. По физическому смыслу жесткость связывает силу, приложенную к элементу модели, с его абсолютной упругой деформацией сжатия (растяжения):

$$C_{гр} = \frac{P}{z}, \quad (1)$$

где P — сила; z — абсолютная деформация элемента модели.

Рассмотрим несколько подходов к определению $C_{гр}$. Простейший способ — рассмотреть одноосное сжатие идеально упругого тела. Использование известного соотношения для относительной деформации:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0}, \quad (2)$$

где σ — нормальное напряжение; E_0 — модуль упругости с учетом:

$$\varepsilon = \frac{z}{H}, \sigma = \frac{P}{A}, \quad (3)$$

где H — толщина деформируемого слоя грунта; A — площадь пятна контакта движителя с грунтом, что приводит к следующей оценке:

$$C_{гр} = \frac{E_0 A}{H}. \quad (4)$$

Накоплены научные сведения по экспериментальному определению модуля упругости различных типов грунта при сжатии [1; 10–12]; площадь A сравнительно легко определяется экспериментально либо оценивается теоретически [1; 13; 14]. Но формула (4) не учитывает соотношение сторон пятна контакта. Кроме того, связь деформации грунта и силы, действующей на него, не всегда близка к линейной.

Известны эмпирические формулы для расчета условной жесткости грунта, находящегося под воздействием колесного движителя [15]:

$$C_{гр} = \xi \sqrt{\frac{G_k D_{ш} B^2}{(1 + p_{ш}) k^2}}, \quad (5)$$

где G_k — вертикальная нагрузка на шину; $D_{ш}$ — диаметр шины; B — ширина шины; $p_{ш}$ — давление в шине; ξ — коэффициент, зависящий от рисунка протектора шины; k — коэффициент, зависящий от свойств грунта.

До настоящего времени отмеченное явление не получило должного освещения в научной и профессиональной литературе, что обуславливает актуальность дальнейших исследований в указанном направлении.

Ориентировочные значения коэффициента k приведены в таблице.

Таблица. Значения коэффициента k для некоторых типов грунта

Тип грунта	Песок влажный	Песок сухой	Болотистый грунт	Снег
$k, м^3/МН$	0,13–0,14	0,34–0,36	0,82–1,02	0,22–0,55

Источник: [15]

Например, для случая воздействия колесного движителя при $B = 0,7$ м, $D_{ш} = 1,333$ м, $p_{ш} = 0,35$ МПа, $k = 0,92$ м³/МН по формуле (5) получим оценку условной жесткости грунта, представленную на рис. 1.

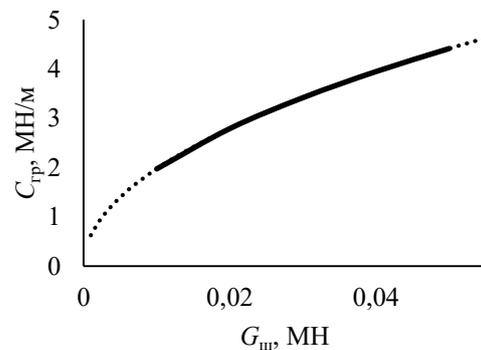


Рис. 1. Оценка жесткости болотистого грунта под воздействием колесного движителя. Источник: [15]

Формула (5) позволяет учесть параметры пятна контакта, зависящие от $B, D_{ш}$, нагрузку на шину $G_{ш}$ и, в определенной степени, свойств грунта (параметр k). Отметим, что по (5) жесткость грунта изменяется в зависимости от $G_{ш}$, что отражает нелинейность связи воздействующей силы и деформации грунта. К сожалению, не ясна методика определения параметра k , что, на наш взгляд, сужает область применения формул.

Ранее для расчета параметров колесобразования и уплотнения грунтов модели успешно использованы данные, основанные на решении задачи о вдавливании штампа в деформируемую среду [1; 8; 9; 16]. Модели позволяют достаточно точно оценить показатели взаимодействия штампов-двигателей с массивом грунта с учетом его физико-механических свойств, определяемых по стандартизованным методикам, нагрузке и параметрам пятна контакта.

Как было отмечено, жесткости характеризуют упругие элементы модели, в связи с чем рассмотрим подход, адаптированный под оценку обратимой составляющей глубины колеи. В этом случае в известном выражении для глубины колеи [1; 8; 9; 16]:

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{KJpab}{\sqrt{1-KJp}} \arctg \frac{H-h}{ab\sqrt{1-KJp}}, \quad (6)$$

где p_s — несущая способность грунта; K — параметр, определяющийся реологической моделью грунта; J — коэффициент, учитывающий соотношение сторон пятна контакта; p — среднее давление движителя по пятну контакта; b — средняя ширина пятна контакта. Следует принять [1; 8; 9; 16]:

$$\frac{p_s}{p_s - p} = 1, \quad (7)$$

$$K = \frac{1}{E_0}, \quad (8)$$

$$h = z, \quad (9)$$

тогда:

$$z = \frac{Jpab}{E_0 \sqrt{1-\frac{Jp}{E_0}}} \arctg \frac{H-h}{ab \sqrt{1-\frac{Jp}{E_0}}} \quad (10)$$

Формулы для J, a, p [1; 8; 9; 16; 17]:

$$J = \frac{0,03 + \frac{1}{b}}{0,6 + 0,43 \frac{l}{b}}, \quad (11)$$

$$a = \frac{0,64H + b}{H}, \quad (12)$$

$$p = \frac{G_{ш}}{bl}, \quad (13)$$

Выражения для сторон пятна контакта получены и апробированы ранее. Для колесного движителя [2; 11; 18–20]:

$$\begin{cases} b = B_{ш} \\ l = \sqrt{D_{ш}z_{ш} - z_{ш}^2} + \sqrt{D_{ш}(z + z_{ш}) - (z + z_{ш})^2}, \quad (14) \\ z_{ш} = 0,069B_{ш}^{0,38}G_{ш}^{0,66}D_{ш}^{-0,4}H_{ш}^{-0,061}p_{ш}^{-0,64}z^{-0,21}, \end{cases}$$

где $z_{ш}$ — осевая деформация сжатия шины; $H_{ш}$ — высота профиля шины.

После определения z найдем жесткость грунта по формуле (1) при $P = G_{ш}$.

Обратим внимание, что численное решение уравнения (6) не вызывает затруднений при использовании специализированных программ. Тем более не вызывает сложностей решение более простого уравнения (10), полученного с учетом условий (7)–(9).

Реализация математической модели динамики взаимодействия машины с грунтом в целом, в свою очередь, предполагает решение системы нелинейных дифференциальных уравнений. С точки зрения проведения последующих расчетов, удобнее получить зависимость для жесткости $C_{гр}$, позволяющую прямо, без итераций, определить ее величину.

Проведем вычислительный эксперимент — рассчитаем $C_{гр}$ при варьировании $E_0, B_{ш}, D_{ш}, H_{ш}, p_{ш}, G_{ш}$. В результате обработки расчетных данных получим функцию $C_{гр}(E_0, B_{ш}, D_{ш}, H_{ш}, p_{ш}, G_{ш})$. При помощи метода наименьших квадратов получено уравнение:

$$C_{гр} = 1,9E_0^{1,4}B_{ш}^{1,6}D_{ш}^{0,13}p_{ш}^{-0,10}G_{ш}^{0,090}, \quad (15)$$

параметр $H_{ш}$ статистически не значим.

В формуле (15): $0,4 \text{ МПа} \leq E_0 \leq 3 \text{ МПа}$, $0,5 \text{ м} \leq B_{ш} \leq 0,8 \text{ м}$, $1,2 \text{ м} \leq D_{ш} \leq 1,8 \text{ м}$, $0,15 \text{ МПа} \leq p_{ш} \leq 0,55 \text{ МПа}$, $0,005 \text{ МН} \leq G_{ш} \leq 0,05 \text{ МН}$.

Более простую формулу получим с учетом связи $p, D_{ш}, B_{ш}, G_{ш}, p_{ш}$. Аппроксимация тех же расчетных данных приводит к получению следующей функции:

$$C_{гр} = 0,27E_0^{1,4}p^{-0,42}. \quad (16)$$

Для наглядности на рис. 2 приведем пример результатов расчетов жесткости заболоченного грунта ($E_0 = 3 \text{ МПа}$ [1; 11; 21], прочие параметры те же, что и на рис. 1) по предлагаемой зависимости (15).

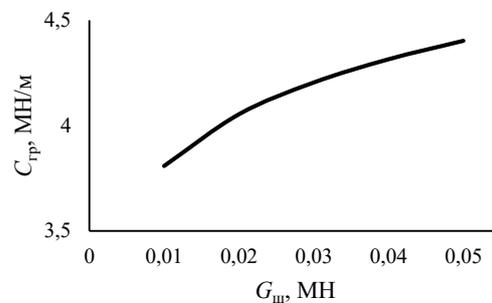


Рис. 2. Предлагаемая оценка жесткости болотистого грунта под воздействием колесного движителя

Заметим, что при нагрузке на колесо в пределах, характерных для современных лесных машин, результаты расчетов по формуле (15) не противоречат данным, полученным ранее. Кроме того, предлагаемая зависимость позволяет рассчитать жесткость грунта с использованием значений его физико-механических свойств, определяемым по стандартизованным методикам.

Авторский вклад. А.В. Андронов: идея исследования, анализ данных (45 %); А.А. Егорин: идея исследования, сбор и анализ данных (20 %); С.С. Петросян: проведение расчетов (15 %); М.В. Степанищева: анализ данных (10 %), Ю.М. Елизаров: анализ данных (10 %).

Литература

1. Хитров Е.Г., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Исследование взаимосвязей свойств почвогрунтов как опорных поверхностей движения лесных машин // *Resources and Technology*. 2020. V. 17. № 2. P. 45-79.
2. Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В., Ильюшенко Д.А., Пушков Ю.Л. О сопоставлении среднего и номинального давления движителя лесной машины на почвогрунт // *Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад.* 2019. № 229. С. 185-195.
3. Хитров Е.Г., Котенев Е.В. Сравнение показателей взаимодействия с грунтом и проходимости колесных и колесно-гусеничных движителей // *Resources and Technology*. 2019. V. 16. № 4. P. 1-24.
4. Khitrov E., Andronov A., Bogatova E., Kotenev E. Development of recommendations on environmental certification of forestry machinery drives // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 689-696.
5. Хитров Е.Г., Песков В.Б., Казаков Д.П., Божбов В.Е., Степанисчева М.В. Метод решения задачи о вдавлении штампа-двигателя в неоднородный массив грунта // *Системы. Методы. Технологии*. 2018. № 2 (38). С. 116-120.
6. Хитров Е.Г. Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт // *Resources and Technology*. 2019. V. 16. № 4. P. 76-93.
7. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 997-1004.
8. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
9. Хитров Е.Г., Бартенев И.М. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах // *Лесотехнический журнал*. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 233-239.
10. Khitrov E.G., Andronov A.V. Bearing floatation of forest machines (theoretical calculation) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 108, Development, Research, Certification. Ser. «108th International Scientific and Technical Conference of the Association of Automotive Engineers «Intelligent Car Systems: Development, Research, Certification», 2019. P. 012020.
11. Khitrov E.G., Andronov A.V. Comparison of the forest machine mover average and nominal pressure on the soil // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 108, Development, Research, Certification. Ser. «108th International Scientific and Technical Conference of the Association of Automotive Engineers «Intelligent Car Systems: Development, Research, Certification», 2019. P. 012021.
12. Khitrov E.G., Andronov A.V., Martynov B.G., Spiridonov S.V. Interrelations of various soil types mechanical properties // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. P. 012032.
13. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine mover and consolidating soil // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. P. 012030.
14. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 1005-1012.
15. Александров В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин. М.: Экология, 1995. 256 с.
16. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Дмитриева М.Н., Песков В.Б., Григорьева О.И. Уточненная модель для оценки тягово-сцепных свойств колесного движителя лесной машины // *Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад.* 2016. № 217. С. 108-119.
17. Хитров Е.Г., Бартенев И.М. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колесного движителя // *Лесотехнический журнал*. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 225-232.
18. Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Макуев В.А., Хахина А.М., Калинин С.Ю. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учетом деформации почвогрунта // *Вестн. Московского гос. ун-та леса. Лесной вестник*. 2015. Т. 19. № 6. С. 87-90.
19. Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 649-656.
20. Khitrov E.G., Iliushenko D.A., Kalistratov A.V. Deviation of resulting load of forestry vehicle from the normal to the bearing surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation «Actual Issues of Transport in the Forest Sector», 2020. P. 012015.
21. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Linking the deformation moduli and cone indices of forest and peatland soils // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 297-304.

References

1. Hitrov E.G., Prosuzhikh A.A., Rudov S.E., Kunicckaya O.A., Grigor'ev I.V. Study of the relationship between the properties of soils as supporting surfaces for the movement of forest machines // *Resources and Technology*. 2020. V. 17. № 2. P. 45-79.
2. Hitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., Ilyushenko D.A., Pushkov YU.L. On the comparison of the average and nominal pressure of the propulsion machine of the forest machine on the soil // *Izvestia SPbLTA*. 2019. № 229. P. 185-195.
3. Hitrov E.G., Kotenev E.V. Comparison of indicators of interaction with the ground and patency of wheeled and wheeled-caterpillar movers // *Resources and Technology*. 2019. V. 16. № 4. P. 1-24.
4. Khitrov E., Andronov A., Bogatova E., Kotenev E. Development of recommendations on environmental certification of forestry machinery drives // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 689-696.
5. Hitrov E.G., Peskov V.B., Kazakov D.P., Bozhbov V.E., Stepanishcheva M.V. Method for solving the problem of indentation of a driving stamp into an inhomogeneous soil mass // *Systems. Methods. Technologies*. 2018. № 2 (38). P. 116-120.
6. Hitrov E.G. Analysis of the components of the depth of the track formed under the influence of the mover of the forest machine on the soil // *Resources and Technology*. 2019. V. 16. № 4. P. 76-93.
7. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 997-1004.
8. Agejkin YA.S. Vehicle patency. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
9. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Calculation of the track depth of the wheel mover of forest tractors on slopes // *Forestry Engineering Journal*. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 233-239.
10. Khitrov E.G., Andronov A.V. Bearing floatation of forest machines (theoretical calculation) // IOP Conference Series:

- Materials Science and Engineering. 108, Development, Research, Certification. Ser. «108th International Scientific and Technical Conference of the Association of Automotive Engineers «Intelligent Car Systems: Development, Research, Certification», 2019. P. 012020.
11. Khitrov E.G., Andronov A.V. Comparison of the forest machine mover average and nominal pressure on the soil // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 108, Development, Research, Certification. Ser. «108th International Scientific and Technical Conference of the Association of Automotive Engineers «Intelligent Car Systems: Development, Research, Certification», 2019. P. 012021.
 12. Khitrov E.G., Andronov A.V., Martynov B.G., Spiridonov S.V. Interrelations of various soil types mechanical properties // Journal of Physics: Conference Series. 2019. P. 012032.
 13. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine mover and consolidating soil // Journal of Physics: Conference Series. 2019. P. 012030.
 14. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 1005-1012.
 15. Aleksandrov V.A. Modeling of technological processes of forest machines. M.: Ekologiya, 1995. 256 p.
 16. Hitrov E.G., Hahina A.M., Dmitrieva M.N., Peskov V.B., Grigor'eva O.I. Refined model for evaluating the traction and coupling properties of a wheeled propulsion machine of a forest machine // Izvestia SPbLTA. 2016. № 217. P. 108-119.
 17. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Influence of the angle of the transverse inclination of the rolling surface on the traction-coupling properties of the wheel mover // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 225-232.
 18. Hitrov E.G., Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Hahina A.M., Kalinin S.YU. Model for assessing the radial deformation of the forest machine wheel, taking into account the deformation of the soil // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2015. V. 19. № 6. P. 87-90.
 19. Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 649-656.
 20. Khitrov E.G., Iliushenko D.A., Kalistratov A.V. Deviation of resulting load of forestry vehicle from the normal to the bearing surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation «Actual Issues of Transport in the Forest Sector», 2020. P. 012015.
 21. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Linking the deformation moduli and cone indices of forest and peatland soils // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 297-304.