



Оценка работоспособности трелевочного волока на склоне с учетом армирующего влияния насыщенного корнями слоя почвогрунта при взаимодействии колесной лесной машины

Владимир Я. Шапиро¹, shapiro54vlad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Игорь В. Григорьев², silver73@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Ярослав А. Рыжов³, irosmagelav@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>

Евгений А. Тихонов⁴, tihonov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Павел Н. Перфильев⁵, savadf0706@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок., д. 13, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

⁵ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

Во многих субъектах Российской Федерации участки лесного фонда располагаются не только на равнинной местности, но и на склонах гор, сопок, холмисто-грядовых рельефов. Работа лесных машин в таких условиях значительно сложнее, чем на равнине, а сами леса на склонах наиболее чувствительны к негативному воздействию техники. Как и в равнинных лесах, на склонах необходимо проводить рубки, лесохозяйственные работы и противопожарное обустройство, что невозможно без использования специальных лесных машин. В настоящее время в России и в мире преобладают лесные машины на колёсной тракторной базе. Чрезмерное воздействие движителей на лесные почвогрунты на склонах может приводить не только к образованию колеи (как в равнинных лесах), но и к обрушению части склона, что создаёт чрезвычайно опасную ситуацию для персонала и техники. В статье теоретически обоснована необходимость учёта эффекта армирования почвогрунта корнями деревьев при взаимодействии движителя лесной машины с поверхностью движения на склоне. На основе экспериментальных данных установлено, что степень насыщения грунтово-корневого слоя корнями сосны μ достигает 0,65% при среднем диаметре ствола $d=0,3$ м и ширине волока $H=4$ м, а прирост удельного сцепления ΔC составляет до 70 кПа при $\mu=1,0\%$. Показано, что наличие корневой системы ($\mu>0,2\%$) переводит краевую часть массива склона в устойчивое состояние (коэффициент устойчивости $K_u>1$) и позволяет снизить глубину колеи с 0,4 м до нормативных 0,2 м. Глубина колеи обратно пропорциональна среднему диаметру деревьев вблизи волока: при $d=0,25$ м и более формирование колеи не превышает допустимых значений.

Выполненные исследования и оценки повышают надежность прогноза работоспособности трелевочного волока (технологического коридора), а также достоверность прогнозных показателей лесосечных и лесовосстановительных работ в сложных геотехнических условиях на склонах при использовании колёсных лесных машин или трелевочных систем на их базе.

Ключевые слова: трелевочный волок, склон, армирование корнями, устойчивость склона, глубина колеи, колесная лесная машина

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка работоспособности трелевочного волока на склоне с учетом армирующего влияния насыщенного корнями слоя почвогрунта при взаимодействии колесной лесной машины / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Я. А. Рыжов, Е. А. Тихонов, П. Н. Перфильев // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 247–257. – Библиогр.: с. 255–256 (19 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/16>.

Поступила 20.01.2026. Пересмотрена 15.03.2026. Принята 15.05.2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Article

Assessment of the performance of a skid trail on a slope considering the reinforcing effect of a root-saturated soil layer under the interaction of the wheels of a forest machine

Vladimir Ya. Shapiro¹, shapiro54vlad@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Igor V. Grigorev², silver73@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Yaroslav A. Ryzhov³,  irosmagelav@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>

Evgeny A. Tikhonov⁴, tikhonov@petsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Pavel N. Perfiliev⁵, savadf0706@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Institutsky Lane, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

² Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation

³ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

⁴ Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

⁵ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

In many constituent entities of the Russian Federation, forest fund areas are located not only on flat terrain, but also on slopes of mountains, hills, and hilly-ridge landforms. The operation of forest machines in such conditions is much more difficult than on flat terrain, and forests on slopes are most sensitive to the negative impact of machinery. As in flat forests, logging, forestry work, and fire protection arrangements are necessary on slopes, which is impossible without the use of special forest machines. Currently, wheeled forest machines based on tractor chassis predominate in Russia and worldwide. Excessive impact of propellers on forest soils on slopes can lead not only to rut formation (as in flat forests), but also to slope collapse, which creates an extremely dangerous situation for personnel and equipment. The article theoretically substantiates the need to take into account the effect of soil reinforcement by tree roots when considering the interaction of a forest machine propeller with the movement surface on a slope. Based on experimental data, it has been established that the degree of saturation of the soil-root layer with pine roots μ reaches 0.65% with an average trunk diameter of $d = 0.3$ m and a trail width of $H = 4$ m, and the increase in specific cohesion ΔC reaches up to 70 kPa at $\mu = 1.0\%$. It is shown that the presence of a root system ($\mu > 0.2\%$) transfers the edge part of the slope massif to a stable state (stability coefficient $K_y > 1$) and reduces the rut depth from 0.4 m to the standard value of 0.2 m. The rut depth is inversely proportional to the average diameter of trees near the trail: at $d = 0.25$ m or more, rut formation does not exceed permissible values. The performed research and assessments increase the reliability of predicting the operability of a skidding trail (technological corridor), as well as the reliability of predictive indicators of logging and reforestation works in complex geotechnical conditions on slopes when using wheeled forest machines or skidding systems based on them.

Keywords: *skidding trail, slope, root reinforcement, slope stability, rut depth, wheeled forest machine*

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Ryzhov Ya. A., Tikhonov E. A., Perfiliev P. N. (2026) Assessment of the performance of a skid trail on a slope considering the reinforcing effect of a root-saturated soil layer under the interaction of the wheels of a forest machine. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 247–257 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/16>.

Received 20.01.2026.

Revised 15.03. 2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Вопросы устойчивости и эффективности работы лесных машин на склонах и в условиях слабонесущих почвогрунтов остаются одними из наиболее актуальных в лесозаготовительной науке [1]. Исследованиям взаимодействия колёсных движителей с опорной поверхностью на склонах посвящены работы, в которых разработаны методики учёта буксования, маневрирования и циклических нагрузок [2, 3]. Применение комбинированных движителей позволяет существенно снизить глубину колеи по сравнению с чисто колёсными [4].

Подход к анализу динамических режимов взаимодействия колеса с препятствием недавно предложен в робототехнике. Вводится параметр $S_c = H_{\max}/R$ – отношение максимальной преодолеваемой высоты препятствия к радиусу колеса, а для оценки контактных усилий используется баланс потенциальной энергии [4]. Показано, что пассивно-трансформируемые колёса позволяют достичь $S_c \approx 2,5$, тогда как обычные колёса ограничены $S_c \approx 1$. По аналогии в настоящей работе предлагается модифицированный критерий $\lambda = H/H_{\text{кл}}$, где H – глубина колеи, а $H_{\text{кл}}$ – клиренс форвардера.

Полевые исследования показывают, что трелёвочный волок неоднороден по длине: выделяется до восьми типов участков, включая участки с пнём в месте прохода колеса и участки, расположенные непосредственно за пнём [5]. Это требует перехода от усреднённых моделей к локальному учёту препятствий.

Моделирование деформации почвогрунта под воздействием лесных машин с использованием методов машинного обучения и учётом близости пней показывает, что расстояние до пня является статистически значимым предиктором глубины колеи [7]. Экспериментально установлено, что многократные проходы форвардера приводят к нелинейному росту глубины колеи, а после 8–10 проходов на слабых грунтах проходимость практически теряется [8].

Влияние корневых систем древесной растительности на устойчивость склонов исследовано в работах, где показано, что армирующий эффект корней может увеличивать несущую способность грунта на 30–50% [9]. Лабораторные исследования подтверждают, что

наличие корневой системы существенно повышает прочность на сдвиг [10].

Теоретический расчёт несущей способности связного грунта по конусному индексу и механическим свойствам представлен в работе [11]. Оптимизация шага грунтозацепов гусеничных лесных машин для чувствительных почвогрунтов рассмотрена в исследовании [12]. Разработана методика экспериментальных исследований по оценке эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами, позволяющая комплексно оценить воздействие движителя на опорную поверхность [13].

Важным фактором, влияющим на работоспособность трелёвочного волока на склонах в криолитозоне и зоне сезонного промерзания, являются изменения прочностных характеристик грунтов при оттаивании. Как показано в работе [14], в процессе оттаивания дисперсных грунтов происходит резкое снижение сцепления и угла внутреннего трения, что требует учёта нестационарных свойств почвогрунта при многопроходном воздействии колёс лесных машин. Кроме того, взаимодействие колеса с твёрдыми препятствиями (пни, корни, валуны) на трелёвочном волоке сопровождается концентрацией контактных напряжений. В монографии [15] изложены основные подходы к решению контактных задач механики разрушения, которые могут быть адаптированы для оценки предельной глубины колеи при наезде на препятствие с учётом упруго-пластических деформаций грунтового массива.

Интеграция данных CAN-шины для оценки сопротивления качению форвардера в реальных условиях предложена в исследовании [16].

При оценке проходимости форвардера на склонах важным фактором является распределение нагрузки между осями. На примере восьмиколёсного форвардера показано, что при трелёвке в гору с полной нагрузкой (16 т) и уклоне до 68% критической разгрузки передней оси не происходит, однако при уклоне 41% задняя ось достигает предельно допустимой нагрузки по шинам [6]. Минимальный индекс конуса для экологически приемлемой трелёвки составляет 950 кПа, а предельное буксование 25% принято как критерий предотвращения эрозионных процессов на склонах.

Эффект армирования почвогрунта корнями деревьев широко признан в мировой науке как один из ключевых факторов устойчивости склонов и несущей способности грунтовых массивов. В обзорной работе [17] показано, что корневая система увеличивает прочность грунта на сдвиг за счёт комбинированного действия крупных и мелких корней. Классическая модель Ву – Вальдрона описывает это армирование как дополнительное сцепление, добавляемое в критерий прочности Мора – Кулона.

Количественная оценка армирования почвогрунта корнями растений является актуальной задачей в геотехнике и инженерной экологии. На примере трёх видов травянистых растений показано, что корневое армирование зависит не только от плотности корней, но и от их прочности на разрыв [18]. Суммарное корневое армирование от трёх видов повысило коэффициент запаса устойчивости склона с 1,522 до 1,851 (на 21,6%). Армирующий эффект распределён по глубине: наибольшая плотность корней в слое 0–0,5 м, умеренная — в слое 0,5–1,5 м и минимальная — в слое 1,5–2,0 м. Коэффициент запаса устойчивости склона при этом увеличился на 16% [19]. В настоящей работе аналогичный подход реализован для армирования склона корневой системой сосны: вводится параметр μ (степень насыщения грунта корнями) и прирост удельного сцепления ΔC , зависящий от μ .

Цель работы — разработка математической модели образования колеи при последовательном взаимодействии колёсных пар форвардера с твёрдыми препятствиями (пнями, камнями) на трелёвочном волокне с учётом влажности почвогрунта и армирующего влияния корневой системы. В отличие от существующих статических моделей, в данной работе учитывается ударный характер нагружения при наезде на препятствие, эффект буксования, армирующее влияние корневой системы, а также последовательный (многопроходный) характер деформации почвогрунта.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования степени насыщения μ , % корнями сосны грунтово-корневого слоя массива слабых глинистых грунтов с влажностью W , % на границе текучести, показали, что параметр μ зависит от среднестатистических размеров диаметра d , м ствола деревьев и расстояния L , м между ними (таблица 1).

Таблица 1

Влияние диаметра деревьев и расстояния между ними на параметр μ [12]

Table 1

The effect of the diameter of trees and the distance between them on the parameter μ [12]

d, м	Степень насыщенности грунтово-корневого слоя корнями сосны μ , %		
	L=4 м	L=5 м	L=6 м
0,1	0,07	0,05	0,03
0,2	0,30	0,19	0,13
0,3	0,65	0,42	0,29
0,4	1,05	0,67	0,47
0,5	1,22	0,78	0,54

Для наглядности данные таблицы 1 представлены графически (рисунок 1), где отложено расстояние L , м, диаметр d , м, и параметр μ , %.

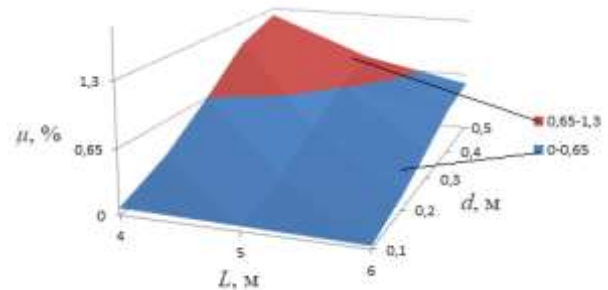


Рисунок 1. График зависимости параметра μ от размеров L и d

Figure 1. Graph of the dependence of the parameter μ on the dimensions L and d

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Как следует из анализа данных таблицы 1 и рисунка 1, применительно к наиболее типовым размерам ширины трелевочного волокна $H=4-5$ м и среднего диаметра деревьев $d=0,1-0,3$ м значения параметра μ не выходят за пределы 0,65%.

Таким образом, при фиксированной ширине трелевочного волокна определяющим параметром армирования почвогрунта корнями деревьев является значение их среднего диаметра.

На рисунке 2 представлены зависимости показателя μ , % от диаметра d , м, при $H=4$ м и $H=5$ м, которые с высокой степенью детерминации описываются функциями прямой.

Как видим, по мере роста среднего диаметра деревьев d прямые расходятся, что позволяет сделать вывод о целесообразности минимизации параметра H с целью более интенсивного армирования слоя почвогрунта в пределах трелевочного волокна или технологического коридора.

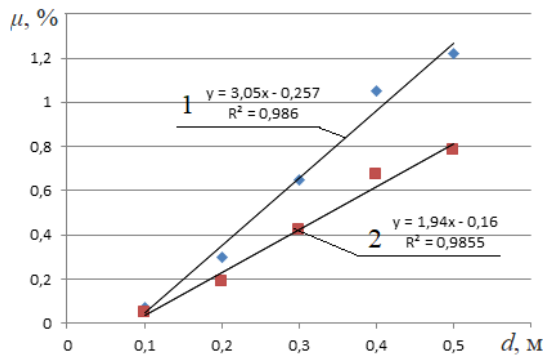


Рисунок 2. Влияние среднего диаметра ствола деревьев на параметр μ :

1 - $H=4$ м; 2 - $H=5$ м

Figure 2. The influence of the average diameter of the tree trunk on the parameter μ :

1 - $H=4$ m; 2 - $H=5$ m

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Армирование почвогрунта корнями деревьев сосны обуславливает, как установлено в ходе экспериментальных исследований [12], прирост величины удельного сцепления ΔC , кПа грунто-корневого слоя краевой части массива (таблица 2).

Таблица 2. Влияние параметра μ на прирост величины удельного сцепления [12]

Table 2. The effect of the parameter μ on the increase in the value of specific adhesion [12]

μ , %	0,05	0,10	0,20	0,50	1,0
ΔC , кПа	3,5	7,0	14,0	35,0	70,0

Данные таблицы 2 представлены графически на рисунке 4.

Если принять во внимание опытные данные [13, 14] по определению параметров паспорта прочности - величины сцепления C , кПа и угла внутреннего трения φ , $^{\circ}$ влагонасыщенных глинистых грунтов с показателем влажности W более 32%, слагающих массив на склоне, то можно заключить, что величина прироста ΔC даже при относительно небольших значениях $\mu=0,1-0,2\%$ соизмерима с базовыми значениями удельного сцепления $C=6-12$ кПа для почвогрунтов, не содержащих какой-либо развитой корневой системы.

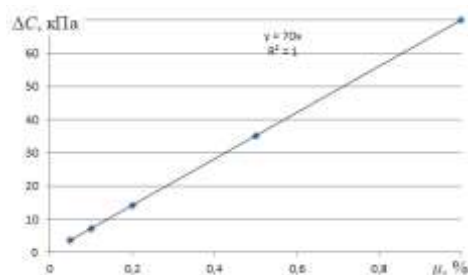


Рисунок 4. Зависимость прироста величины удельного сцепления армированного корнями почвогрунта от параметра μ

Figure 4. Dependence of the increase in the value of the specific adhesion of the root-reinforced soil on the parameter

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

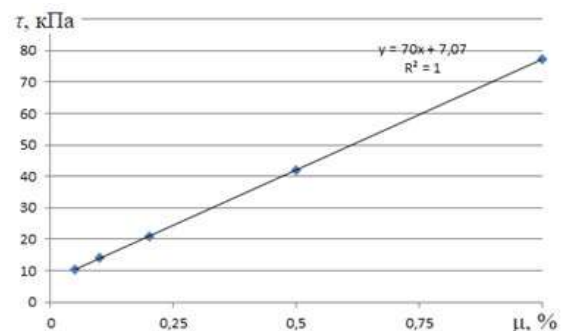
Полученные результаты позволяют в соответствии с положениями стандарта [15] оценить величину предела прочности τ армированного слоя почвогрунта на срез:

$$\tau = C + \Delta C + p \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где $p = \frac{Q}{S} \cos \alpha$ - вертикальное давление на верхний слой почвогрунта, которое оказывает на него груженная с общим весом Q колесная лесная машина в пределах пятна контакта площадью S на склоне с углом наклона α к линии горизонта.

Результаты

Выполнена оценка влияния степени насыщения μ слоя почвогрунта корневой системой сосны на величину предела прочности на срез τ . В качестве почвогрунта принят переувлажнённый суглинок с влажностью W , близкой к пределу текучести $W_t = 40\%$, при которой проявляется эффект солифлюкции, а параметры паспорта прочности снижаются до значений: $C = 4,1$ кПа, $\varphi = 4,25^{\circ}$. В расчётах использованы следующие исходные данные воздействия лесной машины на почвогрунт: $Q = 14$ т, $S = 0,309$ м 2 , $\alpha = 20^{\circ}$, $p = 42,58$ кПа.



На рисунке 4 представлен график функции $\tau(\mu)$.

Рисунок 4. График функции $\tau(\mu)$

Источник: собственная композиция авторов / Source: author's composition

Линии, изображённые на рисунках 2 и 3, параллельны, имеют одинаковый угловой коэффициент $k = 70$ и отстоят друг от друга на величину 7,07 кПа. Следовательно, увеличение предела прочности на срез тармированного корневой системой слоя почвогрунта обусловлено приростом его удельного сцепления, который зависит от степени насыщения грунтово-корневого слоя корнями деревьев.

Необходимым условием работоспособности трелёвочного волокна или технологического коридора является обеспечение устойчивости краевой части массива склона. В соответствии с положениями [13, 14] введён коэффициент устойчивости K_y , который при отсутствии слоя воды в основании склона определяется соотношением:

$$K_y = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{C + \Delta C}{p \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{\tau}{p \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2)$$

Таким образом, устойчивость армированного корнями слоя почвогрунта зависит от трёх параметров: предела прочности на срез τ , величины давления p и угла наклона склона α . При $K_y > 1$ краевая часть массива считается устойчивой, при $K_y < 1$ — неустойчивой. Диапазон значений $1,0 \div 1,1$ соответствует состоянию предельного равновесия массива.

На рисунке 5 (линия 1) приведена зависимость коэффициента устойчивости K_y от степени армирования слоя почвогрунта корнями μ (%). Линия 2 определяет границу состояния предельного равновесия. Исходные данные соответствуют условиям, принятым при определении величины τ .

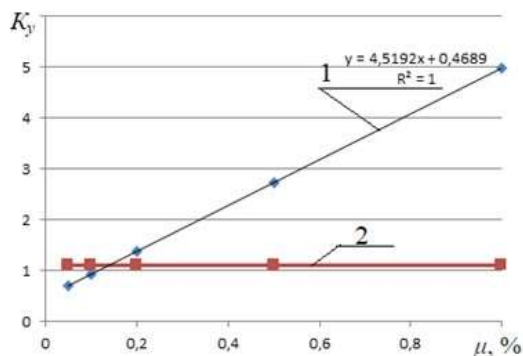


Рисунок 5. Влияние степени армирования верхнего слоя почвогрунта на его устойчивость
Figure 5. The effect of the degree of reinforcement of the upper soil layer on its stability

Источник: собственная композиция авторов / Source: author's composition

Для рассмотренного расчётного случая при $\mu > 0,2\%$ краевая часть массива почвогрунта склона соответствует условиям устойчивости. Даже относительно небольшое присутствие развитой корневой системы деревьев способствует повышению прочности верхнего грунтово-корневого слоя и, следовательно, работоспособности трелёвочного волокна.

Из анализа соотношения (2) следует, что при заданной нагрузке на массив почвогрунта устойчивость его краевой части определяется двумя параметрами – углом наклона склона α и

пределом прочности на срез τ , который в соответствии с данными рисунка 4 зависит от параметра μ и подчиняется функциональной зависимости:

$$\tau = 70\mu + 7,07. \quad (3)$$

Установленное влияние угла наклона склона α (°) на коэффициент устойчивости K_y (рисунок 6) при трёх уровнях насыщения грунтово-корневого слоя почвогрунта корневой системой деревьев – $\mu = 0,05\%$ (линия 1), $\mu = 0,1\%$ (линия 2) и $\mu = 0,2\%$ (линия 3) – позволяет сделать следующие выводы:

- наибольшее снижение K_y наблюдается для пологих и покатых склонов в диапазоне изменения угла α от 10 до 20°, после чего поведение графика $K_y(\mu)$ приближается к асимптотическому затуханию;
- при четырёхкратном увеличении степени армирования слоя почвогрунта корнями от $\mu = 0,05$ до $\mu = 0,2\%$ нижняя граница области устойчивости склона (линия 4) повышается, а допустимый диапазон крутизны склона расширяется от $\alpha = 14$ до 25°.

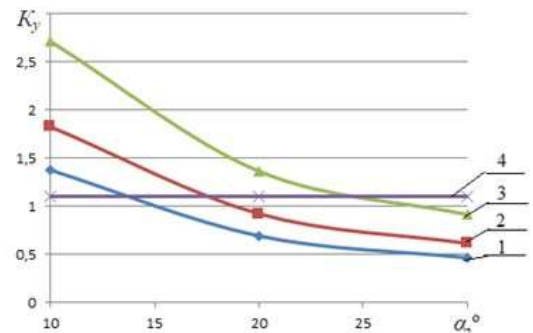


Рисунок 6. Совместное влияние состояния корневой системы и крутизны склона на его устойчивость:

1 – $\mu = 0,05\%$; 2 – $\mu = 0,1\%$; 3 – $\mu = 0,2\%$; 4 – нижняя граница области устойчивости склона
Figure 6. The combined effect of the condition of the root system and the steepness of the slope on its stability:

1 – $\mu = 0.05\%$; 2 – $\mu = 0.1\%$; 3 – $\mu = 0.2\%$; 4 – the lower boundary of the slope stability area

Источник: собственная композиция авторов / Source: author's composition

Устойчивость склона является необходимым, но недостаточным условием обеспечения работоспособности трелёвочного волокна или технологического коридора при использовании колёсной лесной машины или трелёвочной системы. Достаточность достигается

формированием колеи, глубина которой h не превышает нормативного значения $h_n = 0,2$ м.

Глубина колеи h определена на основе математической модели разрушения сплошной среды с внутренним трением [16, 17], которая, как отмечено в [11, 12], наиболее адекватно отражает наличие корневой системы в краевой части массива почвогрунта:

$$h = a \left(\frac{q}{\tau} \right)^{1-\gamma/2}, \quad (4)$$

где введены следующие обозначения:

- a – радиус зоны контактного сближения круглого индентора (шины) радиусом R под нагрузкой Q с армированным почвогрунтом, упругопластические свойства которого характеризуются коэффициентом Пуассона ν и модулем общей деформации E [18];
- $\gamma = \frac{\nu}{1-\nu}$ – коэффициент бокового распора;
- $q = \gamma p$ – горизонтальное давление сдвига, действующее на слой почвогрунта.

На рисунке 7 приведены результаты расчётов глубины колеи h (м) в зависимости от параметра μ насыщения почвогрунта корневой системой деревьев (%). Расчёты выполнены для следующих геотехнических условий:

- переувлажнённый суглинок с влажностью, близкой к состоянию солифлюкции: $W = 40\%$, $\nu = 0,4$, $E = 200$ кПа;
- параметры взаимодействия колёсной лесной машины на склоне: $Q = 14$ т, $S = 0,309$ м², $\alpha = 20^\circ$, $p = 42,58$ кПа, $R = 0,41$ м, $a = 0,23$ м.

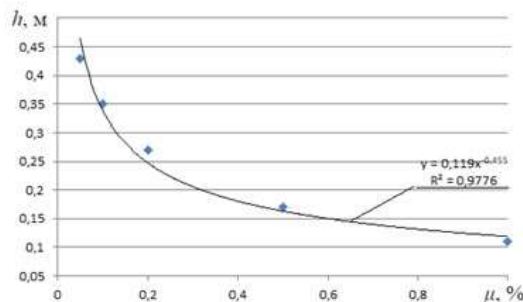


Рисунок 7. Изменение глубины колеи с ростом насыщения почвогрунта корнями деревьев
Figure 7. Changes in track depth with increasing saturation of the soil with tree roots

Источник: собственная композиция авторов / Source: author's composition

Из данных, представленных на рисунке 7, следует, что при отсутствии корневой системы ($\mu = 0$) глубина колеи превышает 0,4 м, что требует корректировки параметров загрузки лесной машины и применения гусеничных лент для снижения давления на почвогрунт до значений $p = 10 \div 14$ кПа. Наличие корневой системы и реализация её армирующей функции повышают несущую способность грунтово-корневого слоя,

что способствует формированию колеи глубиной, не превышающей нормативного значения 0,2 м.

Обсуждение

В рассматриваемом диапазоне инженерно-геотехнических условий функционирования колесных лесных машин, включая трелевочные системы, агрегируемые на их базе, при отсутствии в приповерхностном горизонте почвогрунта выраженного корненасыщенного слоя глубина формируемой технологической колеи способна превышать 0,4 м. Достижение указанного уровня деформационного преобразования опорной поверхности свидетельствует о существенном снижении эксплуатационной пригодности трелевочного волокна и, как следствие, предопределяет необходимость корректировки режимно-нагрузочных параметров работы машины. В подобных условиях технически и технологически обоснованным становится применение специальных средств снижения контактных напряжений, в частности колесных движителей, оснащенных гусеничными лентами, обеспечивающими многократное уменьшение удельного давления на почвогрунт до уровня 10–14 кПа.

Существенное значение в механизме сопротивления деформационному разрушению лесного почвогрунта имеет развитая корневая система древесной растительности, выполняющая функцию природного пространственно распределенного армирующего каркаса. Наличие корненасыщенного горизонта обуславливает повышение структурной связности грунтового массива, увеличение его сопротивления сдвигу, а также перераспределение локальных напряжений, возникающих в зоне контакта колесного движителя с опорной поверхностью. В совокупности указанные эффекты способствуют ограничению интенсивности пластических деформаций, снижению темпов колесобразования и стабилизации эксплуатационного состояния трелевочного волокна.

Особую значимость рассматриваемые процессы приобретают в условиях склонового рельефа, где взаимодействие движителя с почвогрунтом протекает под воздействием как нормальных, так и касательных составляющих внешней нагрузки. Наличие продольной компоненты силы тяжести, ориентированной вдоль поверхности склона, интенсифицирует сдвиговые деформации в приповерхностном горизонте, повышает вероятность локального нарушения целостности почвогрунта и ускоряет развитие колеи. В этой связи армирующее влияние корневых систем следует рассматривать как один из определяющих факторов обеспечения работоспособности трелевочного волокна на склоновых участках.

С учетом того, что диаметр ствола дерева находится в функциональной связи с иными таксационными характеристиками древесной растительности, прежде всего с высотой, возрастом и параметрами развития корневой системы, данный показатель может быть использован в качестве косвенного диагностического индикатора степени корненасыщенности почвогрунта. В методическом отношении использование среднего диаметра стволов деревьев как расчетно-оценочного признака представляется обоснованным при проведении таксационных, инженерно-лесотехнических и инженерно-экологических исследований на участках лесного фонда, приуроченных к склоновым формам рельефа.

Полученная и представленная на рисунке 8 корреляционная зависимость $h(d)$, характеризующаяся высокой степенью детерминации, позволяет сделать вывод о наличии статистически значимой и практически интерпретируемой связи между глубиной колеи и средним диаметром стволов древесной растительности.

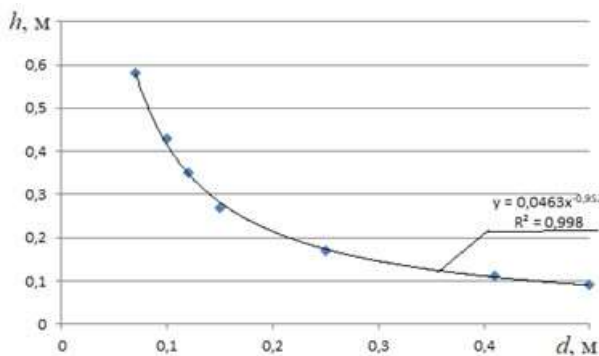


Рисунок 8. Влияние диаметра деревьев вблизи трелевочного волока (технологического коридора) на глубину его колеи

Figure 8. Influence of the diameter of trees near the skidding portage (technological corridor) on the depth of its track

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Это дает основание при выполнении прикладных инженерных оценок исходить из положения о том, что глубина колееобразования находится в обратной зависимости от среднего диаметра стволов деревьев на рассматриваемом участке. Установленная зависимость может быть использована при прогнозировании работоспособности трелевочного волока на склонах, обосновании допустимых режимов эксплуатации колесных лесных машин, выборе направлений прокладки технологических

коридоров и назначении мероприятий по снижению отрицательного техногенного воздействия на лесной почвогрунт.

Заключение

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что корневая система сосны оказывает существенное армирующее воздействие на грунтово-корневой слой склона, которое количественно описывается параметром степени насыщения μ приростом удельного сцепления ΔC . Показано, что параметр μ зависит от среднего диаметра ствола деревьев d и расстояния между ними L , а при типовых значениях ширины трелевочного волока $H = 4 \div 5$ м и $d = 0,1 \div 0,3$ м величина μ не превышает 0,65%. При этом прирост удельного сцепления ΔC даже при $\mu = 0,1 \div 0,2\%$ соизмерим с базовым сцеплением $C = 6 \div 12$ кПа для грунтов без развитой корневой системы.

Разработана методика расчёта предела прочности на срез армированного слоя почвогрунта с использованием модифицированного критерия Мора – Кулона, учитывающего дополнительное сцепление от корней. Введён коэффициент устойчивости K_y , позволяющий оценить состояние краевой части массива склона. Установлено, что при $\mu > 0,2\%$ склон переходит в устойчивое состояние ($K_y > 1$), а армирующий эффект корней повышает допустимый угол крутизны склона с 14 до 25°.

Определено, что глубина колеи h экспоненциально снижается с ростом степени насыщения μ . При отсутствии корней ($\mu = 0$) глубина колеи превышает 0,4 м, что требует снижения нагрузки на движитель и применения гусеничных лент. Наличие корневой системы ($\mu > 0,2\%$) обеспечивает глубину колеи в пределах нормативного значения 0,2 м. Установлена обратная пропорциональная зависимость глубины колеи от среднего диаметра стволов деревьев вблизи волока: при $d > 0,25$ м глубина колеи не превышает допустимых значений, тогда как при $d = 0,05 \div 0,1$ м (молодые деревья) глубина колеи может достигать клиренса машины.

Практическая значимость результатов заключается в возможности прогнозирования несущей способности склонов и глубины колеи на основе таксационных параметров древостоя (средний диаметр стволов, расстояние между деревьями, ширина волока). Полученные зависимости позволяют обосновать необходимость сохранения корневой системы деревьев вблизи трелевочных волоков для повышения их работоспособности и снижения экологического ущерба.

Список литературы

1. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Федоров В.И., Задраускайте Н.О., Египко С.В., Дьячковский Д.А. Взаимодействие колёсного движителя с почвогрунтом на склоне, с учётом эффекта буксования // *Resources and Technology*. 2025; 22 (3): 184-202. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8903>
2. Дмитриев А.С., Должиков И.С., Куницкая О.А., Дьяченко В.М., Гурьев А.Ю., Кривошеев А.А. Экспериментальные исследования воздействия колёсно-гусеничного движителя на лесные почвогрунты // *Resources and Technology*. 2025; 22 (2): 17-50. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8004>
3. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Новиков М.С., Перфильев П.Н., Друзьянова В.П., Макуев В.А. Особенности взаимодействия движителя лесной машины при маневрировании на склоне криолитозоны при циклических нагрузках // *Resources and Technology*. 2025; 22 (2): 128-148. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8603>
4. Zheng C., Sane S., Lee K., Kalyanram V., Lee K. α -WaLTR: Adaptive Wheel-and-Leg Transformable Robot for Versatile Multiterrain Locomotion // *IEEE Transactions on Robotics*. 2023; 39 (2): 941-958. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3226114>
5. Piskunov M. Influence of Stump Root System of Trees on Rut Formation During Forwarder Operation on Peat Soils // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2023; 44 (2): 217-231. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2116>
6. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance // *Forests*. 2023; 14 (1): 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010103>
7. Grube G., Grigolato S., Ala-Ilomäki J., Routa J., Lindeman H., Astrup R., Talbot B. Modelling machine-induced soil deformation in forest soils using stump proximity and machine learning // *Biosystems Engineering*. 2025; 258: 104255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104255>
8. Pandur Z., Kopseak H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2022; 15 (6): 476-483. DOI: <https://doi.org/10.3832/for4138-015>
9. Корякин В.Н., Козыренко Н.А., Брагин А.Д. Влияние корневых систем древесной растительности на устойчивость склонов // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. 2023; (2): 45-53.
10. Калинин М.Д., Сергеева Т.В., Рукомойников К.П. Лабораторные исследования несущей способности армированного корнями почвогрунта // *Лесотехнический журнал*. 2023; 13 (2): 89-101.
11. Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В. и др. Теоретический расчет несущей способности связного грунта по конусному индексу и механическим свойствам // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2019; (226): 111-123. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.226.111-123>
12. Болотин Д.В., Кокшаров М.А., Жук А.Ю., Андронов А.В. Задача оптимизации шага грунтозацепов гусеничных лесных машин для чувствительных почвогрунтов // *Системы. Методы. Технологии*. 2026; (1): 137-143. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2026-1-137-143>
13. Мисуно Ю.И. Методика экспериментальных исследований по оценке эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2021; (1): 132-140.
14. Царапов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2007; (6): 31-34.
15. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»; 2010. 544 с.
16. Guerra F., Marzini S., Sforza F., Wagner T., Marinello F., Grigolato S. Exploring the reliability of CAN-bus data in assessing forwarder rolling resistance under real working conditions // *iForest*. 2024; 17: 360-369. DOI: <https://doi.org/10.3832/for4687-017>
17. Masi E.B., Segoni S., Tofani V. Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review // *Geosciences*. 2021; 11 (5): 212. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11050212>
18. Yin W., Pan Y., Yang M., Li Z. The root reinforcement on the slope under the condition of colonization of various herbaceous plants // *Heliyon*. 2024; 10 (17): e37108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37108>
19. Chavez Torres J.L., Feng T., Zhang K., Kookalani S. Ecological Engineering Contributions to Slope Stability Through Root Reinforcement in Diverse Soils // *Applied Sciences*. 2025; 15 (21): 11810. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152111810>

References

1. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Fedorov V.I., Zadrauskaite N.O., Eypko S.V., Dyachkovsky D.A. Vzaimodeystvie kolesnogo dvizhitelya s pochvogruntom na sklone, s uchetom effekta buksovaniya. [Interaction of a wheeled propulsion system with the soil on a slope, taking into account the skidding effect]. *Resources and Technology*. 2025;22(3):184-202. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8903>.

2. Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Dyachenko V.M., Guryev A.Yu., Krivosheev A.A. Eksperimentalnye issledovaniya vozdeystviya kolesno-gusenichnogo dvizhitelya na lesnye pochvogruty. [Experimental studies of the impact of a wheeled-tracked propulsion system on forest soils]. Resources and Technology. 2025;22(2):17-50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8004>.
3. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Novikov M.S., Perfiliev P.N., Druzyanova V.P., Makuev V.A. Osobennosti vzaimodeystviya dvizhitelya lesnoy mashiny pri manevrirovanii na sklone kriolitozony pri tsiklicheskikh nagruzkakh. [Features of interaction of a forest machine propulsion system during maneuvering on a slope of the cryolithozone under cyclic loads]. Resources and Technology. 2025;22(2):128-148. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8603>.
4. Zheng C., Sane S., Lee K., Kalyanram V., Lee K. α -WaLTR: Adaptive Wheel-and-Leg Transformable Robot for Versatile Multiterrain Locomotion. IEEE Transactions on Robotics. 2023;39(2):941-958. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3226114>.
5. Piskunov M. Influence of Stump Root System of Trees on Rut Formation During Forwarder Operation on Peat Soils. Croatian Journal of Forest Engineering. 2023;44(2):217-231. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2116>.
6. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance. Forests. 2023;14(1):103. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010103>.
7. Grube G., Grigolato S., Ala-Ilomäki J., Routa J., Lindeman H., Astrup R., Talbot B. Modelling machine-induced soil deformation in forest soils using stump proximity and machine learning. Biosystems Engineering. 2025;258:104255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104255>.
8. Pandur Z., Kopseak H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. iForest – Biogeosciences and Forestry. 2022;15(6):476-483. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer4138-015>.
9. Koryakin V.N., Kozyrenko N.A., Bragin A.D. Vliyanie kornevykh sistem drevesnoy rastitelnosti na ustoychivost sklonov. [Influence of tree root systems on slope stability]. Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 2023;(2):45-53. (In Russ.).
10. Kalinin M.D., Sergeeva T.V., Rukomoynikov K.P. Laboratornye issledovaniya nesushchey sposobnosti armirovannogo kornyami pochvogrunta. [Laboratory studies of the bearing capacity of root-reinforced soil]. Lesotekhnicheskii zhurnal. 2023;13(2):89-101. (In Russ.).
11. Khitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., et al. Teoreticheskiy raschet nesushchey sposobnosti svyaznogo grunta po konusnomu indeksu i mekhanicheskim svoystvam. [Theoretical calculation of the bearing capacity of cohesive soil by cone index and mechanical properties]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2019;(226):111-123. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.226.111-123>.
12. Bolotin D.V., Koksharov M.A., Zhuk A.Yu., Andronov A.V. Zadacha optimizatsii shaga gruntozatsepov gusenichnykh lesnykh mashin dlya chuvstvitelnykh pochvogruntoy. [Optimization problem of track grouser pitch for sensitive forest soils]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2026;(1):137-143. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2026-1-137-143>.
13. Misuno Yu.I. Metodika eksperimentalnykh issledovaniy po otsenke ekspluatatsionno-ekologicheskoy sovmestimosti lesnykh mashin s pochvogrunami. [Methodology of experimental studies for assessing the operational and ecological compatibility of forest machines with soils]. Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyаемых ресурсов. 2021;(1):132-140. (In Russ.).
14. Tsarapov M.N. Formirovanie prochnostnykh kharakteristik gruntov v protsesse ottaivaniya. [Formation of soil strength characteristics during thawing]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya. 2007;(6):31-34. (In Russ.).
15. Morozov E.M., Zernin M.V. Kontaktnye zadachi mekhaniki razrusheniya. [Contact problems of fracture mechanics]. 2nd ed. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM»; 2010. 544 p. (In Russ.).
16. Guerra F., Marzini S., Sforza F., Wagner T., Marinello F., Grigolato S. Exploring the reliability of CAN-bus data in assessing forwarder rolling resistance under real working conditions. iForest. 2024;17:360-369. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer4687-017>.
17. Masi E.B., Segoni S., Tofani V. Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review. Geosciences. 2021;11(5):212. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11050212>.
18. Yin W., Pan Y., Yang M., Li Z. The root reinforcement on the slope under the condition of colonization of various herbaceous plants. Heliyon. 2024;10(17):e37108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37108>.
19. Chavez Torres J.L., Feng T., Zhang K., Kookalani S. Ecological Engineering Contributions to Slope Stability Through Root Reinforcement in Diverse Soils. Applied Sciences. 2025;15(21):11810. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152111810>.

Сведения об авторах

Шапиро Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок, д. 13, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Рыжов Ярослав Андреевич* – аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>, e-mail: irosmagelav@mail.ru.

Тихонов Евгений Андреевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Перфильев Павел Николаевич – кандидат технических наук, зав. кафедрой лесопромышленных производств и обработки материалов ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

Information about the authors

Vladimir Ya. Shapiro – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Institutsky Lane, 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Igor V. Grigorev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Yaroslav A. Ryzhov* – graduate student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>, e-mail: irosmagelav@mail.ru.

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Pavel N. Perfiliev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Timber Industry and Materials Processing of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

✉ – Для контактов / Corresponding author