

DOI: 10.15393/j2.art.2025.7843

УДК 630*36

Статья

Теоретическое обоснование тягово-сцепных свойств гусеничного движителя лесной машины для условий многолетней мерзлоты

Дьяченко Владимир Михайлович

соискатель, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (Российская Федерация), Volodya.Dyachenko1986@mail.ru

Должиков Илья Сергеевич

кандидат технических наук, ассистент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), idolzhikov222@mail.ru

Хитров Егор Германович

доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Российская Федерация), yegorkhitrov@gmail.com

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola07@mail.ru

Барышникова Елена Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А. К. Кортунова (Российская Федерация), barsoft@mail.ru

Анисимов Евсей Евсеевич

кандидат технических наук, старший преподаватель, Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова (Российская Федерация), evsei_mexx@mail.ru

Получена: 2 апреля 2024 / Принята: 15 января 2025 / Опубликовано: 19 января 2025

Аннотация: В статье последовательно решены следующие задачи исследования: обоснование параметров движителей, выполненное с учётом критериев проходимости и экологичности. Показано, что ограничение степени воздействия движителя лесной машины по глубине колеи, как правило, целесообразно и с точки зрения проходимости машины, поскольку при большой глубине колеи отмечается потеря несущей способности и сцепления движителя с опорной

поверхностью. Для случая работы лесных машин в условиях чувствительных почв многолетней мерзлоты обычная формулировка допустимой глубины колеи в большей части случаев неприемлема, поскольку глубина колеи должна быть ограничена существенно меньшим, нежели обычно, значением, максимум до 5 см. В статье показано, что в оценке глубины колеи следует различить непосредственно уплотнение и сдвиг-срез слоёв почвы, поскольку для почв на многолетней мерзлоте принципиально важно не допустить минерализации и переуплотнения верхних слоёв, взаимодействующих с движителем на начальном этапе формирования колеи. Как правило, в лесоинженерном деле рассматривается взаимодействие движителей машин с лесными почвогрунтами, для которых уже получен значительный объём экспериментальных данных по физико-механическим свойствам. Для почв на многолетней мерзлоте имеющиеся научные сведения о физико-механических свойствах достаточно ограничены. Важно учитывать сложные условия и транспортную доступность региона, затрудняющие сбор экспериментальных данных. Доказано, что при обосновании параметров рекомендуемой техники критически важно учитывать не только сохранение почвы. Достаточно остро в условиях региона встают вопросы топливной экономичности машин, в связи с чем требуется проводить расчёт расхода топлива при движении машины, связанный с учётом образования колеи.

Ключевые слова: леса на вечной мерзлоте; гусеничные лесные машины; почвогрунты; образование колеи; расход топлива

DOI: 10.15393/j2.art.2025.7843

Article

Theoretical substantiation of the crawler unit traction properties of a forest in permafrost conditions

Vladimir Dyachenko

Ph. D. student, Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design (Russian Federation), Volodya.Dyachenko1986@mail.ru

Ilya Dolzhikov

Ph. D. in engineering, assistant professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), idolzhikov222@mail.ru

Egor Khitrov

D. Sc. in engineering, associate professor, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com

Olga Kunitskaya

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola07@mail.ru

Elena Baryshnikova

Ph. D. in engineering, associate professor, Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A. K. Kortunov (Russian Federation), barsoft@mail.ru

Evsei Anisimov

Ph. D. in engineering, senior lecturer, Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov (Russian Federation), evsei_mexx@mail.ru

Received: 2 April 2024 / Accepted: 15 January 2025 / Published: 19 January 2025

Abstract: In the article the authors substantiate crawler unit parameters by taking into account the criteria of cross-country ability and environmental friendliness. It is shown that limiting the degree of a crawler unit impact of a forest machine by the depth of the track is, as a rule, advisable from the point of view of the machine's cross-country ability, since at a large depth of the track there is a loss of bearing capacity and adhesion of the crawler unit to the support surface. For the case of forest machinery operation in conditions of sensitive permafrost soils, the usual formulation of the permissible track depth is unacceptable in most cases, since the track depth should be limited to a

significantly lower value than usual, up to a maximum of 5 cm. The article shows that in assessing the depth of the track, it is necessary to distinguish directly between compaction and shear-cutting of soil layers, since it is fundamentally important for soils on permafrost to prevent mineralization and over-compaction of the upper layers interacting with the crawler unit at the initial stage of track formation. As a rule, in forest engineering, the interaction of a machine crawler unit with forest soil is considered, for which a significant amount of experimental data on physical and mechanical properties has already been obtained. However, for permafrost soils, the available scientific information on the physical and mechanical properties is quite limited. It is important to take into account the difficult conditions and transport accessibility of the region, which make it difficult to collect experimental data. It is proved that when justifying the parameters of the recommended equipment it is critically important to take into account not only soil conservation. The issues of forest machine fuel efficiency are quite acute in the conditions of the region, and therefore it is necessary to calculate fuel consumption of a forest machine taking into account the formation of a track.

Keywords: permafrost forests; tracked forest vehicles; soils; track formation; fuel consumption

1. Введение

В приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 23 от 17.01.2022 г. «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки» сказано: «Разработка лесосек в лесах, произрастающих на многолетне-мерзлотных почвах, должна вестись в зимний период при промёрзшем верхнем слое почвы. При проведении рубок в данных природно-климатических условиях повреждение почвы с минерализацией её поверхности не допускается».

Безусловно, данное нормативное требование является экологически обоснованным, поскольку леса на вечной мерзлоте обладают своими уникальными особенностями и относятся к одним из наиболее экологически чувствительных к антропогенному воздействию [1—6]. Но, как известно, лесные машины выполняют не только операции лесосечных работ, они широко задействуются на лесовосстановительных работах, уходах за лесами, операциях по предупреждению и борьбе с лесными пожарами [7—12].

Вместе с тем каких-либо ограничительных требований по воздействию лесных машин на почвы в лесах на многолетней мерзлоте нет ни в приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 534 от 30.07.2020 г. «Об утверждении Правил ухода за лесами», ни в постановлении Правительства Российской Федерации № 1614 от 07.10.2020 г. «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах», ни в приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 1024 от 29.12.2021 г. «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления».

Причём очевидно, что лесовосстановительные работы, как и работы лесопожарные, проводятся исключительно в тёплый период года, когда верхний слой почвогрунта находится в непромёрзшем состоянии [13—19]. Следовательно, полностью выполнить требование приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 23 от 17.01.2022 г. о недопустимости повреждения почвы на многолетней мерзлоте с её минерализацией невозможно в данных условиях в принципе. Тем более что на прокладке минерализованных полос, расчистке вырубков и гарей под искусственное лесовосстановление в лесах криолитозоны используется такая же техника, как и в других регионах России, например, известная «рабочая лошадка» — гусеничный трактор ДТ-75 [20—25]. После даже одного его прохода по слою сезонно-талой мерзлоты образуется достаточно глубокая колея, зависящая как от влажности почвогрунта, так и от нагрузки трактора, выполняемой им операции и технологического оборудования — плуг для прокладки минерализованной полосы или отвал — для расчистки вырубки или гари. Образующая лесной машиной колея

является в дальнейшем очагом эрозии или карстового процесса, что существенно снижает лесовосстановительные способности лесной экосистемы криолитозоны [26—30].

Известно, что многолетняя мерзлота занимает площадь около 13 млн км² [31]. Большая часть области многолетней мерзлоты находится в зоне тайги. В Российской Федерации почти 66 % криолитозоны входит в пояс хвойных лесов, 2,5 % приходится на лесотундру, 1,5 % — на лесостепь и около 30 % территории — на открытые тундровые пространства [32]. Причём и в лесотундре, и в лесостепи лесные машины, в большей части случаев гусеничные, также периодически используют.

В связи со сказанным выше становится очевидным, что обоснование тягово-сцепных свойств гусеничного движителя лесной машины для условий многолетней мерзлоты является актуальной задачей.

2. Материалы и методы

Для достижения поставленной цели работы решим ряд задач, требующих развития и уточнения теории движения лесных машин в условиях бездорожья. Связано это со следующими обстоятельствами:

- Обоснование параметров движителей проводится с учётом критериев проходимости и экологичности. Последний зачастую формулируется следующим образом: глубина колеи после однократного прохода машины по лесному участку не должна превышать 20 см [33—35]. Показано, что такое ограничение, как правило, целесообразно и с точки зрения проходимости машины, поскольку при большей глубине колеи отмечается потеря несущей способности и сцепления движителя с опорной поверхностью. Однако в случае работы машин в условиях чувствительных почв на вечной мерзлоте такая формулировка неприемлема, поскольку глубина колеи должна быть ограничена существенно меньшим значением, находящимся в пределах 5 см [36].

- В оценке глубины колеи следует различить непосредственно уплотнение и сдвиг-срез слоёв почвы, поскольку для почв на многолетней мерзлоте принципиально важно не допустить переуплотнения верхних слоёв, взаимодействующих с движителем на начальном этапе формирования колеи [37], [38].

- Как правило, в лесоинженерном деле рассматривается взаимодействие движителей машин с лесными почвогрунтами, для которых уже получен значительный объём экспериментальных данных по физико-механическим свойствам [33—35]. Для почв на вечной мерзлоте имеющиеся научные сведения о физико-механических свойствах ограничены. Важно учитывать сложные условия и транспортную доступность региона, затрудняющие сбор экспериментальных данных [39].

- Необходимо подчеркнуть, что при обосновании параметров рекомендуемой техники критически важно учитывать не только сохранение почвы. Остро в условиях региона встают вопросы топливной экономичности машин [40—44], в связи с чем требуется провести расчёт расхода топлива при движении машины, связанный с учётом образования колеи.

3. Результаты

3.1. Оценка свойств опорной поверхности

Апробированные математические модели для расчёта показателей взаимодействия движителей лесных машин с почвами и грунтами используют в качестве основных физико-механических характеристик опорной поверхности модуль деформации E , удельное сцепление C , угол внутреннего трения φ и толщину (мощность) слоя H [45—48].

На настоящем этапе исследования при моделировании будем ориентироваться на сведения о физико-механических свойствах почв с моховым покровом, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства почв с моховым покровом (данные по [49])

Table 1. Physical and mechanical properties of soils with moss cover (data on [49])

Характеристика покрова	E , кПа	C , кПа	φ , °	$H_{\text{почв}}$, см
Сфагновые мхи без кустарника	260—290	5—8	12—14	33,5—38,5
Сфагновые мхи с кустарником	360—430	10—17	10—17	35—36
Гипновые мхи с кустарником	290—340	8—14	8—14	27—28

Было показано [33], [34], [49—53], что для лесных почвогрунтов, а также супесей, суглинков и глин присутствуют тесные корреляции характеристик сопротивления сдвигу C и φ , а также толщины $H_{\text{почв}}$ с модулем E . Наличие уравнений, позволяющих рассчитать C , φ , H при заданном значении E , заметно сокращает объём данных, необходимых для реализации математических моделей.

На рисунке 1 сопоставлены сведения, представленные таблице 1.

Аппроксимируем табличные зависимости линейными функциями модуля E , тогда

$$C = 65,677E - 11,231, \quad (1)$$

$$\varphi = 22,795E + 6,0157, \quad (2)$$

причём обе приближенные формулы отличаются высокими коэффициентами детерминации $R^2 > 0,8$.

Дополнительно сопоставим толщину слоя $H_{\text{почв}}$ и модуля E (рисунок 2).

В результате аппроксимации получим линейную функцию

$$H_{\text{почв}} = 15,459E + 27,924, \quad (3)$$

не отличающуюся высоким коэффициентом R^2 . Впрочем, по таблице 1 и рисунку 2 можем отметить, что $H_{\text{почв}}$ находится в пределах 30—40 см, что превосходит удвоенную ширину

пятна контакта b (на начальном этапе формирования колеи, в ходе которого происходит сжатие почвы, связанной с шириной трака гусеницы $b_{тр}$). Таким образом, при моделировании можем принять мощность сжимаемого слоя опорной поверхности по условию [49]:

$$H = \min\{H_{почв}; 2b\} = 2b \quad (4)$$

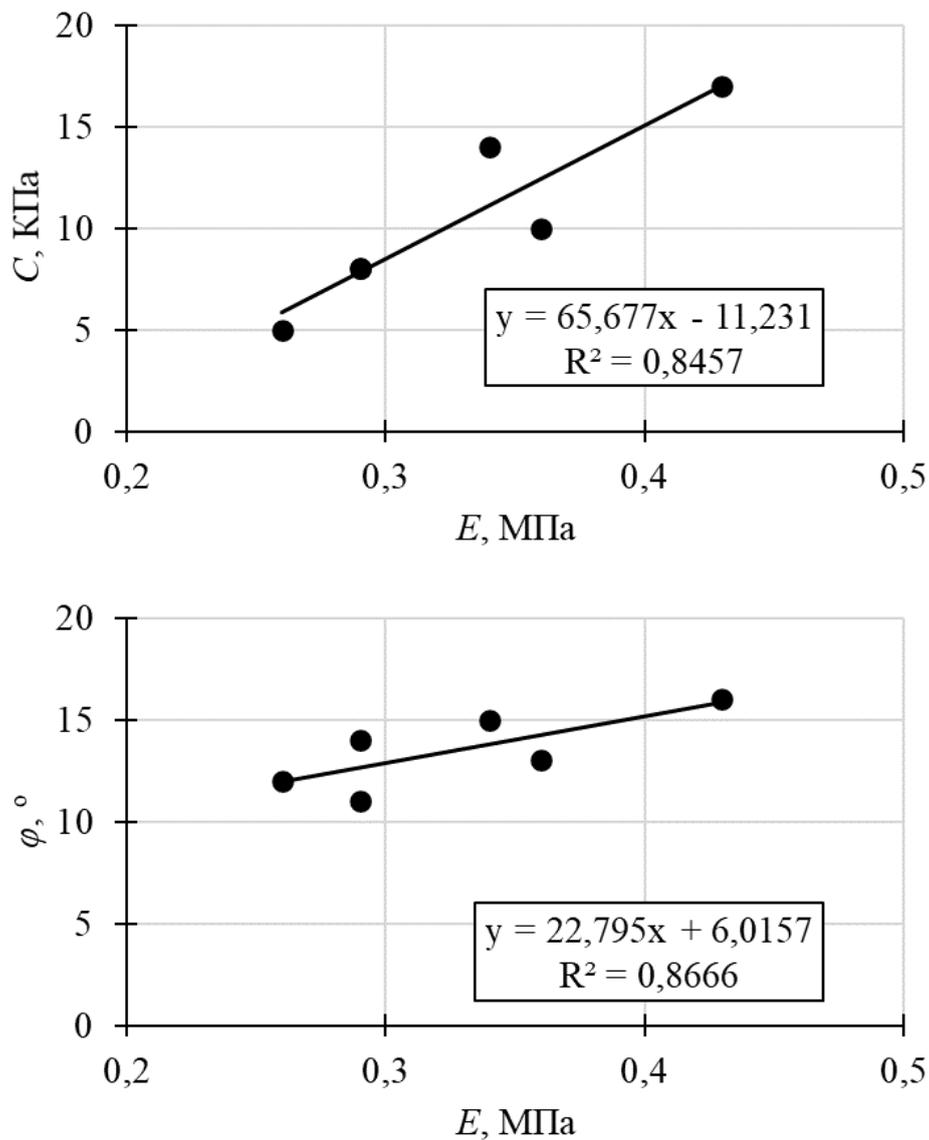


Рисунок 1. Иллюстрация табличных зависимостей удельного сцепления и угла внутреннего трения почв от модуля деформации [рисунок авторов]

Figure 1. Illustration of tabular dependences of the specific adhesion and the angle of internal friction of soils on the modulus of deformation

Уравнения (1), (2), (4) позволяют сократить объём полевых изысканий по сбору данных, характеризующих условия работы машины. При этом основной характеристикой опорной поверхности является модуль E . Однако методика определения модуля деформации E , связанная с компрессионными испытаниями [34], требует использования сложного оборудования и не вполне пригодна для быстрого составления почвенно-грунтовой карты условий работы в условиях лесов криолитозоны.

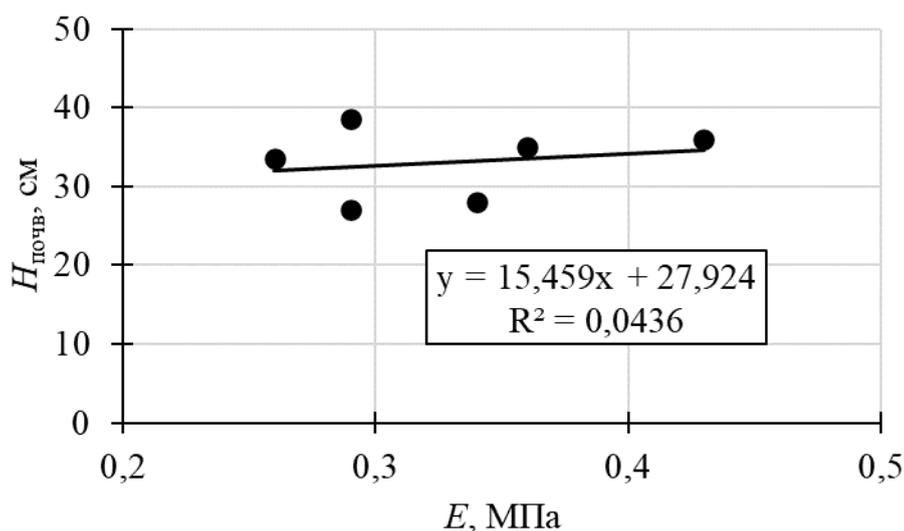


Рисунок 2. Иллюстрация табличной зависимости толщины покрова от модуля деформации [рисунок авторов]

Figure 2. Illustration of the tabular dependence of the thickness of the cover on the modulus of deformation

Для практики понадобится характеристика почвы, легко определяемая в полевых условиях и тесно связанная с модулем деформации E . В качестве такой характеристики, с учётом положительного опыта предыдущих исследователей, используем сопротивление вдавливанию стандартного конического зонда q_c . Приведём выражение для q_c согласно публикациям [33], [34], [54]:

$$q_c = -\frac{C}{\operatorname{tg} \varphi} + \theta \frac{24G^m(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi)(1 + \sin \varphi) \operatorname{tg} \alpha}{d^2 \gamma^2 (m-2)(m-3)(3 - \sin \varphi) \operatorname{tg}^3 \varphi} \quad (5)$$

где обозначено:

$$\theta = (C + (Z + L)\gamma \operatorname{tg} \varphi)^{3-m} (C + Z\gamma \operatorname{tg} \varphi)^{2-m} (C + (Z + 3L - Lm)\gamma \operatorname{tg} \varphi),$$

$$m = \frac{4 \sin \varphi}{3 + 3 \sin \varphi},$$

где α — угол заточки конуса (30°), L — высота конической части зонда (31 мм), d — диаметр основания конуса зонда (35,7 мм), Z — глубина вдавливания зонда (0,2 м) (параметры приведены согласно ГОСТу [55]), G — модуль сдвига, γ — удельный вес почвы.

Помимо значений C , φ в формуле (5) также используются значения модуля сдвига G и удельного веса почвы γ . С учётом того, что G , γ сравнительно слабо влияют на значение q_c [54], воспользуемся приближенными зависимостями [34], [49]:

$$G = 0,25C + 0,25, \quad (6)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168}. \quad (7)$$

Формулы (1), (2), (5)—(7) позволяют проанализировать связь q_c и E при заданных параметрах зонда. В результате расчёта q_c при варьировании E получим зависимость, проиллюстрированную на рисунке 3.

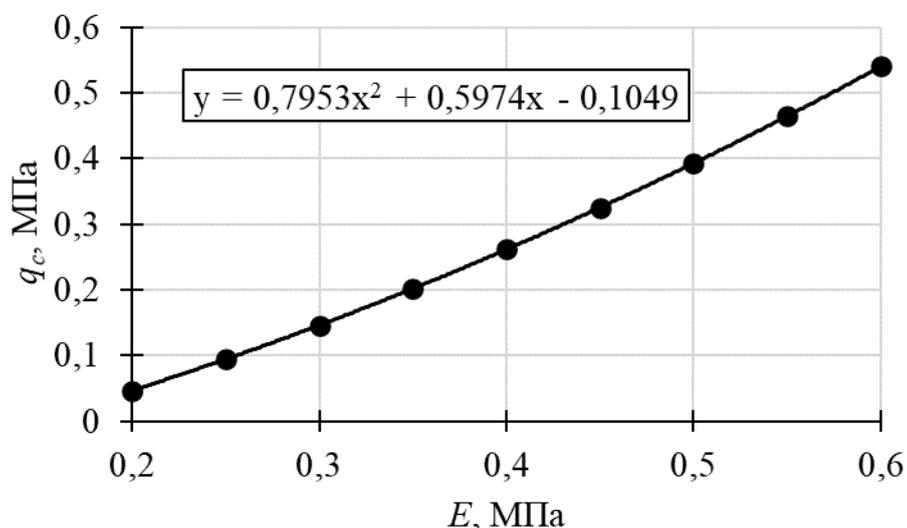


Рисунок 3. Сопоставление сопротивления вдавливанию зонда и модуля деформации (по расчётным данным) [рисунок авторов]

Figure 3. Comparison of the indentation resistance of the probe and the deformation modulus (according to calculated data)

Аппроксимация расчётных данных позволила получить следующее уравнение для почвы:

$$q_c = 0,7953E^2 + 0,5974E - 0,1049, \quad (8)$$

практически функционально точно описывающее полученные расчётные данные.

При помощи формулы (7) результаты моделирования будут проиллюстрированы относительно сопротивления зондированию q_c , легко определяемого в полевых условиях при помощи стандартизованного ручного прибора.

3.2. Теоретическая оценка допустимого воздействия гусеничного движителя на опорную поверхность

В качестве основы для наших разработок на теоретическом этапе исследований воспользуемся уравнениями для расчёта параметров процесса вдавливания штампа в деформируемое полупространство. Уравнения, основанные на положениях теории движения автомобиля в условиях бездорожья, изложенной в работах Я. С. Агейкина и его учеников [49], [50], прошли апробацию в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета и являются базовыми для математических моделей взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами [33], [34].

Деформация, вызванная воздействием движителя по нормали к опорной поверхности, связана с физико-механическими свойствами почвогрунта и геометрией пятна контакта формулой [33], [34], [49—53]

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{EJpab}{\sqrt{E^2 - E}p} \operatorname{arctg} \frac{E \cdot (H - h)}{ab\sqrt{E^2 - E}p}, \quad (9)$$

где p — среднее давление движителя по пятну контакта, J, a — коэффициенты, учитывающие геометрию пятна контакта, p_s — несущая способность почвогрунта.

Формулы для расчёта J, a следующие [49]:

$$J = \frac{0,03 + \frac{b}{l}}{0,43 + 0,6\frac{b}{l}}, a = 0,64 \cdot \left(1 + \frac{b}{H}\right), \quad (10)$$

расчёт p_s выполняется с учётом как физико-механических свойств, характеризующих сопротивление почвогрунта сдвигу, так и геометрии пятна контакта [33], [34], [49—53]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_s = p_{s,0} \alpha_z \\ p_{s,0} = 0,5J_1 N_1 b \gamma + N_2 \gamma h + J_3 N_3 C \\ J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b} \\ N_1 = \frac{1 - \text{III}^4}{\text{III}^5}, N_2 = \frac{1}{\text{III}^2}, N_3 = \frac{2 \cdot (1 + \text{III}^2)}{\text{III}^3}, \text{III} = \operatorname{tg} \frac{\pi - 2\varphi}{4} \\ \alpha_z = 1 + h \cdot \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} b \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right]}{2H \cdot \left(H - h - 0,25 \frac{\sqrt{2}}{2} b \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right] \right)} \end{array} \right. \quad (11)$$

Как было отмечено выше, при работе техники в условиях чувствительных почв на многолетней мерзлоте необходимо ограничивать не только суммарную глубину колеи, но и уплотнение верхнего слоя почвы. Поэтому для исследуемого случая критерий экологичности сформулируем следующим образом: суммарная глубина колеи и уплотнение почвы ограничены заданными допустимыми значениями.

Тогда для подбора параметров движителя потребуется решить следующие задачи:

▪ Рассмотреть уплотнение при постепенном вдавливании трака гусеницы в почву. На этом, начальном, этапе колееобразования (I) происходит формирование уплотнённого ядра в пределах слоя небольшой мощности [33], [34], [56], [57]. До настоящего времени уплотнение верхнего слоя почвы практически не рассматривалось и не получило удовлетворительного научного описания в рамках теории движения лесных машин.

▪ Рассчитать глубину колеи по мере дальнейшего развития деформации (II), когда уплотнённое ядро под воздействием движителя погружается в массив почвы и деформируются нижележащие слои [33], [34], [56—60]. Отмечается сдвиг слоёв почвы. При этом мощность деформируемого слоя существенно выше, чем на начальном этапе.

Общую глубину образующейся колеи будем рассматривать как сумму двух деформаций, отмеченных выше, развивающихся под воздействием движителя одновременно.

При моделировании в качестве исходных характеристик машины примем:

- общий вес машины w ,
- длину ленты гусеницы $L_{гл}$,
- ширину гусеницы B ,
- длину продольной проекции гусеницы на грунт L (продольная база),
- число трактов $n_{тр}$,
- шаг трактов $t_{тр}$.

Тогда для ширины b и длины l пятна контакта на первом (I) и втором (II) этапах примем следующие значения:

$$b_I = \min \left\{ t_{тр} - \frac{L_{гл}}{n_{тр}}; B \right\} = t_{тр} - \frac{L_{гл}}{n_{тр}}, l_I = B,$$
$$b_{II} = \min\{B; L\} = B, l_{II} = L,$$

для мощности слоя почвы H :

$$H_I = 2b_I = 2 \cdot \left(t_{тр} - \frac{L_{гл}}{n_{тр}} \right) < H_{почв},$$
$$H_{II} = 2B,$$

для площади пятен контакта A и давления p :

$$A_{II} = 2b_{II}l_{II} = 2BL, p_{II} = \frac{W}{2BL},$$

$$A_I = A_{II} \frac{b_I}{t_T} = 2BL \left(1 - \frac{L_{гг}}{t_{тр} n_{тр}} \right), p_I = \frac{W}{2BL \left(1 - \frac{L_{гг}}{t_{тр} n_{тр}} \right)}$$

Проиллюстрируем результаты расчёта. Будем ориентироваться на параметры уже упомянутого гусеничного трактора ДТ-75, хорошо зарекомендовавшего себя при разработке сельскохозяйственных почв, когда важно сохранение их плодородия. Расчётную массу машины будем варьировать в пределах до $M = 5,9$ т, длина продольной проекции гусеницы на грунт $L = 1,62$ м, при ширине $B = 0,39$ м и длине ленты гусеницы $L_{гг} = 4,2$ м, числе $n_{тр} = 42$ и шаге траков $t_{тр} = 0,181$ м. Важно отметить, что соотношение сторон пятна контакта составляет $b/l \approx 1/4$, что характерно и для других отечественных гусеничных тракторов, а диапазон среднего давления на грунт достаточно широк — по этой причине можем заключить, что результаты расчёта наглядно раскрывают закономерности изучаемого процесса. Числовые данные для расчёта приведены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные для расчёта

Table 2. Initial data for the calculation

Этап образования колеи	Ширина пятна контакта b , м	Длина пятна контакта l , м	Среднее давление p , МПа	Мощность слоя H , м
I	0,0858	0,390	0—0,0916	0,172
II	0,390	1,620	0—0,0458	0,780

Примечание: (I) — уплотнение верхнего слоя почвы и формирование уплотнённого ядра, (II) — образование колеи при погружении уплотнённого ядра, сжатии и сдвиге деформируемых слоёв массива почвы.

Деформации почвы h_I и h_{II} найдём из численного решения уравнения (9) при варьировании давления p , геометрических параметрах по таблице 2, выражение (10). Несущая способность задана уравнениями (11).

Относительное уплотнение верхнего слоя почвы найдём по формуле

$$\rho^* = \frac{h_I + H_I}{H_I} - 1, \quad (12)$$

На рисунках 4—6 приведены полученные результаты для почв, покрытых сфагновым мхом без кустарника, сфагновым мхом с кустарником и гипновым мхом с кустарником. Модуль деформации E принят как среднее для соответствующих типов покрова по таблице 1, удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ вычислены по формулам (1), (2) соответственно. Для удобства результаты приведены относительно условного давления гусеничного движителя на грунт:

$$NGP = \frac{W}{2BL'} \quad (13)$$

зачастую используемого как паспортная характеристика машины.

Примем ограничения: суммарная глубина колеи $h \leq 0,05$ м, относительное уплотнение почвы $\rho^* \leq 0,15$ (15 %). Выбор ограничения по уплотнению обусловлен тем обстоятельством, что при относительном уплотнении свыше 15 % происходит критическое нарушение процессов гидро- и газообмена в почве [61]. Кроме того, предварительные расчёты для лесных почвогрунтов показали, что при глубине колеи свыше 0,05 м зависимость глубины колеи от давления приобретает резко выраженный нелинейный характер, что свидетельствует о начале среза-сдвига верхних слоёв почвы по причине потери несущей способности.

Для трёх рассмотренных типов опорной поверхности принятые ограничения соблюдаются при номинальном давлении NGP в пределах 0,029—0,039 МПа.

Отметим, что на графиках, представленных на рисунках 4—6, нелинейный характер связи глубины колеи h и давления NGP для почв на многолетней мерзлоте отмечается при h свыше 0,05 м.

Ввиду различной интенсивности развития деформаций при различных физико-механических свойствах опорной поверхности и давлении пятна контакта, бóльшими значениями отличаются как деформации уплотнения (I) верхнего слоя, так и глубина колеи (II). В зависимости от типа напочвенного покрова более строгим ограничением поочередно выступает как допустимое значение глубины колеи, так и относительное уплотнение.

При этом, согласно расчётным данным, обе величины достаточно близки: глубина колеи ориентировочно 0,05 м (5 см) приблизительно соответствует относительному уплотнению верхнего слоя почвы в пределах 0,15 (15 %). Таким образом, предложенные ограничения воздействия движителя на опорную поверхность согласуются друг с другом.

Выполним дальнейшие вычисления при варьировании модуля деформации E . Определим допустимое давление при тех же ограничениях следующим образом:

$$NGP = \min\{NGP_{h=0,05 \text{ м}}; NGP_{\rho^*=0,15}\} \quad (14)$$

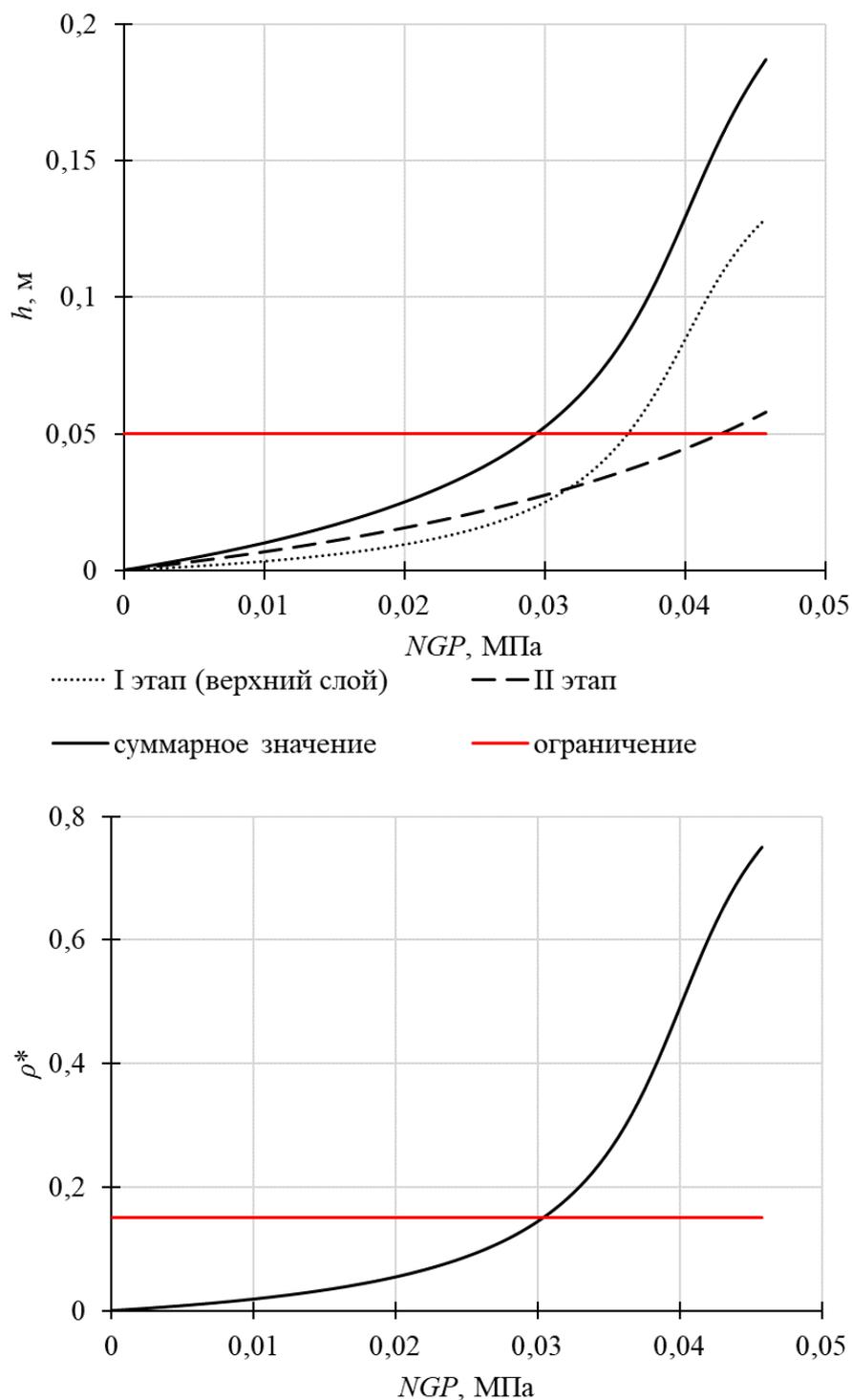


Рисунок 4. Результаты расчёта составляющих колеи и относительного уплотнения почвы с покрытием в виде сфагнового мха без кустарника [рисунок авторов]

Figure 4. The results of calculating the components of the track and the relative compaction of the soil with a coating in the form of sphagnum moss without shrubs

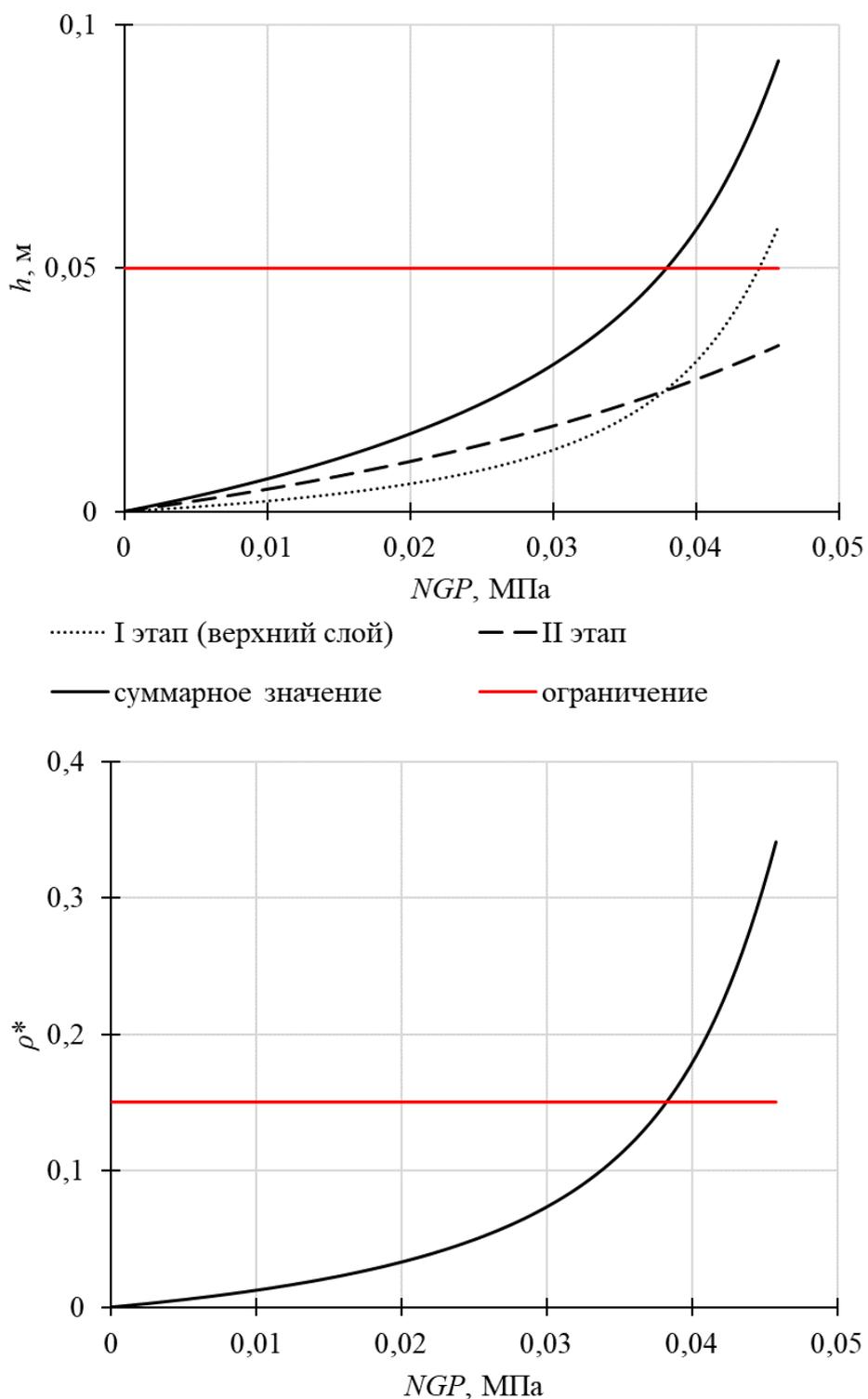


Рисунок 5. Результаты расчёта составляющих колеи и относительного уплотнения почвы с покрытием в виде сфагнового мха с кустарником [рисунок авторов]

Figure 5. The results of the calculation of the components of the track and the relative compaction of the soil with a coating in the form of sphagnum moss with shrubs

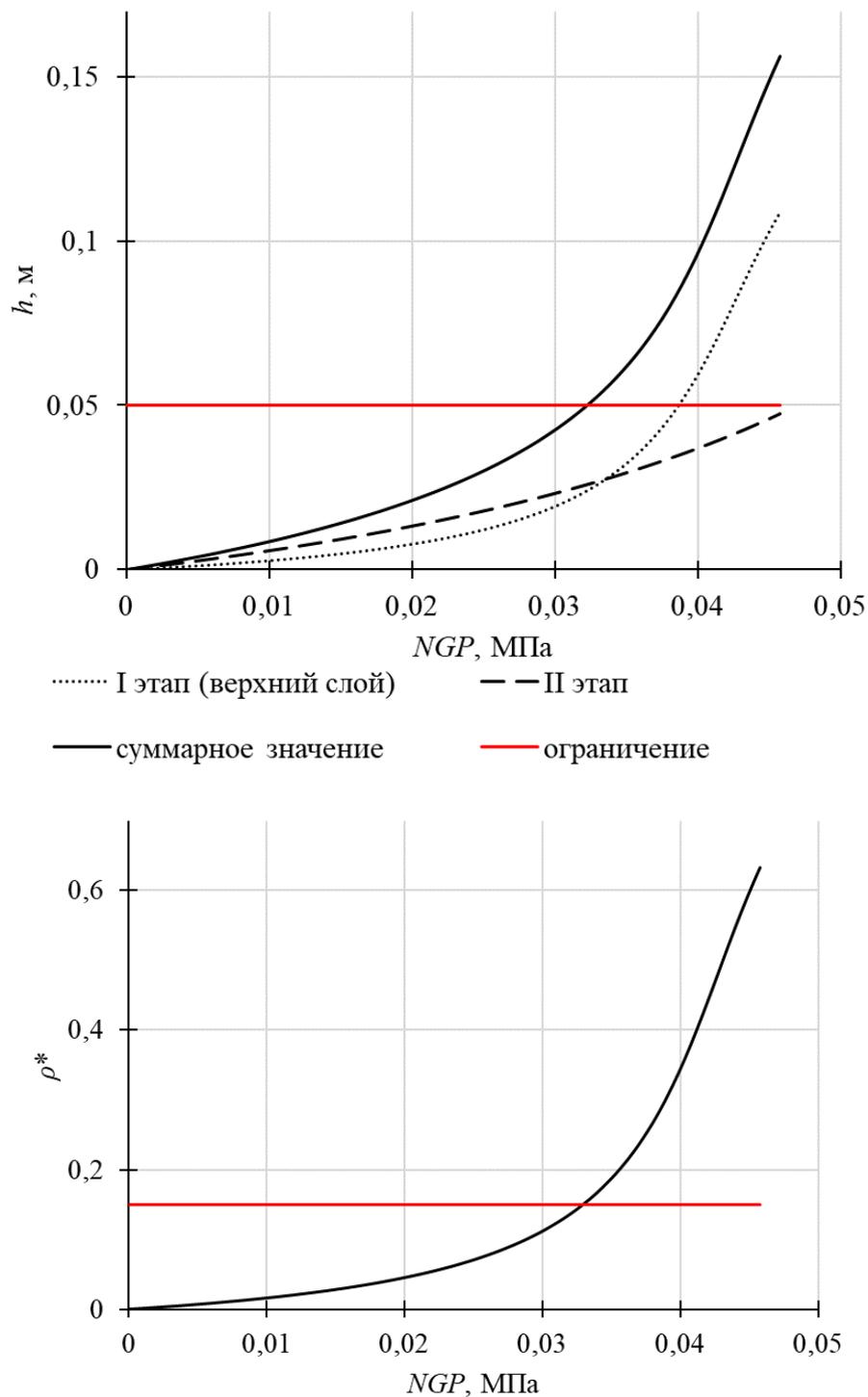


Рисунок 6. Результаты расчёта составляющих колеи и относительного уплотнения почвы с покрытием в виде гипнового мха с кустарником [рисунок авторов]

Figure 6. The results of calculating the components of the track and the relative compaction of the soil with a coating in the form of brown moss with shrubs

Результаты расчётов приведены на рисунке 7.

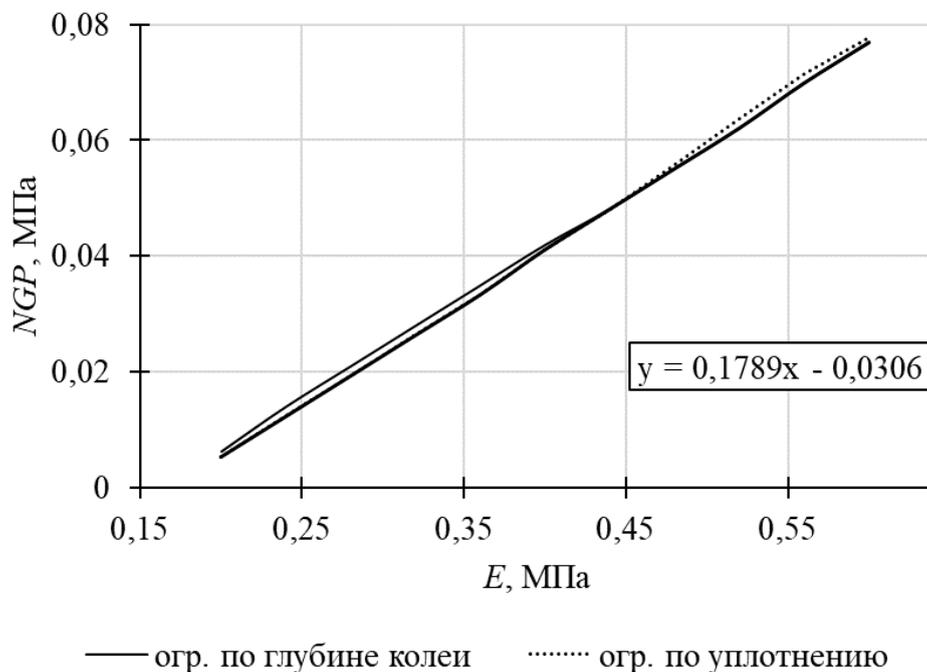


Рисунок 7. Допустимое номинальное давление гусеничного движителя на почву, ограниченное критерием экологичности [рисунок авторов]

Figure 7. Permissible nominal pressure of the crawler on the soil, limited by the criterion of environmental friendliness

Обработка расчётных данных приводит к получению линейной функции допустимого давления от модуля деформации E :

$$NGP = 0,1789E - 0,0306 \quad (15)$$

При помощи уравнения (8) получим оценку допустимого давления в зависимости от сопротивления вдавливаю стандартного зонда, более удобную для практического использования (рисунок 8).

Функция давления NGP , допустимого по критерию экологичности, от сопротивления почвы q_c , следующая:

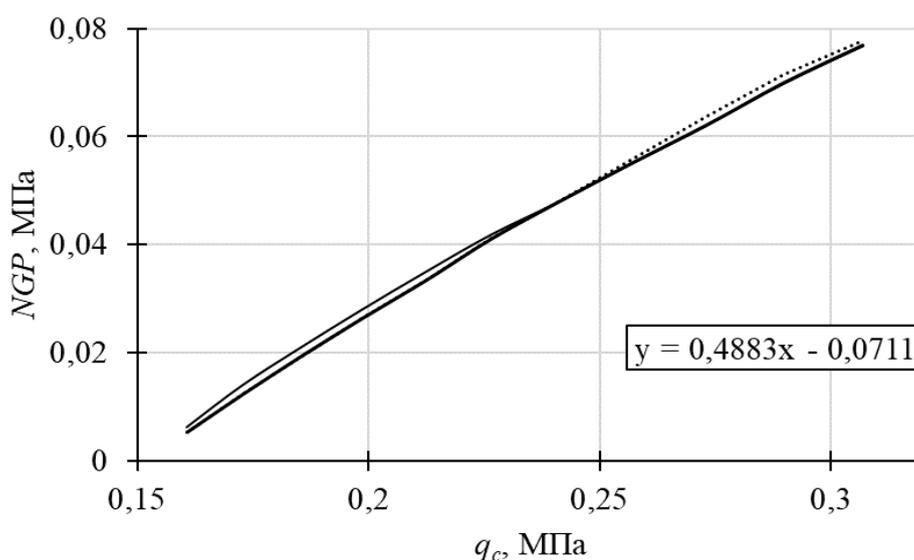
$$NGP = 0,4883q_c - 0,0711 \quad (16)$$

Для удобства использования результатов на практике приведём полученные оценки допустимого давления гусеничного движителя, с учётом типа почвенного покрова, в таблице 3.

Таблица 3. Допустимое давление гусеничного движителя для различных типов напочвенного покрова

Table 3. Permissible pressure of the crawler for various types of ground cover

Характеристика покрова	E , МПа	q_c , МПа	NGP , МПа
Сфагновые мхи без кустарника	0,26—0,29	0,10—0,14	0,016—0,021
Сфагновые мхи с кустарником	0,36—0,43	0,21—0,30	0,034—0,046
Гипновые мхи с кустарником	0,29—0,34	0,14—0,19	0,021—0,030



— огр. по глубине колеи огр. по уплотнению

Рисунок 8. Допустимое среднее давление гусеничного движителя на почву, ограниченное критерием экологичности [рисунок авторов]

Figure 8. Permissible average pressure of the crawler unit on the soil, limited by the criterion of environmental friendliness

Оценим жёсткость почвы, находящейся под воздействием гусеничного движителя, с использованием полученных расчётных данных. Для этого введём линеаризованную функцию силы, связанной со вдавливанием движителя в почву на глубину z :

$$F_{\text{лин}} = kbz. \quad (17)$$

Уравнение (17) описывает процесс вдавливания при условии, что зависимость $p(h)$ достаточно близка к линейной (рисунки 4—6), т. е. при $h \leq 0,05$ м. С другой стороны, известно, что сила сопротивления грунта, возникающая при образовании колеи, определяется путём интегрирования функции $p(h)$ [33], [34], [49], [62—64]:

$$F = b \int_0^h p dh \quad (18)$$

тогда для коэффициента пропорциональности k получим:

$$\int_0^h F_{\text{лин}} dz = \frac{1}{2} h^2 kb = b \int_0^h p dh \Rightarrow k = \frac{2}{h^2} \int_0^h p dh \quad (19)$$

Результаты расчётов по формуле (19), выполненных при $E = 0,2—0,6$ МПа, приведены на рисунке 9 (интеграл в выражении рассчитан при помощи метода трапеций по значениям h , p , вычисленным нами при расчёте допустимого давления на почву).

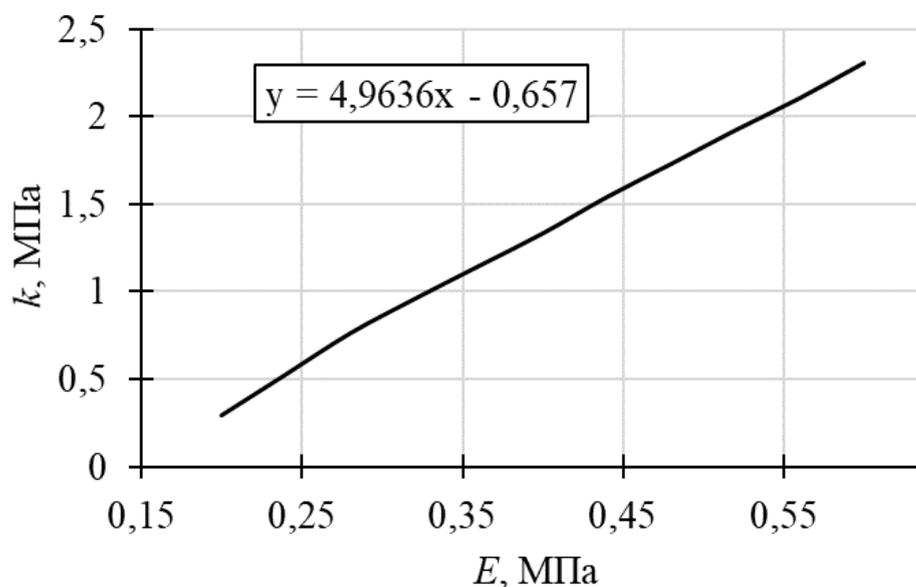


Рисунок 9. Коэффициент пропорциональности при расчёте силы сопротивления почвы образованию колеи [рисунок авторов]

Figure 9. The coefficient of proportionality in calculating the strength of soil resistance to the formation of a track

Для практических расчётов удобнее воспользоваться уравнением

$$k = 4,9636E - 0,657, \quad (20)$$

полученным в результате аппроксимации данных, представленных на рисунке 9. Зависимость коэффициента k , с учётом связи (8), может быть представлена в виде графика относительно сопротивления q_c на рисунке 10.

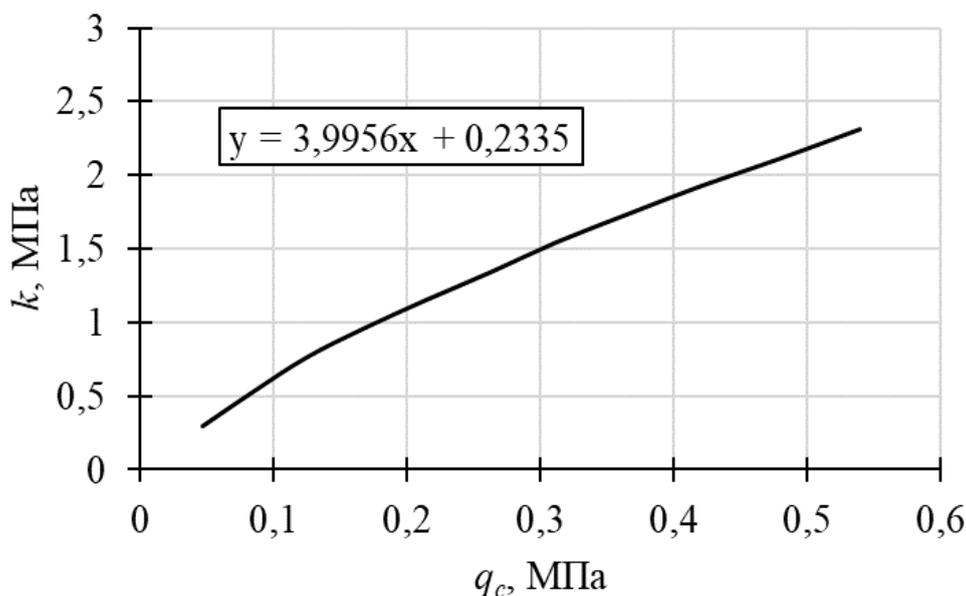


Рисунок 10. Коэффициент пропорциональности при расчёте силы сопротивления почвы образованию колеи [рисунок авторов]

Figure 10. The coefficient of proportionality in calculating the strength of soil resistance to the formation of a track

Приближенное уравнение для коэффициента k в таком случае:

$$k = 3,9956q_c + 0,2335 \quad (21)$$

Полученные результаты удобно использовать при расчёте затрат топлива, связанных с сопротивлением движению машины по деформируемой почве. Уравнение для мощности N :

$$N = \frac{2Fv}{\eta_{\text{трм}}} \approx kh \frac{2Bv}{\eta_{\text{трм}}}, \quad (22)$$

где v — скорость машины, $\eta_{\text{трм}}$ — коэффициент полезного действия (КПД) трансмиссии, тогда для расхода топлива получим:

$$Q = \frac{Nt}{\eta_{\text{двс}}q_T} = \frac{2FL_M}{\eta_{\text{двс}}q_T} \approx kh \frac{2BL_M}{\eta_{\text{трм}}\eta_{\text{двс}}q_T}, \quad (23)$$

где t — время движения, $\eta_{\text{двс}}$ — КПД двигателя, q_T — теплота сгорания топлива, L_M — путь.

Тогда при принятых данных для расчёта: $B = 0,39$ м, $\eta_{\text{двс}} = 0,4$, $q_T = 0,042$ МДж/кг и плотности топлива $\rho_T = 860$ кг/м³ ориентировочный расход топлива при движении по почве, покрытой сфагновыми мхами без кустарника: 0,34—0,42 л/1 км на 1 см образующейся колеи. Оценка расхода топлива при движении по почве, покрытой сфагновыми мхами с кустарником, составит 0,61—0,80 л/1 км на 1 см образующейся колеи.

Аналогичный показатель при движении по почве, покрытой гипновыми мхами с кустарником: 0,42—0,56 л/1 км на 1 см образующейся колеи. Для обоснования требуемой мощности двигателя машины, предназначенной для работы в условиях лесов криолитозоны, необходимо дополнительно рассмотреть движение по снегу, что не входит в задачи данного исследования.

3.3. Предпосылки к снижению негативного воздействия движителя на почву

Результаты расчётов показывают, что для сохранения почвы на многолетней мерзлоте номинальное давление NGP гусеничного движителя на опорную поверхность должно быть ограничено величинами, существенно меньшими, чем паспортные характеристики давления сельскохозяйственных тракторов на грунт.

При исследовании вопроса об обеспечении экологичности гусеничных машин учтём следующие обстоятельства.

Снижение давления за счёт уменьшения веса машины в общем случае связано с уменьшением полезной нагрузки, перевозимой транспортным средством. Известны конструкции лёгких вездеходных машин гусеничного типа, далеко не всегда отличающихся достаточной грузоподъёмностью. Подбор таких машин, совместимых с арктическими почвами, возможен на основании полученных оценок — уравнения (15), (16).

Снижение среднего давления на опорную поверхность за счёт увеличения площади пятна контакта связано с увеличением ширины гусениц. Известны конструктивные решения для тракторов, использующие гусеницы увеличенной ширины. Например, для трактора ДТ-75 «Болотник» $B = 0,47$ м, при этом $NGP = 0,039$ МПа, что ниже $NGP = 0,047$ МПа стандартной модели. Однако увеличение ширины гусеницы ведёт к увеличению металлоёмкости и износа траков.

Известны решения, заключающиеся в оснащении тракторов гусеницами повышенной ширины, выполненными из резино-полимерных материалов. Вес машины снижается за счёт использования более лёгких материалов (например, вес комплекта гусениц для трактора ДТ-75 составляет 760 кг, оценочный вес комплекта резино-полимерных гусениц составит 80 кг; снижение давления за счёт меньшего веса составляет ориентировочно 12 %). Однако в отличие от металлических продольный профиль таких гусениц заметно деформируется при контакте с почвой, как следствие, изменяется эпюра давления на опорную поверхность. Максимальное значение давления (в середине пятна контакта) превысит среднее значение для металлической гусеницы равной ширины.

Последнее обстоятельство следует рассмотреть подробнее. Обратимся к модели трака как короткой балки на упругом основании со свободными концами, нагруженной переменной распределённой нагрузкой, и рассмотрим его вдавливание в почву (рисунок 11).

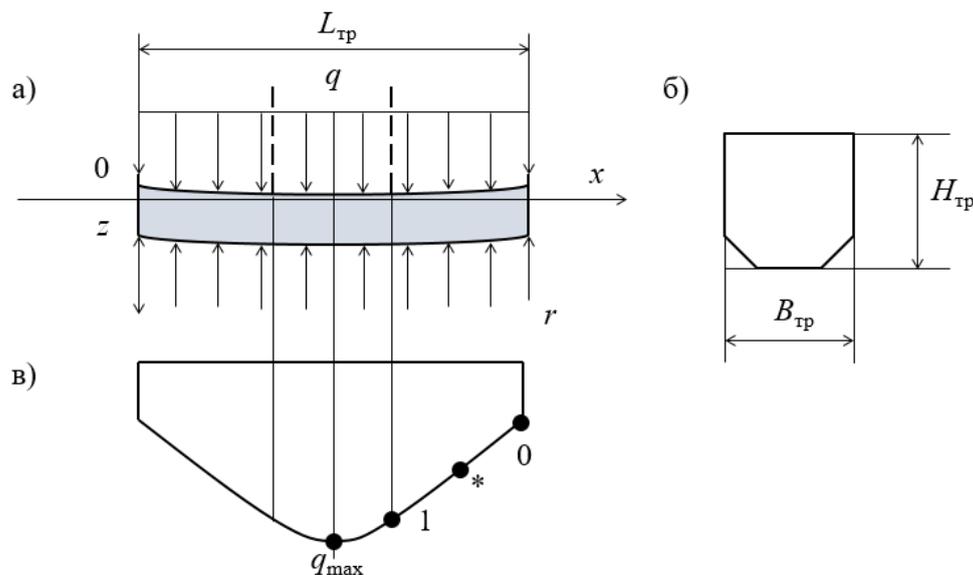


Рисунок 11. Расчётная схема к решению задачи о вдавливании гибкого трака в массив почвы: **а** — общая схема, **б** — поперечное сечение балки (трака), **в** — эпюра нагрузки, распределённой вдоль трака [рисунок авторов]

Figure 11. Calculation scheme for solving the problem of pressing a flexible track into the soil mass: **(a)** general scheme, **(b)** cross section of the beam (track), **(c)** plot of the load distributed along the track

Реакция почвы, возникающая при погружении трака на глубину z , определяется с учётом коэффициента постели ξ (связан с жёсткостью почвы) и изменяется вдоль оси x [65]:

$$r(x) = -\xi B_{\text{тр}} z(x). \quad (24)$$

Интенсивность нагрузки на трак находится как сумма [65]:

$$p(x) = q(x) + r(x), \quad (25)$$

где q — распределённая нагрузка, связанная с весом машины и конструкцией движителя.

Основное уравнение изгиба балки [65]:

$$E_0 I \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = -M_{\text{изг}}(x), \quad (26)$$

где E_0 — модуль упругости материала, $M_{\text{изг}}$ — изгибающий момент, I — момент инерции (определяется геометрическими параметрами поперечного сечения трака).

Поскольку изгибающий момент связан с интенсивностью нагрузки [65]:

$$\frac{d^2 M_{\text{изг}}(x)}{dx^2} = p(x), \quad (27)$$

дифференциальное уравнение для вертикальных перемещений трака, с учётом основного уравнения изгиба (26), имеет вид [65]:

$$\frac{d^4 z(x)}{dx^4} + \frac{kB_{\text{тр}}}{E_0 I} z = \frac{q(x)}{E_0 I} \quad (28)$$

Для того чтобы задать граничные условия к решению задачи в форме (28), требуется определить неизвестные перемещения в точках $x = 0 = L_{\text{тр}}$. По этой причине уравнение (28) удобнее переписать относительно изгибающего момента:

$$\frac{d^4 M_{\text{изг}}(x)}{dx^4} + \frac{\xi B_{\text{тр}}}{E_0 I} M_{\text{изг}}(x) = -\frac{1}{E_0 I} \cdot \frac{d^2 q(x)}{dx^2}, \quad (29)$$

с граничными условиями, однозначно определяемыми физической картиной решаемой задачи (концы балки свободны):

$$M_{\text{изг}}(0) = M_{\text{изг}}(B) = \frac{dM_{\text{изг}}(x)}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{dM_{\text{изг}}(x)}{dx} \Big|_{x=B} = 0,$$

Определим выражения для остальных параметров, входящих в уравнение (29).

Момент инерции поперечного сечения найдем с учётом схемы на рисунке 11 [65]:

$$I = \frac{B_{\text{тр}} H_{\text{тр}}^3}{12}, \quad (30)$$

где $B_{\text{тр}}, H_{\text{тр}}$ — геометрические параметры сечения (указаны на рисунке 11).

Коэффициент ξ , очевидно, связан с жёсткостью k , формула для которой получена выше:

$$\xi = \frac{k}{L_{\text{тр}}}. \quad (31)$$

Рассмотрим функцию распределённой нагрузки $q(x)$. Эпюра нагрузки имеет сложный характер, обусловленный конструктивными особенностями и изгибом трака, а также параметрами (шириной) катков движителя. Будем ориентироваться на численное решение уравнения (29), по этой причине целесообразно получить некоторое непрерывное приближение функции $q(x)$. Положим, что в центре пятна контакта нагрузка максимальна и составляет q_{max} . В точках, по продольной оси трака x соответствующих краям катков («1» на схеме, представленной на рисунке 11), нагрузка составляет: $q_1 \approx q_{\text{max}}$. Ближе к краям пятна контакта нагрузка заметно снижается: $q_0 \ll q_{\text{max}}$. Дополнительно, для уточнения функции $q(x)$, следует учесть точки «*» на отрезке от «1» до «0».

Таким образом, возникает задача приближения функции по не менее чем 7 узлам, с учётом симметричности эпюры относительно центра пятна контакта. Рассмотрим интерполяционный полином:

$$\bar{q}(x) = \sum_{j=1}^m \alpha_j x^{j-1}, \quad (32)$$

где m — число узлов интерполяции, коэффициенты α удовлетворяют условиям интерполяции:

$$\bar{q}(x_j) = q_j,$$

Дополнительно потребуем соблюдения условия

$$\int_n^{L_{\text{тр}}} \bar{q}(x) dx = L_{\text{тр}} B_{\text{тр}} p \quad (33)$$

Выполнение требования (33) необходимо для сохранения физического смысла задачи при использовании приближения: вес, распределённый по пятну контакта гибкого и жёсткого траков, должен оставаться постоянной величиной.

Для случая интерполяции по 7 узлам (полином со старшей степенью 6) обозначим:

$$q_0 = \varepsilon_0 q_{\text{max}}, q_* = \varepsilon_* q_{\text{max}}, q_1 = \varepsilon_1 q_{\text{max}},$$

узлы интерполяции расположим в соответствии с таблицей 4.

Таблица 4. Узлы интерполяции для построения приближения эпюры распределённой нагрузки

Table 4. Interpolation nodes for constructing an approximation of the distributed load diagram

Порядковый номер узла, j	x_j	q_j
1	0	$\varepsilon_0 q_{\text{max}}$
2	$\frac{L_{\text{тр}}}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi}{10}\right)$	$\varepsilon_* q_{\text{max}}$
3	$\frac{L_{\text{тр}}}{2} - \frac{B_{\text{к}}}{2}$	$\varepsilon_1 q_{\text{max}}$
4	$\frac{L_{\text{тр}}}{2}$	q_{max}
5	$\frac{L_{\text{тр}}}{2} + \frac{B_{\text{к}}}{2}$	$\varepsilon_1 q_{\text{max}}$
6	$\frac{L_{\text{тр}}}{2} \left(1 + \cos \frac{9\pi}{10}\right)$	$\varepsilon_* q_{\text{max}}$
7	$L_{\text{тр}}$	$\varepsilon_0 q_{\text{max}}$

Выражение для полинома запишем в форме Лагранжа:

$$\bar{q}(x) = \sum_{j=1}^m \frac{\omega_j(x)}{\omega_j(x_j)} q_j \quad (34)$$

где

$$\omega_j(x) = \prod_{i \neq j} (x - x_i), \quad \omega_j(x_j) = \prod_{i \neq j} (x_j - x_i), \quad i, j = 1 \dots 7$$

значение q_{\max} определяется из условия (33) при заданных долях ε .

Пример построения эпюры для нагрузки $q(x)$ по формуле (34) приведён на рисунке 12.

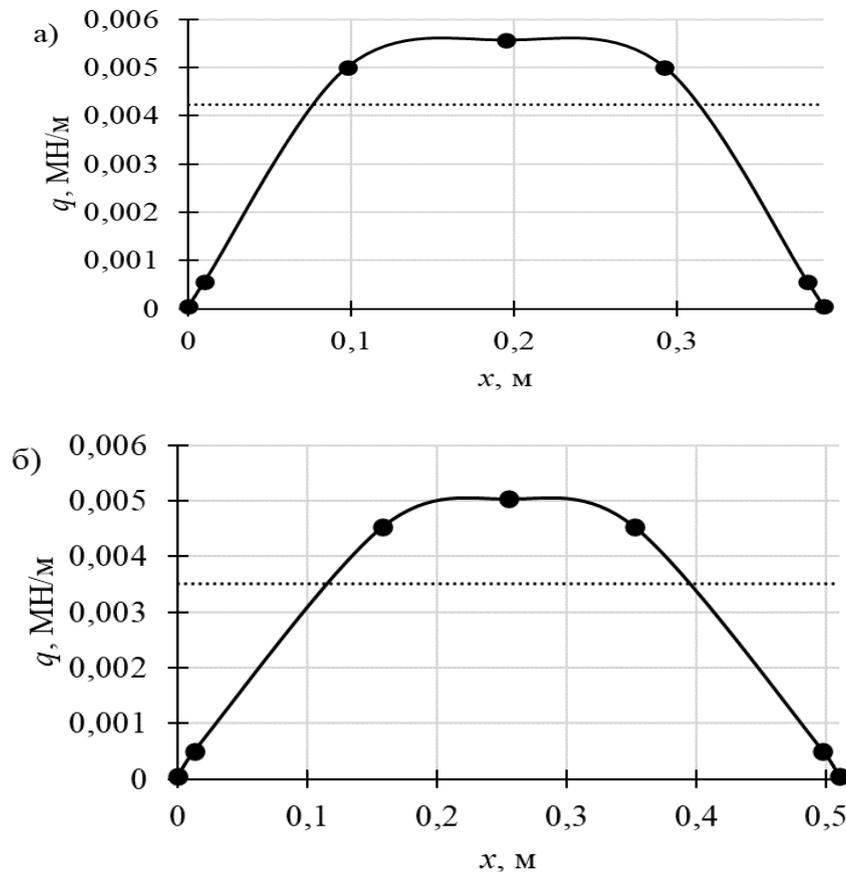


Рисунок 12. Пример эпюры распределённой нагрузки: **а** — $L_{tr} = 0,39$ м, $0,51$ м, $p = 0,046$ МПа, **б** — $L_{tr} = 0,51$ м, $p = 0,039$ МПа, $B_k = 0,195$ м, $B_{tr} = 0,09$ м, $\varepsilon_0 = 0,01$, $\varepsilon^* = 0,1$, $\varepsilon_2 = 0,9$ (пунктирная линия — $q = pB_{tr}$) [рисунок авторов]

Figure 12. Example of a distributed load diagram: **(a)** $L_{tr} = 0.39$ m, 0.51 m, $p = 0.046$ MPa, **(b)** $L_{tr} = 0.51$ m, $p = 0.039$ MPa, $B_k = 0.195$ m, $B_{tr} = 0.09$ m, $\varepsilon_0 = 0.01$, $\varepsilon^* = 0.1$, $\varepsilon_2 = 0.9$ (dotted line — $q = pB_{tr}$)

Использование формулы (34) и таблицы 4 позволяет получить непрерывное приближение функции распределённой нагрузки $q(x)$, учитывающее повышение давления под катками, передающее различный характер изменения нагрузки по пятну контакта. По интегральной оценке (33) результат соответствует воздействию жёсткого движителя при равной площади пятна контакта.

На рисунке 13 приведён пример решения дифференциального уравнения (29) относительно второй производной изгибающего момента ($E = 0,4$ МПа, $H_{тр} = 0,05$ м, $E_0 = 3$ МПа, прочие исходные данные те же, что и для рисунка 12).

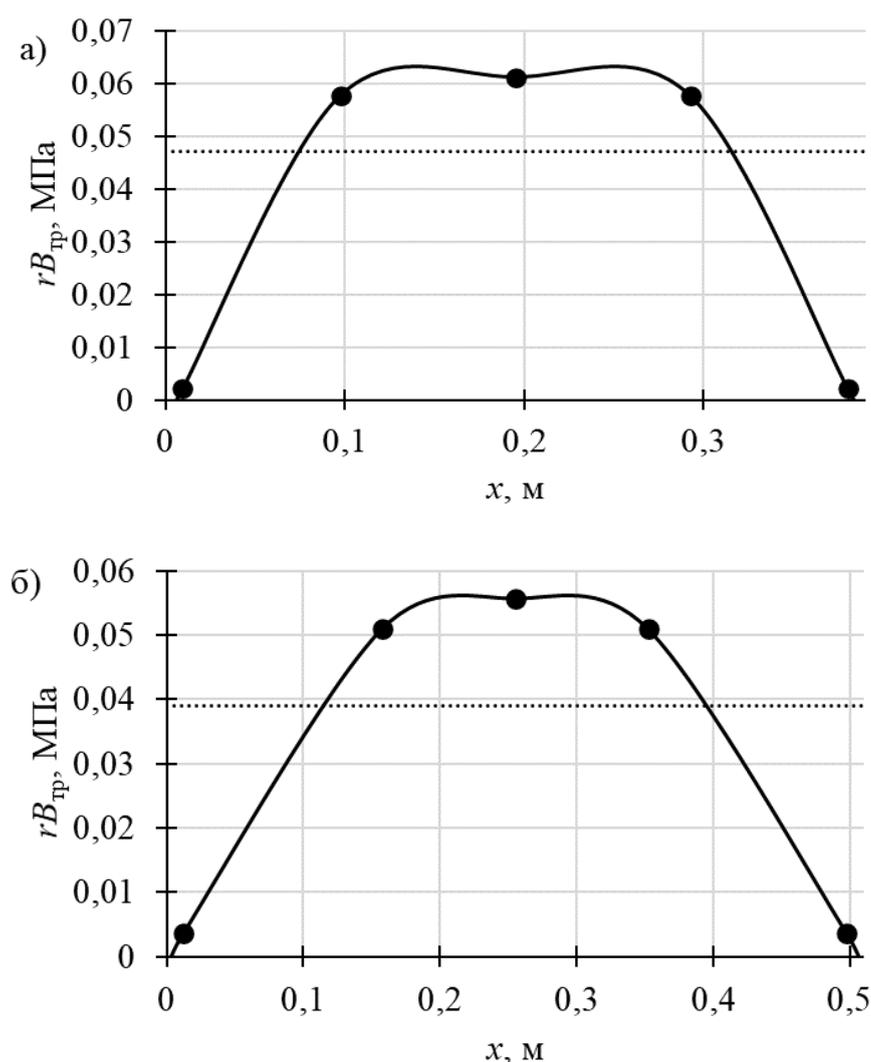


Рисунок 13. Реакция почвы на вдавливание гибкого трака (пунктир — для жёсткого трака) [рисунок авторов]

Figure 13. The reaction of the soil to the indentation of a flexible track (dotted line — for a rigid track)

Обработка результатов дальнейших расчётов, выполненных при варьировании E в пределах 0,2—0,6 МПа, показывает, что отношение реакции почвы в середине пятна контакта к номинальному давлению NGP связано, главным образом, с отношением ширины гусеницы B (длины гибкого трака $L_{тр}$) к ширине катка B_k . Результаты представлены на рисунке 14.

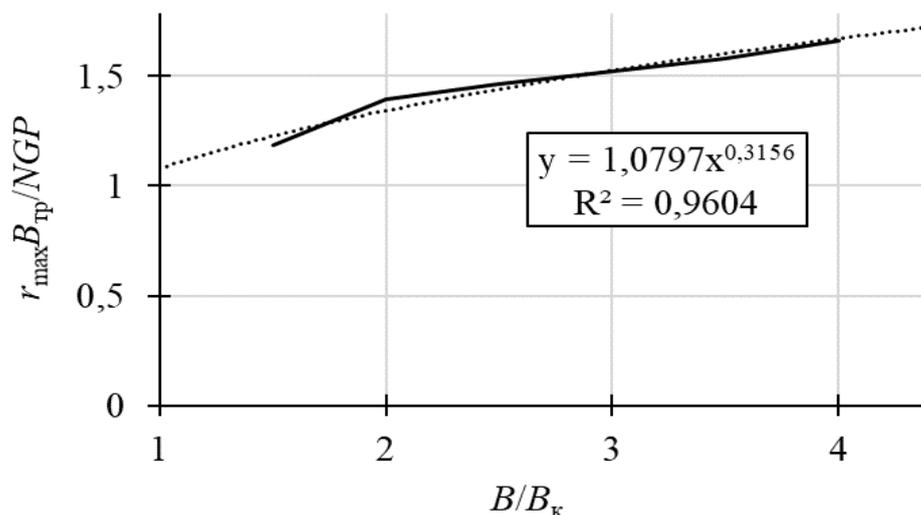


Рисунок 14. Отношение максимальной реакции почвы при вдавливании гибкого трака к номинальному давлению жёсткого трака равного размера [рисунок авторов]

Figure 14. The ratio of the maximum soil reaction when pressing a flexible track to the nominal pressure of a rigid track of equal size

Результаты расчётов достаточно точно можно приблизить функцией

$$\zeta = \frac{r_{max} B_{тр}}{NGP} \approx \sqrt[3]{\frac{B}{B_k}} \quad (35)$$

представляющей собой, по физическому смыслу, повышающий коэффициент к давлению NGP и учитывающий неравномерность воздействия гибкого трака на почву.

Оценим эффект использования гибких гусениц с точки зрения снижения негативного воздействия на почву. Учтём, что при использовании гусеницы с гибкими траками увеличенной ширины B_{el} , за счёт увеличения площади пятна контакта, снижается номинальное давление, тогда

$$p_{max} = r_{max} B_{el} = \zeta NGP = \sqrt[3]{\frac{B_{el}}{B_k}} \cdot \frac{w}{2LB_{el}} \quad (36)$$

Кроме того, учтём, что вес эластичной гусеницы меньше, чем металлической. Получим:

$$p_{max} = \sqrt[3]{\frac{(1 + \Delta)B_0}{B_k}} \cdot \frac{\left(1 + \delta_0 \frac{\rho_{el}}{\rho_0}\right) w_0}{2L(1 + \Delta)B_0}, \quad (37)$$

где индекс «0» соответствует «базовому» варианту с металлической гусеницей, индекс «el» — гибкой резино-полимерной гусенице, ρ — плотность материала гусеницы, δ — доля общего веса машины, приходящегося на гусеницу, Δ — отношение ширины гибкой и жёсткой гусениц, $\Delta = B_{el}/B_0$.

Отношение «опасного» максимального давления под катком p_{max} при работе машины, оснащённой гибкой гусеницей, к номинальному давлению NGP_0 машины с металлической гусеницей проиллюстрировано на рисунке 15.

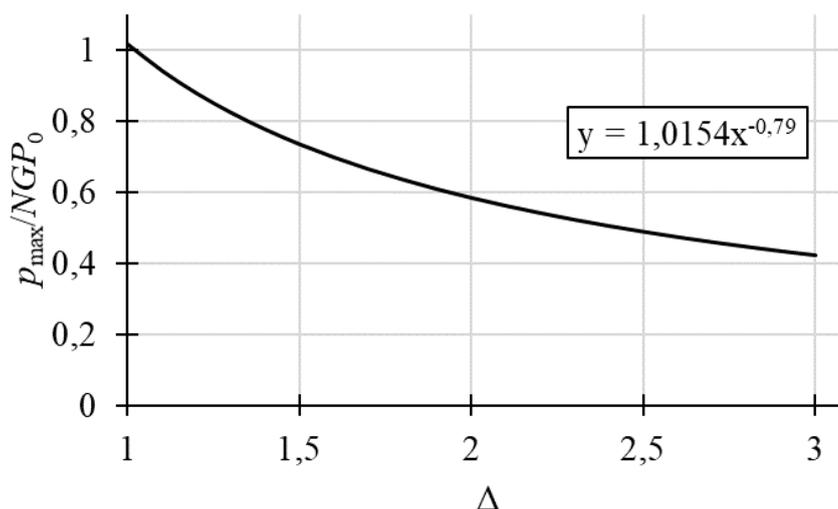


Рисунок 15. Снижение воздействия движителя на почву при использовании гибкой резиновой гусеницы повышенной ширины [рисунок авторов]

Figure 15. Reducing the impact of the crawler unit on the soil when using a flexible rubber track of increased width

Аппроксимация расчётных данных приводит к получению формулы для оценки снижения воздействия движителя на почву при использовании гибкой гусеницы увеличенной ширины:

$$\Delta_p = 1,0154\Delta^{-0,79} = 1,0154\left(\frac{B_{el}}{B_0}\right)^{-0,79}, \quad (38)$$

$$p_{max} = \Delta_p NGP_0 = 1,0154\left(\frac{B_{el}}{B_0}\right)^{-0,79} NGP_0, \quad (39)$$

Например, при работе машины, оснащённой гибкой гусеницей, вдвое более широкой, чем металлическая гусеница, показатель воздействия на почву снизится на 40 %, даже с учётом неравномерного давления гибкого движителя на опорную поверхность с максимумом под катком.

4. Обсуждение и заключение

Для работы в условиях почв на многолетней мерзлоте предложен критерий экологичности гусеничного движителя: суммарная глубина колеи и уплотнение почвы ограничены заданными допустимыми значениями. Согласно расчётным данным, глубина колеи ориентировочно 0,05 м (5 см) приблизительно соответствует относительному уплотнению верхнего слоя почвы в пределах 0,15 (15 %). Эти значения рекомендуется принять в качестве допустимых, что установлено (см. рисунки 4—6). Рекомендация основана на результатах расчётов, свидетельствующих, что при большей глубине колеи её зависимость от давления приобретает выраженный нелинейный характер (начало среза-сдвига верхних слоёв почвы), и известных данных о том, что при относительном уплотнении свыше 15 % происходит критическое нарушение процессов гидро- и газообмена в почве.

Результаты расчётов показывают, что для сохранения арктической почвы номинальное давление гусеничного движителя на опорную поверхность должно быть ограничено величинами, существенно меньшими, чем паспортные характеристики давления сельскохозяйственных тракторов на грунт. Для трёх рассмотренных типов опорной поверхности (почва, покрытая сфагновыми мхами без кустарника и с кустарником, гипновыми мхами с кустарником) предлагаемые ограничения соблюдаются при номинальном давлении NGP в пределах 0,029—0,039 МПа (см. таблицу 3). Уравнения для расчёта допустимого давления при заданных механических параметрах почвы представлены линейными функциями (15), (16).

В результате решения дифференциального уравнения изгиба трака при его вдавливании в почву получена оценка максимального давления движителя на опорную поверхность (рисунок 14). Получено выражение поправочного коэффициента, учитывающего неравномерность воздействия трака на почву в виде нелинейной функции (35) и дана оценка снижения воздействия движителя на почву при использовании резино-полимерной гусеницы увеличенной ширины (рисунок 15). Например, при работе машины, оснащённой гибкой гусеницей, вдвое более широкой, чем металлическая, показатель воздействия на почву снизится на 40 %, даже с учётом неравномерного давления гибкого движителя на опорную поверхность с максимумом под катком. Для практических расчётов уравнения (15), (16) дополняются формулами (38), (39).

Ориентировочный расход топлива при движении по почве, покрытой сфагновыми мхами без кустарника, составляет 0,34—0,42 л/1 км на 1 см образующейся колеи. Оценка расхода топлива при движении по почве, покрытой сфагновыми мхами с кустарником, составит 0,61—0,80 л/1 км на 1 см образующейся колеи. Аналогичный показатель при движении

по почве, покрытой гипновыми мхами с кустарником, 0,42—0,56 л/1 км на 1 см образующейся колеи. Для обоснования требуемой мощности двигателя машины, предназначенной для работы в условиях многолетней мерзлоты, необходимо дополнительно рассмотреть движение по снегу, что не входит в задачи данных исследований.

Для упрощения сбора полевых данных о свойствах почвы, затруднённого с учётом сложных условий региона, получено выражение модуля деформации почвы по сопротивлению вдавлению стандартного конусного зонда. При помощи формулы (7) результаты моделирования пересчитываются относительно сопротивления зондированию, легко определяемого в полевых условиях при помощи стандартизованного ручного прибора.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование осуществлено на средства гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Список литературы

1. Сравнение подходов к типологии лесных насаждений России и Европейских стран / О. И. Григорьева, А. С. Старовойтова, В. А. Макуев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 71—77.
2. Шаниро В. Я., Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности взаимодействия лесных машин с мерзлотными почвогрунтами // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы IV Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2018. С. 187—188.
3. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain / S. E. Rudov, A. M. Voronova, J. M. Chemshikova [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2019. Vol. 16, no. 4. P. 61—75.
4. Повышение эффективности работы колёсных лесных машин на оттаивающих почвогрунтах / С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, М. Ф. Григорьев [и др.] // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVII Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Ю. М. Авдеев. Вологда, 2019. С. 223—225.
5. Эффективность лесопользования в криолитозоне / С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы междунар. научно-практич. конф. Воронеж, 2020. С. 460—463.
6. Проблемы и перспективы лесозаготовительного производства в условиях районов распространения вечной мерзлоты / Г. В. Григорьев, И. Н. Дмитриева, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3 (51). С. 59—67.
7. Тетеревлева Е. В., Гринько О. И., Григорьева О. И. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колёсных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 374—377.

8. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров / О. И. Григорьева, А. Б. Давтян, О. И. Гринько [и др.] // Машиностроение: новые концепции и технологии: Всерос. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Красноярск, 2020. С. 45—49.
9. Григорьева О. И., Давтян А. Б., Гринько О. И. Перспективы импортозамещения в производстве лесохозяйственных и лесопожарных машин в России // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: Сб. ст. Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2020. С. 66—69.
10. Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления / О. И. Григорьева, В. А. Макуев, Е. В. Барышникова [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 78—84.
11. Метод оценки эффективности лесовосстановительных мероприятий с учётом параметров лесотранспортной сети / Р. Н. Ковалев, И. М. Еналеева-Бандура, А. Н. Баранов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 64—71.
12. Перспективная лесохозяйственная машина / А. Ю. Мануковский, М. В. Зорин, О. И. Григорьева [и др.] // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сб. науч. ст. по итогам Шестой междунар. науч. конф. Казань, 2020. С. 141—143.
13. Технология и машины лесовосстановительных работ: Учебное пособие / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.]. М.: Деревообрабатывающая пром-сть, 2015. 230 с.
14. Основы лесного хозяйства: Учебное пособие / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.]. М.: Деревообрабатывающая пром-сть, 2015. 170 с.
15. Григорьева О. И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2018. С. 79—83.
16. Рудов С. Е., Григорьева О. И., Григорьев И. В. Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 38—41.
17. Григорьева О. И., Рудов С. Е. Перспективные пути повышения товарной ценности лесных насаждений криолитозоны // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Пятой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2019. С. 29—31.
18. Чемшикова Ю. М., Давтян А. Б., Григорьева О. И. Транспортно-технологические системы для лесоразведения на базе гусеничных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 400—403.
19. Рунова Е. М., Гринько О. И., Григорьева О. И. Глобальные проблемы лесных пожаров 2021 г. и восстановление лесов // Комплексные вопросы аграрной науки и образования: Сб. науч. ст. по материалам Внутривуз. научно-практич. конф., посвящённой 65-летию Высшего аграрного образования Республики Саха (Якутия) и Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2021». Якутск, 2021. С. 341—348.
20. Григорьев И. В., Давтян А. Б., Григорьева О. И. Выбор системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием,

посвящённой 255-летию Землеустройства Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 271—278.

21. Математическая модель выбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / О. Б. Марков, Р. В. Воронов, А. Б. Давтян [и др.] // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2021. № 1. С. 16—26.
22. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / Р. В. Воронов, О. Б. Марков, И. В. Григорьев [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2019. № 5 (371). С. 125—134.
23. *Григорьева О. И., Давтян А. Б.* Эффективная технология расчистки древесно-кустарниковой растительности // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Седьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием*. Петрозаводск, 2021. С. 34—35.
24. *Григорьев И. В., Чураков А. А., Григорьева О. И.* Перспективная конструкция вездехода для лесного хозяйства // *Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф.* / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2017. С. 136—139.
25. Прогнозная модель послепожарного лесовосстановления в Иркутской области / О. И. Григорьева, О. И. Гринько, И. В. Григорьев [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т. 13, № 1 (49). С. 85—98.
26. *Григорьева О. И., Гринько О. И., Николаева Ф. В.* Лесопожарные транспортно-технологические комплексы на базе колёсных форвардеров // *Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф.* / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2021. С. 55—58.
27. Оценка экологической безопасности работы лесных машин / А. И. Никифорова, О. И. Григорьева, Д. С. Киселев [и др.] // *Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: Материалы Междунар. научно-практич. форума*. Хабаровск, 2013. С. 134—138.
28. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию / А. И. Никифорова, Е. Г. Хитров, А. А. Пелымский [и др.] // *Учёные записки Петрозаводского государственного университета*. 2014. № 2 (139). С. 87—91.
29. *Григорьева О. И.* Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 25—29.
30. О важности исследований экологической эффективности процесса трелёвки / А. В. Калистратов, О. И. Григорьева, Г. В. Григорьев [и др.] // *Наука, образование, инновации в приграничном регионе: Материалы Республикан. научно-практич. конф.* Петрозаводск, 2015. С. 7—9.
31. Исследование роли мерзлотных экосистем в глобальном изменении климата / Т. Х. Максимов, Б. И. Иванов, Н. Г. Соломонов [и др.] // *Влияние климатических и экологических изменений на мерзлотные экосистемы: Тр. Второй междунар. конф. «Роль мерзлотных экосистем в глобальном изменении климата»* / Ред.: Б. И. Иванов, Т. Х. Максимов. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. С. 9—33.
32. *Гаврилова М. К.* Теплобалансовые исследования в лесах Сибири // *Влияние климатических и экологических изменений на мерзлотные экосистемы: Тр. Второй междунар. конф. «Роль мерзлотных экосистем в глобальном изменении климата»* / Ред.: Б. И. Иванов, Т. Х. Максимов. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. С. 41—55.

33. Хахина А. М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колёсных лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук / ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова». Архангельск, 2018.
34. Хитров Е. Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук / ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова». Архангельск, 2020.
35. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: ЛТА, 2006. 236 с.
36. Должиков И. С., Зорин М. В., Рудов С. Е. Минимизация воздействия техники на почвогрунты на особо защитных участках // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Девятой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2023. С. 73—74.
37. Особенности лесных почвогрунтов криолитозоны как объекта воздействия движителей лесных машин / В. А. Каляшов, И. В. Григорьев, В. А. Иванов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 94—101.
38. Рудов С. Е. Особенности строения мерзлотных почвогрунтов как опорных поверхностей движения лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Пятой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2019. С. 90—92.
39. Методика и аппаратура экспериментальных исследований динамики температур слоёв лесного почвогрунта криолитозоны / М. С. Новиков, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС (Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения). Якутск, 2022. С. 760—767.
40. Григорьев И. В., Никифорова А. И., Григорьева О. И. Сравнение одномашинных комплексов для сортиментной заготовки древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-2 (20-2). С. 125—128.
41. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Чураков А. А. Эффективные технологии и системы машин для малообъёмных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61—66.
42. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. И. Никифорова [и др.] // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 109—116.
43. Григорьев И. В., Григорьев М. Ф., Степанова Д. И. Перспективы модульных систем машин для лесозаготовительного производства в Якутии // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 9 (35). С. 74—77.
44. Пути повышения эффективности работы лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55—63.
45. Никифорова А. И., Григорьева О. И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4 (16-4). С. 320—323.
46. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации / И. В. Григорьев, А. И. Жукова, О. И. Григорьева [и др.]. СПб.: Изд-во ЛТА, 2008. 176 с.

47. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Взаимодействие гусеничного движителя с почвогрунтом при значительном продольном смещении центров давления // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы Научно-техн. конф. СПб., 2016. С. 124—127.
48. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, О. И. Григорьева [и др.] // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности: Материалы Республикан. научно-практич. конф., посвящённой 75-летию ПетрГУ. Петрозаводск, 2015. С. 9—11.
49. Агейкин Я. С. Пройодимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
50. Ларин В. В. Теория движения полноприводных колёсных машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 391 с.
51. Шапиро В. Я., Григорьев И. В. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. № 2 (14). С. 94—100.
52. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Особенности динамического уплотнения почвы при её циклическом нагружении // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 3 (30). С. 286—293.
53. Григорьев И. В., Шапиро В. Я., Жукова А. И. Исследование процесса уплотнения почвогрунтов с учётом динамики трелёвочной системы на базе колёсного лесопромышленного трактора // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. / Под общ. ред. А. Я. Панфилова. Брянск, 2006. Вып. 14. С. 3—11.
54. 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.
55. ГОСТ 19912-2012: Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. Дата введения: 2013-11-01.
56. Расчёт показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелёвке пачки хлыстов / И. В. Григорьев, В. А. Макуев, В. Я. Шапиро [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2013. № 2. С. 112—118.
57. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелёвочного волока с учётом изменчивости трассы движения / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Д. В. Лепилин [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6 (111). С. 61—64.
58. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трелёвочной системы с волоком / И. В. Григорьев, М. В. Цыгарова, А. И. Жукова [и др.] // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 47—54.
59. Математическая модель уплотняющего воздействия динамики поворота лесозаготовительной машины на боковые полосы трелёвочного волока / И. В. Григорьев, А. Б. Былев, А. М. Хахина [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 8-1 (129). С. 72—77.
60. Математическая модель уплотнения почвы комлями пачки хлыстов при их трелёвке / И. В. Григорьев, В. Я. Шапиро, М. Е. Рудов [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 6 (127). С. 65—69.
61. Анисимов Г. М., Григорьев И. В., Жукова А. И. Экологическая эффективность трелёвочных тракторов. СПб.: СПб ГЛТА, 2006. 352 с.

62. Влияние деформации движителей колёсно-гусеничных машин на их проходимость по лесосеке / С. М. Базаров, И. В. Григорьев, Д. С. Киселев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4 (16). С. 36—40.
63. The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding / I. Grigorev, O. Burmistrova, M. Stepanishcheva [et al.] // 14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014. Sofia, 2014. P. 501—508.
64. Validation of ecological efficiency assessment for forest management methodology / I. Grigorev, V. Ivanov, O. Burmistrova [et al.] // 14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014. Sofia, 2014. P. 521—528.
65. Цвей А. Ю. Лекции с примерами расчёта по специальному курсу строительной механики. М.: МАДИ, 2014. 97 с.

References

1. Grigoreva O. I., Starovoitova A. S., Makuyev V. A., Tikhonov E. A., Kolominova M. V., Grigorev I. V. Comparison of approaches to the typology of forest plantations in Russia and European countries. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3 (55), pp. 71—77. (In Russ.)
2. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Rudov S. E. Features of interaction of forest machines with permafrost soils. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the IV All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2018, pp. 187—188. (In Russ.)
3. Rudov S. E., Voronova A. M., Chemshikova J. M., Teterevleva E. V., Kruchinin I. N., Dondokov Yu. Zh., Khaldeeva M. N., Burtseva I. A., Danilov V. V., Grigorev I. V. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 61—75.
4. Rudov S. E., Grigorev I. V., Grigorev M. F., Stepanova D. I. Improving the efficiency of wheeled forestry machines on thawing soils. *Actual problems of the development of the forest complex: Materials of the XVII International Scientific and Technical Conference*. The responsible editor is Yu. M. Avdeev. Vologda, 2019, pp. 223—225. (In Russ.)
5. Rudov S. E., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Efficiency of forest management in the cryolithozone. *Energy efficiency and energy conservation in modern production and society: Materials of the international scientific and practical conference*. Voronezh, 2020, pp. 460—463. (In Russ.)
6. Grigorev G. V., Dmitrieva I. N., Grigorev I. V., Kalyashov V. A., Rudov S. E., Ivanov V. A. Problems and prospects of logging production in permafrost distribution areas. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 3 (51), pp. 59—67. (In Russ.)
7. Teterevleva E. V., Grinko O. I., Grigoreva O. I. Transport-technological machines for extinguishing forest fires based on wheeled all-terrain vehicles. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Editor N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 374—377. (In Russ.)
8. Grigoreva O. I., Davtyan A. B., Grinko O. I., Voynash S. A. The concept of a universal machine for performing forestry work and extinguishing forest fires. *Mechanical engineering: new concepts and technologies: All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. Krasnoyarsk, 2020, pp. 45—49. (In Russ.)
9. Grigoreva O. I., Davtyan A. B., Grinko O. I. Prospects of import substitution in the production of forestry and forest fire fighting machines in Russia. *Forest exploitation and integrated use*

- of wood: *Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, 2020, pp. 66—69. (In Russ.)
10. Grigoreva O. I., Makuyev V. A., Baryshnikova E. V., Burmistrova O. N., Shvetsova V. V., Grigorev I. V., Ivanov V. A. Prospects for import substitution of machine systems for artificial reforestation. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3 (55), pp. 78—84. (In Russ.)
 11. Kovalev R. N., Enaleeva-Bandura I. M., Baranov A. N., Lozovoy V. A., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Method of evaluating the effectiveness of reforestation measures taking into account the parameters of the forest transportation network. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 4 (56), pp. 64—71. (In Russ.)
 12. Manukovsky A. Yu., Zorin M. V., Grigoreva O. I., Davtyan A. B., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Perspective forestry machine. *Priority directions of innovative activity in industry: Collection of scientific articles based on the results of the sixth international scientific conference*. Kazan, 2020, pp. 141—143. (In Russ.)
 13. Safin R. R., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Razumov E. Y. *Technology and machines of reforestation: Textbook*. Moscow, Woodworking industry, 2015. 230 p. (In Russ.)
 14. Safin R. R., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Razumov E. Y. *Fundamentals of forestry: Textbook*. Moscow, Woodworking industry, 2015. 170 p. (In Russ.)
 15. Grigoreva O. I. Efficiency of transport and technological systems for forestry. *Transport and transport and technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 79—83. (In Russ.)
 16. Rudov S. E., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Effective restoration of forests on permafrost. *Forest engineering, materials science and design: Materials of the 86th Scientific and technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 38—41. (In Russ.)
 17. Grigoreva O. I., Rudov S. E. Promising ways to increase the marketable value of cryolithozone forest plantations. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Fifth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2019, pp. 29—31. (In Russ.)
 18. Chemshikova Yu. M., Davtyan A. B., Grigoreva O. I. Transport and technological systems for afforestation based on tracked all-terrain vehicles. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Editor N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 400—403. (In Russ.)
 19. Runova E. M., Grinko O. I., Grigoreva O. I. Global problems of forest fires in 2021 and forest restoration. *Complex issues of agrarian science and education: Collection of scientific articles based on the materials of the Intra-university scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of Higher Agricultural Education in the Republic of Sakha (Yakutia) and the All-Russian student scientific and practical conference with international participation within the framework of the «Northern Forum — 2021»*. Yakutsk, 2021, pp. 341—348. (In Russ.)
 20. Grigorev I. V., Davtyan A. B., Grigoreva O. I. Choosing a system of machines for the creation and operation of forest plantations. *Land management, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects of development: A collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 255th anniversary of Land Management in Yakutia and the Year of Science and Technology*. Yakutsk, 2021, pp. 271—278. (In Russ.)
 21. Markov O. B., Voronov R. V., Davtyan A. B., Grigorev I. V., Kalita G. A. Mathematical model of choosing a system of machines for the creation and operation of forest plantations. *The woodworking industry*, 2021, no. 1, pp. 16—26. (In Russ.)

22. Voronov R. V., Markov O. B., Grigorev I. V., Davtyan A. B. Mathematical model of the modular principle of selecting a system of machines for the creation and operation of forest plantations. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2019, no. 5 (371), pp. 125—134. (In Russ.)
23. Grigoreva O. I., Davtyan A. B. Effective technology of clearing of woody and shrubby vegetation. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Seventh All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2021, pp. 34—35. (In Russ.)
24. Grigorev I. V., Churakov A. A., Grigoreva O. I. Perspective design of an all-terrain vehicle for forestry. *Transport and transport-technological systems: Materials of the international scientific and technical conference*. Editor N. S. Zakharov. Tyumen, 2017, pp. 136—139. (In Russ.)
25. Grigoreva O. I., Grinko O. I., Grigorev I. V., Kalita E. G., Tikhonov E. A. Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region. *Forestry Journal*, 2023, vol. 13, no. 1 (49), pp. 85—98. (In Russ.)
26. Grigoreva O. I., Grinko O. I., Nikolaeva F. V. Forest fire transport and technological complexes based on wheeled forwarders. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Editor N. S. Zakharov. Tyumen, 2021, pp. 55—58. (In Russ.)
27. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kiselyov D. S., Khakhina A. M., Rudov M. E. Assessment of environmental safety of forest machinery. *Natural resources and ecology of the Far Eastern region: Materials of the International Scientific and Practical Forum*. Khabarovsk, 2013, pp. 134—138. (In Russ.)
28. Nikiforova A. I., Khitrov E. G., Pelymsky A. A., Grigoreva O. I. Determination of precipitation during the movement of a logging machine on a two-layer base. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2014, no. 2 (139), pp. 87—91. (In Russ.)
29. Grigoreva O. I. Features of natural reforestation in the conditions of the cryolithozone. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 25—29. (In Russ.)
30. Kalistratov A. V., Grigoreva O. I., Grigorev G. V., Dmitrieva I. N. On the importance of research on the environmental efficiency of the skidding process. *Science, education, innovations in the border region: Materials of the republican scientific and practical conference*. Petrozavodsk, 2015, pp. 7—9. (In Russ.)
31. Maksimov T. H., Ivanov B. I., Solomonov N. G., Takahashi K., Ota T., Dolman A. Y. Investigation of the role of permafrost ecosystems in global climate change. *Influence of climatic and environmental changes on permafrost ecosystems: Proceedings of the Second International Conference «The role of permafrost ecosystems in global change climate»*. Ed.: B. I. Ivanov, T. H. Maksimov. Yakutsk, YAF Publishing House SB RAS, 2003, pp. 9—33. (In Russ.)
32. Gavrilova M. K. Heat balance studies in the forests of Siberia. *The impact of climatic and environmental changes on permafrost ecosystems: Proceedings of the Second International Conference «The role of permafrost ecosystems in global climate change»*. Ed.: B. I. Ivanov, T. H. Maksimov. Yakutsk, YAF Publishing House SB RAS, 2003, pp. 41—55. (In Russ.)
33. Khakhina A. M. *Methods of forecasting and improving the patency of wheeled forest vehicles: Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov», Arkhangelsk, 2018. (In Russ.)

34. Khitrov E. G. *Complex substantiation of parameters and modes of operation of propellers of forest machines: Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov». Arkhangelsk, 2020. (In Russ.)
35. Grigorev I. V. *Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by substantiating their movement modes and technological equipment*. Saint Petersburg, LTA, 2006. 236 p. (In Russ.)
36. Dolzhikov I. S., Zorin M. V., Rudov S. E. Minimization of the impact of technology on soils in especially protective areas. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Ninth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2023, pp. 73—74. (In Russ.)
37. Kalyashov V. A., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Yudilevich A. M., Burmistrova O. N., Okhlopko M. K., Grigoreva O. I. Features of forest soils of the cryolithozone as an object of influence of propellers of forest machines. *System. Methods. Technologies*, 2023, no. 4 (60), pp. 94—101. (In Russ.)
38. Rudov S. E. Features of the structure of permafrost soils as support surfaces for the movement of forest machines. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Fifth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2019, pp. 90—92. (In Russ.)
39. Novikov M. S., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Kalyashov V. A. Methodology and equipment for experimental studies of temperature dynamics of the layers of the forest soil of the cryolithozone. *Strategy and prospects for the development of agrotechnologies and the forest complex of Yakutia until 2050: A collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut ASSR and the 85th anniversary of the First President of the RS (Ya) M. E. Nikolaev (Nikolaev Readings)*. Yakutsk, 2022, pp. 760—767. (In Russ.)
40. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Comparison of single-machine complexes for grading wood. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 125—128. (In Russ.)
41. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Churakov A. A. Effective technologies and machine systems for low-volume wood blanks. *Energy: economics, technology, ecology*, 2018, no. 2, pp. 61—66. (In Russ.)
42. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Nikiforova A. I., Glukhovskiy V. M. Promising directions for the development of technological processes of logging operations. *Proceedings of BSTU. No. 2. Forestry and woodworking industry*, 2016, no. 2 (184), pp. 109—116. (In Russ.)
43. Grigorev I. V., Grigorev M.F., Stepanova D. I. Prospects of modular machine systems for logging production in Yakutia. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2017, vol. 5, no. 9 (35), pp. 74—77. (In Russ.)
44. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. Ways to improve the efficiency of forest machines. *Energy: economics, technology, ecology*, 2020, no. 1, pp. 55—63. (In Russ.)
45. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Modeling of the impact of forest machinery movers on the soils of logging areas. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 5-4 (16-4), pp. 320—323. (In Russ.)
46. Grigorev I. V., Zhukova A. I., Grigoreva O. I., Ivanov A. V. *Environmental technologies for the development of cutting areas in the conditions of the North-Western region of the Russian Federation*. Saint Petersburg, LTA Publishing House, 2008. 176 p. (In Russ.)

47. Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V. The interaction of a caterpillar mover with a soil with a significant longitudinal displacement of pressure centers. *Forests of Russia: politics, industry, science, education: Materials of the scientific and technical conference*. Saint Petersburg, 2016, pp. 124—127. (In Russ.)
48. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Grigoreva O. I., Rudov M. E. Search for new technical solutions to improve the environmental compatibility of forest machines with the forest environment. *Intensification of the formation and protection of intellectual property: Materials of the republican scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of PetrSU*. Petrozavodsk, 2015, pp. 9—11. (In Russ.)
49. Ageikin Ya. S. *The patency of cars*. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 232 p. (In Russ.)
50. Larin V. V. *Theory of motion of four-wheel drive wheeled vehicles*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2010. 391 p. (In Russ.)
51. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V. Deformation and cyclic compaction of soil between ground hooks of large-sized forest tires. *Technique and technology*, 2006, no. 2 (14), pp. 94—100. (In Russ.)
52. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Zhukova A. I. Features of dynamic soil compaction under its cyclic loading. *Actual problems of modern science*, 2006, no. 3 (30), pp. 286—293. (In Russ.)
53. Grigorev I. V., Shapiro V. Ya., Zhukova A. I. Investigation of the soil compaction process taking into account the dynamics of a skidding system based on a wheeled timber tractor. *Collection of scientific papers «Actual problems of the forest complex» under*. Edited by A. Ya. Panfilov. Bryansk, 2006, issue 14, pp. 3—11. (In Russ.)
54. 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.
55. GOST 19912-2012: Soils. Methods of field tests by static and dynamic probing. Date of introduction: 2013-11-01. (In Russ.)
56. Grigorev I. V., Makuyev V. A., Shapiro V. Ya., Rudov M. E., Nikiforova A. I. Calculation of indicators of the soil compaction process during skidding of a pack of khlystov. *Bulletin of the Moscow State University of the Forest — Forest Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 112—118. (In Russ.)
57. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Lepilin D. V., Zhukova A. I. Modeling of soil compaction in the side lanes of a skidding portage, taking into account the variability of the traffic route. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2010, no. 6 (111), pp. 61—64. (In Russ.)
58. Grigorev I. V., Tsygarova M. V., Zhukova A. I., Lepilin D. V., Esin G. Yu. Experiment planning in the study of the interaction of a skidding system with a fiber. *Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Environmental management*, 2011, no. 2, pp. 47—54. (In Russ.)
59. Grigorev I. V., Bylev A. B., Khakhina A. M., Nikiforova A. I. Mathematical model of the compacting effect of the dynamics of the rotation of a logging machine on the side strips of a skidding portage. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2012, no. 8-1 (129), pp. 72—77. (In Russ.)
60. Grigorev I. V., Shapiro V. Ya., Rudov M. E., Nikiforova A. I. Mathematical model of soil compaction with lumps of a pack of whips during their skidding. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2012, no. 6 (127), pp. 65—69. (In Russ.)
61. Anisimov G. M., Grigorev I. V., Zhukova A. I. *Ecological efficiency of skidding tractors*. Saint Petersburg, SPb GLTA, 2006. 352 p. (In Russ.)
62. Bazarov S. M., Grigorev I. V., Kiselyov D. S., Nikiforova A. I., Ivanov A. V. The influence of deformation of the propellers of wheeled tracked vehicles on their patency in the cutting area. *Systems. Methods. Technologies*, 2012, no. 4 (16), pp. 36—40. (In Russ.)

63. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding. *14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014*. Sofia, 2014, pp. 501—508.
64. Grigorev I., Ivanov V., Burmistrova O., Stepanishcheva M. Validation of ecological efficiency assessment for forest management methodology. *14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014*. Sofia, 2014, pp. 521—528.
65. Tsvey A. Yu. *Lectures with calculation examples for a special course in structural mechanics*. Moscow, MADI, 2014. 97 p. (In Russ.)

© Дьяченко В. М., Должиков И. С., Хитров Е. Г., Куницкая О. А.,
Барышникова Е. В., Анисимов Е. Е., 2025