



## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ МАШИН И ТРЕЛЕВОЧНЫХ СИСТЕМ С ПОЧВОГРУНТОМ ПРИ РАБОТЕ НА СКЛОНАХ

Виталий А. Каляшов<sup>1</sup>, vit832@yandex.ru, 0000-0002-8145-7058

Владимир Я. Шапиро<sup>2</sup>, shapiro54vlad@mail.ru, 0000-0002-6344-1239

Игорь В. Григорьев<sup>3</sup>, silver73@inbox.ru, 0000-0002-5574-1725

Ольга А. Куницкая<sup>3</sup>, ola.ola07@mail.ru, 0000-0001-8542-9380

Ольга И. Григорьева<sup>2</sup>, grigoreva\_o@list.ru, 0000-0001-5937-0813

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., 4, г. Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Республика Саха (Якутия), шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

В Российской Федерации значительная часть территории лесного фонда расположена на вечной мерзлоте. Леса на вечной мерзлоте играют глобальную экологическую роль, депонируя большое количество углерода. Однако при достижении возраста перестойного леса, при распаде насаждения этот углерод выбрасывается в атмосферу. Поэтому с экологической точки зрения леса на вечной мерзлоте необходимо рубить по достижении возраста спелости, с соблюдением требований по их восстановлению. Многие перечисленные регионы обладают большими запасами спелых и перестойных эксплуатационных лесов, причем значительная часть этих запасов расположена в труднодоступных местах, не только по отношению к развитости дорожной сети, но и по рельефу местности. В настоящее время подавляющий объем заготовок древесины в России производится при помощи современных машинных комплексов, в основном включающих колесные лесные машины различной компоновки и назначения (харвестеры, форвардеры, скиддеры и т.д.). При помощи специальных технических решений, таких как интегрированные в трансмиссию лебедки или самоходные лебедки (T-winch, ROB), эти машины с успехом могут эксплуатироваться и на достаточно крутых склонах. При этом проблема негативного воздействия колесных лесных машин и трелевочных систем на их базе не просто остается актуальной, а приобретает еще большую остроту, поскольку экосистемы горных лесов, лесов на склонах сопков и т.д. относятся к наиболее ранимым, подверженным водной и ветровой эрозии. В статье представлена разработанная математическая модель, позволяющая обоснованно произвести оценку динамического воздействия колесной лесной машины (трелевочной системы) на почвогрунт при работе на склонах с учетом основных технических и технологических факторов.

**Ключевые слова:** леса на склонах, лесосечные работы, трелевка, почвогрунты, леса на вечной мерзлоте


**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.


**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

*Для цитирования:* Каляшов В. А. Математическое моделирование процесса динамического взаимодействия лесных машин и трелевочных систем с почвогрунтом при работе на склонах / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 12. – № 1 (45). – С. 82–95. – Библиогр.: с. 91–94 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/7>.


*Поступила:* 27.01.2022 *Принята к публикации:* 28.03.2022 *Опубликована онлайн:* 01.04.2022


## MATHEMATICAL MODELING OF THE DYNAMIC INTERACTION OF FOREST MACHINES AND SKIDDER SYSTEMS WITH THE SOIL WHEN WORKING ON SLOPES

Vitaly A. Kalyashov<sup>1</sup>, vit832@yandex.ru, 0000-0002-8145-7058

Vladimir Y. Shapiro<sup>2</sup>, shapiro54vlad@mail.ru, 0000-0002-6344-1239

Igor V. Grigoriev<sup>3</sup>, silver73@inbox.ru, 0000-0002-5574-1725

Olga A. Kunitskaya<sup>3</sup>, ola.ola07@mail.ru, 0000-0001-8542-9380

Olga I. Grigorieva<sup>2</sup>, grigoreva\_o@list.ru, 0000-0001-5937-0813

<sup>1</sup>St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Красноармейская str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

<sup>2</sup>St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, 5, Institutsky lane, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

<sup>3</sup>Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d. 3, Yakutsk, 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

### Abstract

In the Russian Federation, a significant part of the forest fund is located on the permafrost. Permafrost forests play a global ecological role by depositing large amounts of carbon. However, when a forest reaches the age of obsolescence, this carbon is released into the atmosphere as it decays. Therefore, from an ecological point of view, permafrost forests should be cut down when they reach the age of maturity, in compliance with the requirements for their restoration. Many of these regions have large reserves of mature and overmature commercial forests, and a significant portion of these reserves are located in places difficult to access, not only in relation to the development of road networks, but also on the terrain. At present the overwhelming majority of timber felling in Russia is performed with the help of modern machinery complexes, which mainly include wheeled forestry machines of different layout and purpose (harvesters, forwarders, skidders, etc.). With the help of special technical solutions, such as winches integrated into the transmission, or self-propelled winches (T-winch, ROB), these machines can be successfully operated on fairly steep slopes. The problem of negative effect of wheeled forest machines and skidding systems based on them not only remains actual, but becomes even more urgent, as the ecosystems of mountain forests, forests on slopes of hills, etc. are the most vulnerable and exposed to water and wind erosion. The developed mathematical model, which allows evaluating the dynamic impact of a wheeled forestry machine (skidder system) on the ground while working on slopes with taking into account the main technical and technological factors, is presented in the article.

**Keywords:** forests on slopes, logging operations, skidding, soils, forests on permafrost

**Acknowledgments:** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

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

**For citation:** Kalyashov V.A., Shapiro V.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. (2022) Mathematical modeling of the dynamic interaction of forest machines and skidder systems with the soil when working on slopes. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forest Engineering journal]*, Vol. 12, No. 1 (45), pp. 82-95 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/7>.

*Received:* 27.01.2022 *Revised:* 27.02.2022 *Accepted:* 28.03.2022 *Published online:* 01.04.2022

## Введение.

Вопросы повышения эффективности проведения лесосечных работ на склонах гор и сопок, с соблюдением баланса экономического эффекта и сохранения экосистемы этих лесов, обеспечения оптимальных условий для последующего восстановления, являются очень актуальными в настоящее время, особенно для регионов Сибири и Дальнего Востока [1-7]. В этих регионах значительная часть запасов спелых и перестойных эксплуатационных лесов произрастает на вечной мерзлоте, что вносит свою существенную специфику в процесс лесосечных работ, транспорта леса, и лесовосстановления [8-10].

При производстве лесосечных работ на различных склонах - крутых и протяженных, называемых по классификации длинными, с гребнями и раздробленными, а также ряда других при больших углах наклона  $\alpha$  (от  $15^\circ$  и более) возникают сложные геотехнические условия взаимодействия движителя лесной машины, или трелевочной системы с краевой частью массива почвогрунта.

Математическая модель статического взаимодействия штампа с краевой частью массива грунта рассмотрена в работах [11, 18, 19], в которой установлены закономерности развития процесса разрушения в пределах заданной трассы движения и получены основные соотношения для определения глубины колен.

Эти же процессы, но при циклических (многократных) нагрузках на почву при проходе движителя по одну и тому же участку волока изучены в [12, 13]. Однократные и циклические процессы взаимодействия при лесосечных работах на мерзлых и оттаивающих грунтах подробно рассмотрены в [14, 15].

Динамические процессы взаимодействия движителей лесных машин и почвогрунта на равнинных участках исследованы в работе [16, 20, 21].

Вопросу статического взаимодействия движителя лесной машины, или трелевочной системы с краевой частью массива при лесозаготовках на склонах посвящена работа [17].

Отметим основные положения, развитые в [16], где разработанная и реализованная динамическая модель позволила выявить особенности коле-

бательных процессов движения с тремя степенями свободы: вертикальными перемещениями, продольно-угловыми и поперечно-угловыми перемещениями кузова. В итоге определены факторы и критерии усиления воздействия колесной лесной машины (трелевочной системы на ее базе) на почвогрунт.

## Материалы и методы.

Основываясь на ранее полученных результатах, рассмотрим задачу динамического взаимодействия движителя колесной лесной машины, или трелевочной системы с почвогрунтом при лесосечных работах на склонах.

На рисунке 1 представлена схема динамической двухосной лесной машины.

Вес лесной машины  $1$  (сила  $Q$ ) приложен к ее центру тяжести в точке  $O$  и направлена вдоль оси  $z$ , воздействуя через шины  $2$  на почву  $3$ . Представленную на рисунке 1 систему, будем рассматривать с симметричной подвеской, причем все жесткости и вязкости имеют линейные характеристики с коэффициентами жесткости  $m_i$  и коэффициентами сопротивления шин  $\mu_i$ ,  $i=1, 2$ .

При наезде на микронеровность профиля волока  $4$  колеса  $2$  переместятся на величины  $p_i$ , а центр тяжести – на величину  $z$ . Перемещения во времени  $t$ , равные  $p_i = f(t - \tau_i)$ , являются случайными функциями воздействия от профиля волока к движителю, причем время запаздывания  $\tau_i$  определяется как:

$$\tau_i = \frac{l_1 - l_i}{v}, \quad (1)$$

где:  $l_1$  – расстояние от линии центра лесной машины до линии оси  $5$  передней пары  $2$  колес (параметр базы системы);  $l_i$  – то же расстояние до оси в общем случае  $i$ -го колеса;  $v$  – скорость движения.

При рассмотрении задач взаимодействия и оценки уплотнения почвогрунта под действием динамических нагрузок требуется определить частотные характеристики колебательного процесса - скорости колебаний  $\dot{x}(t)$ , в связи с тем, что с квадратом этой величины связана кинетическая энергия динамического воздействия, а также возникающие напряжения динамического удара колес по почвогрунту [16].

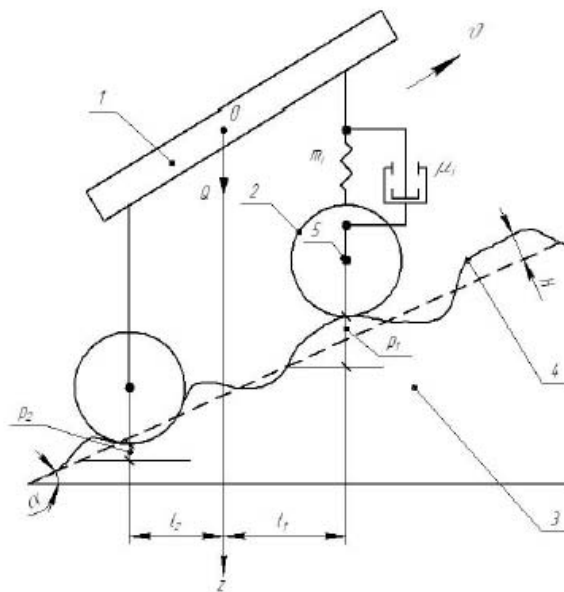


Рисунок 1. Схема динамической двухосной системы колесной лесной машины (трелевочной системы)

Figure 1. Diagram of a dynamic biaxial system of a wheeled forest machine (skidder system)

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

Изображение скорости линейных вертикальных колебаний является произведением передаточной функции скорости  $W(s)$  на изображение  $F(s)$  функции воздействия  $f(t)$ . Для рассматриваемой системы передаточная функция равна:

$$W_z(s) = \frac{c \sum_{i=1}^{2n} (\mu_i s + m_i)}{m_p s^2 + a_1 s + a_2}, \quad (2)$$

где:  $c = \sum_{i=1}^{2n} e^{-\tau_i s}$ ;  $m_p$  – поддрессоренная масса ко-

лесной лесной машины (трелевочной системы), которая в расчетах принята равной весу  $Q$ ;  $a_1 = \frac{1}{m_p} \sum_{i=1}^{2n} \mu_i$ ;  $a_2 = \frac{1}{m_p} \sum_{i=1}^{2n} m_i$ .

Пусть профиль волока представляет собой внешнее синусоидальное воздействие, вида:

$$f(t) = H \sin \omega_1 t, \quad (3)$$

где:  $H$  – максимальная амплитуда отклонения профиля волока от условной горизонта, проведенного через самую низкую точку профиля;  $\omega_1$  – частота внешнего воздействия (вынужденных колебаний) волока.

Тогда изображения данного воздействия можно записать в виде:

$$F(s) = H \frac{\omega_1}{s^2 + \omega_1^2}. \quad (4)$$

В конечном итоге, с учетом (1)-(4), получено соотношение для определения  $\mathcal{Z}(s)$ :

$$\mathcal{Z}(s) = \frac{cH \omega_1 \sum_{i=1}^{2n} (\mu_i s + m_i)}{m_p s^2 + \omega_1^2 s^2 + a_1 s + a_2}. \quad (5)$$

Для перехода от передаточной функции к частотной характеристике достаточно принять  $s = i\omega$ . Вещественная часть комплексного выражения (5) будет являться действительной амплитудно-частотной характеристикой скорости вертикальных колебаний, которую обозначим как  $A_{\mathcal{A}}(i\omega)$ :

$$A_{\mathcal{A}}(i\omega) = \frac{H \omega_1}{m_p} \sqrt{\frac{K_{\omega}^2 + C_{\omega}^2}{M_{\omega}^2 + N_{\omega}^2}}, \quad (6)$$

где:  $K_{\omega}$ ,  $C_{\omega}$ ,  $M_{\omega}$  и  $N_{\omega}$  – коэффициенты, определяемые из соотношений:

$$\begin{aligned}
 K_{\omega} &= \sum_{i=1}^{2n} [\omega m_i \sin(\tau_i, \omega) - \mu_i \omega^2 \cos(\tau_i, \omega)]; \\
 C_{\omega} &= \sum_{i=1}^{2n} [\omega m_i \cos(\tau_i, \omega) - \mu_i \omega^2 \sin(\tau_i, \omega)]; \quad (7) \\
 M_{\omega} &= (\omega_1^2 - \omega^2)(a_2 - \omega^2); \\
 N_{\omega} &= (\omega_1^2 - \omega^2)a_1 \omega.
 \end{aligned}$$

Отношение величины  $A_{\kappa}(i\omega)$  к  $H$ , которое приводит к введению параметра  $\bar{A}_{\kappa}$ , принято называть коэффициентом демпфирования, он обуславливает оптимальный подбор собственных колебаний системы по отношению к вынужденным колебаниям и позволяет значительно уменьшить амплитуду скорости, что приводит к снижению силового динамического воздействия на почвогрунт.

В связи с этим величину  $K_{\omega} = (1 + \bar{A}_{\kappa} \cdot \cos\alpha)^2$  следует считать коэффициентом динамического усиления скорости амплитудных колебаний колесной лесной машины.

На рисунке 2 а представлена графическая зависимость коэффициента  $K_{\omega}$  (ось ординат) от без-

размерной величины  $\frac{\omega}{\omega_1}$  (ось абсцисс), которая свидетельствует о наличии двух процессов: стационарного до показателя  $\frac{\omega}{\omega_1} \leq 0,8$  и экспоненциального при  $\frac{\omega}{\omega_1} > 0,8$  (рисунок 2 б).

Как видим, по мере приближения к состоянию резонанса при  $\frac{\omega}{\omega_1} \rightarrow 1$  параметр  $K_{\omega}$  возрастаеткратно до 4-5 и более раз, что необходимо учитывать при изучении взаимодействия лесной машины (трелевочной системы) с краевой частью массива почвогрунта.

Данные рисунка 2 получены при следующих исходных (базовых) данных системы взаимодействия движителя колесной лесной машины с почвогрунтом:

$$\begin{aligned}
 \vartheta &= 10 \text{ км/ч} = 2,78 \text{ м/с}; \quad l_1 = 1,85 \text{ м}; \quad l_2 = -l_1 = -1,85 \text{ м}; \\
 \omega_1 &= \pi = 3,14; \quad m_1 = m_2 = 100 \cdot 10^3 \text{ кН/м}; \quad \mu_1 = \mu_2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кНс/м}; \\
 Q &= 20670 \text{ кг}, \quad H = 0,2 \text{ м}, \quad \alpha = 5^\circ \quad (8)
 \end{aligned}$$

Отметим, что показатель жесткости рессоры лесной машины изменяется в диапазоне от 100 до  $400 \cdot 10^3$  кН/м, а коэффициент сопротивления шин  $\mu$  от 1 до  $5 \cdot 10^{-2}$  кНс/м.

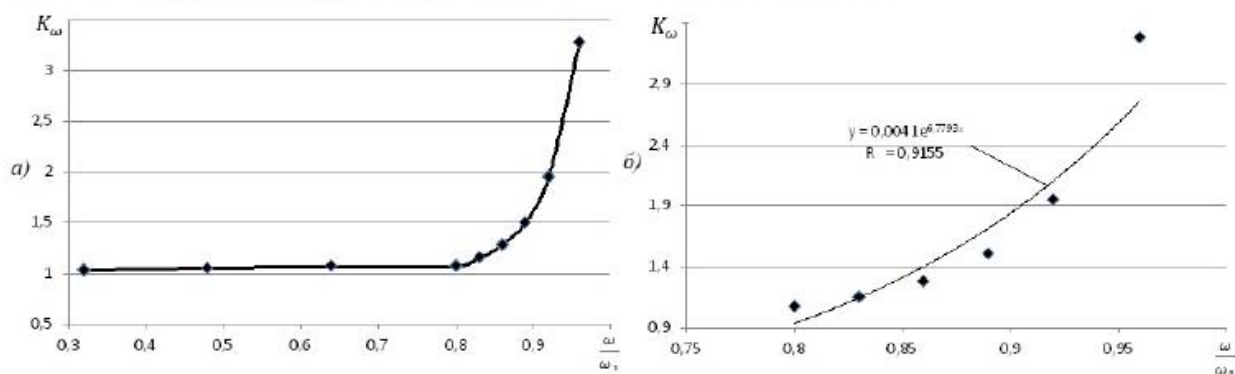


Рисунок 2. Зависимость коэффициента динамического усиления системы от отношения частот

Figure 2. Dependence of the dynamic gain of the system on the frequency ratio

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

### Результаты и обсуждение.

Вес лесной машины (трелевочной системы на ее базе) будем при расчетах варьировать в диапазоне от 10 до 22 т, параметр профиля  $H$  – от 0,05 до 0,3 м.

Зафиксируем параметр отношения частот  $\frac{\omega}{\omega_1} = 0,89$ , т.е. в диапазоне экспоненциального роста показателя  $K_{\omega}$ , и оценим влияние на него параметра базы  $l_1$  (рисунок 3, ось абсцисс, м).

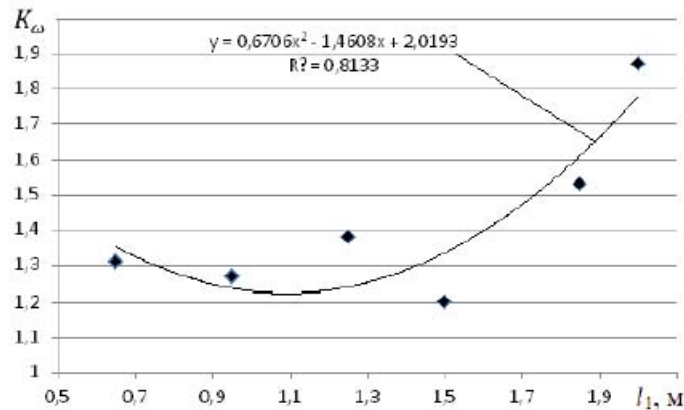


Рисунок 3. Влияние параметра базы на коэффициент динамического усиления

Figure 3. Influence of the base parameter on the dynamic gain

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

Согласно рисунку 3, по мере роста параметра базы коэффициент динамического усиления растет по полиномиальному закону.

Динамические нагрузки, передаваемые от шин лесной машины к почвогрунту, должны учитывать соотношение акустических жесткостей  $\lambda_1$  материалов сред, которые определяются как произведение их плотностей на скорости продольных волн.

Таким образом величину  $K_\omega$  необходимо умножить на коэффициент акустического преломления  $K_\lambda = \frac{2}{1+\lambda_1/\lambda_2}$ , где:  $\lambda_1$  – акустическая жесткость материала шины, равная, в частности, 1,2·1800 т/м<sup>2</sup>·с;  $\lambda_2$  – акустическая жесткость почвогрунта, которая, например, для ряда почвогрунтов равна 1,5·1100 т/м<sup>2</sup>·с. Для данного примера соотношений показателей акустических жесткостей сред взаимодействия имеем  $K_\lambda=0,87$ , т.е. динамические усилия, передаваемые от шин лесной машины в почвогрунт снижаются на 15-20%. По мере роста несущей способности почвогрунта и его акустической жесткости параметр  $K_\lambda$  растет, достигая 1, а для крепких почвогрунтов и превышая ее.

Объединяя оба критерия, введем результирующий коэффициент динамичности системы  $K_d = K_\omega K_\lambda$ , который учитывает как колебательный процесс, так и эффект акустического преломления динамического воздействия из одной среды в другую.

Зафиксируем  $\lambda_1 = 2160$  т/м<sup>2</sup>·с и исследуем влияние акустической жесткости почвогрунта на изменение критерия  $K_d$ .

На рисунке 4 при  $\frac{\omega}{\omega_1} = 0,83$  и базовых данных (8) представлена зависимость коэффициента динамичности  $K_d$  от параметра  $\lambda_2 \cdot 10^{-3}$  т/м<sup>2</sup>·с.

Очевидно, что установленная зависимость с высокой достоверностью подчиняется логарифмическому закону, т.е. имеет место асимптотическое ограничение  $K_d$  по мере роста показателя  $\lambda_2$ .

Рассмотрим вопрос о влиянии угла  $\alpha$  наклона поверхности склона на величину  $K_d$ . Для этого в базовых условиях (8)  $\alpha$  принимаем переменной в диапазоне от 5 до 35° при фиксированных значениях  $\frac{\omega}{\omega_1} = 0,83$  и  $K_\lambda = 1,29$ .

На рисунке 5 представлена полученная зависимость. Видно, что эффект динамического воздействия колесной лесной машины (трелевочной системы) на почвогрунт в направлении, перпендикулярном плоскости склона линейно снижается с ростом угла наклона последнего.

Динамическое воздействие колесной лесной машины (трелевочной системы) на почвогрунт зависит от параметров жесткости и демпфирования шин – показателей  $m$  и  $\mu$ .

Расчеты по определению зависимости величины  $K_d$  от  $m$  показали их стационарную связь: при росте  $m$  в 4 раза коэффициент  $K_d$  снизился с 1,29 до 1,28, т.е. менее, чем на 1%.

Влияние параметра  $\mu$  абсолютно иное.

Рисунок 6 отражает это влияние: на оси ординат  $-K_d$ , абсцисс  $-\mu \cdot 10^{-2}$  кНс/м и это влияние весьма существенное, подчиняясь линейному закону роста.

Параметры профиля поверхности движения оказывают существенное значение на величины амплитудно-частотных характеристик колебатель-

ного процесса, что в конечном итоге определяет характер протекания динамического воздействия колесной лесной машины (трелевочной системы) на почвогрунт.

Фактор частоты  $\omega_1$  профиля волока отражен на графических зависимостях рисунка 2, тогда как фактор параметра  $H$  - на рисунке 7.

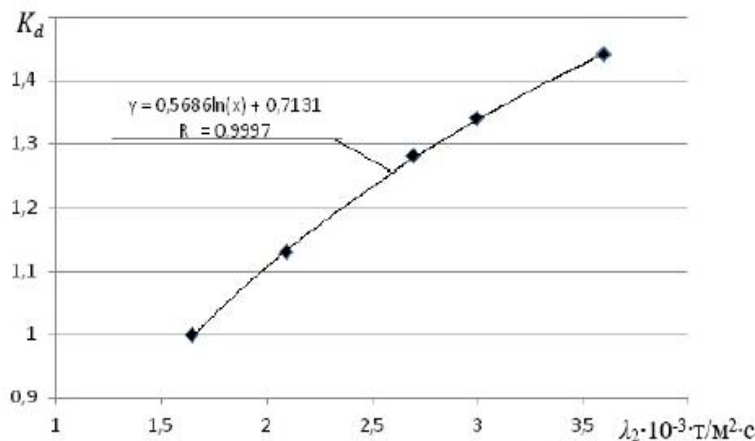


Рисунок 4. Влияние акустической жесткости почвогрунта на коэффициент динамичности

Figure 4. Influence of acoustic stiffness of the soil on the dynamism coefficient

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

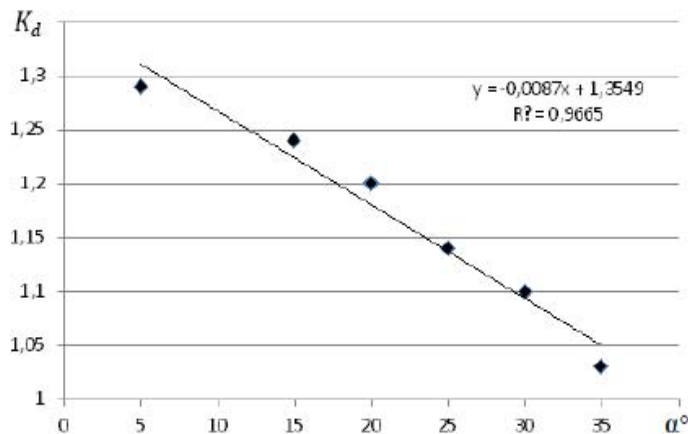


Рисунок 5. Зависимость коэффициента динамичности от угла наклона поверхности склона

Figure 5. Dependence of the dynamism coefficient on the slope surface slope angle

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

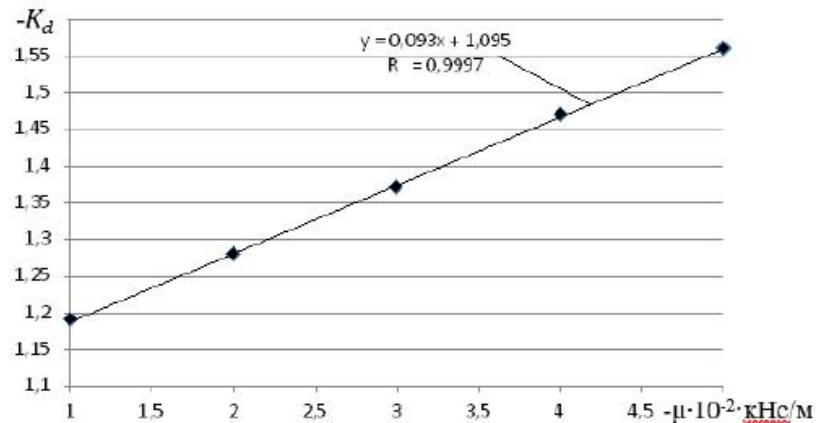


Рисунок 6. Зависимость коэффициента динамичности колесной лесной машины (трелёвочной системы) от коэффициента сопротивления шин

Figure 6. Dependence of the dynamics coefficient of a wheeled forest machine (skidder system) on the tire resistance coefficient

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

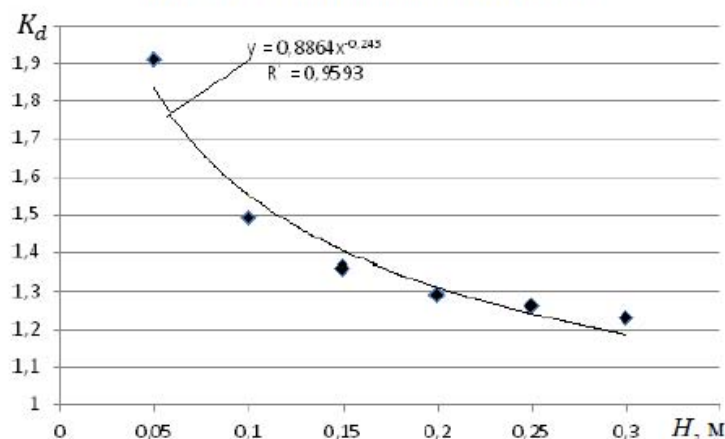


Рисунок 7. Влияние максимальной амплитуды отклонения профиля поверхности движения на коэффициент динамичности системы

Figure 7. Influence of the maximum amplitude of the deviation of the motion surface profile on the coefficient of dynamism of the system

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

По высокому значению коэффициента детерминации можно сделать вывод о том, что снижение показателя  $H$ , увеличивает динамическое воздействие оказывает колесная лесная машина (трелёвочная система) на почвогрунт.

Произведем оценку совместного влияния частотных и метрических характеристик профиля поверхности движения на проявление эффекта ди-

намического воздействия колесной лесной машины (трелёвочной системы) на почвогрунт.

На рисунке 8 по оси абсцисс отложены значения  $H$ , м, оси ординат – безразмерного параметра  $\frac{\omega}{\omega_1}$ , оси аппликат – коэффициента динамичности  $K_d$ .

Анализ данных рисунка 8 показывает, что до 75% возможных сочетаний исходных параметров  $K_d$  заполняет диапазон значений от 1 до 2, однако



имеют место условия взаимодействия, когда значения  $K_d$  заполняют диапазон от 2 до 3 и более, что негативно скажется на процессе разрушения почвогрунта от действия динамических нагрузок колесной лесной машины (трелевочной системы).

Требуется внимания и оценка влияния веса колесной лесной машины (трелевочной системы)  $Q$  на процесс динамического усиления при изменении угла  $\alpha$  наклона поверхности склона.

Результаты подобных исследований представлены на рисунке 9, где на оси ординат -  $K_d$ , оси абсцисс -  $Q$ , т, при этом линии 1-4 соответствуют значениям угла  $\alpha = 5, 15, 25, 35^\circ$  соответственно. Как видим, полученные кривые являются эквиди-

стантными (равноудаленными друг от друга) и хорошо описываются степенными зависимостями, причем с ростом веса колесной лесной машины (трелевочной системы) эффект динамического воздействия снижается.

Совместное влияние веса  $Q$  (ось абсцисс, т), угла  $\alpha$  (ось ординат,  $^\circ$ ) на коэффициент динамичности  $K_d$  (ось аппликат) отражено на рисунке 10.

Анализ данных рисунка 10 показал, что возможное распределение диапазонов величины  $K$  достаточно равномерное в области определени изучаемой двумерной функции.

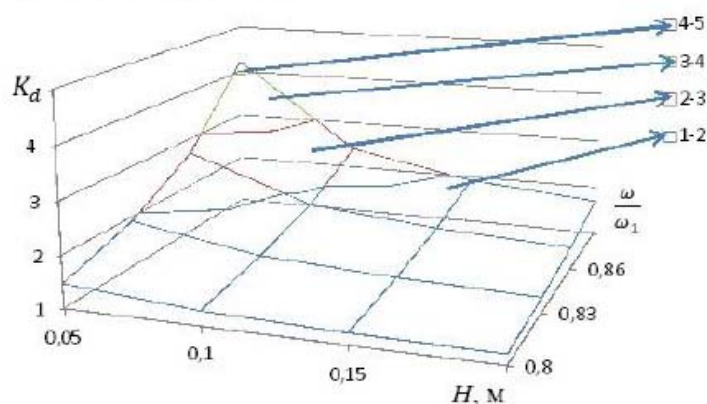


Рисунок 8. Совместное влияние параметров профиля поверхности движения на величину коэффициента динамичности

Figure 8. The combined effect of the parameters of the driving surface profile on the magnitude of the coefficient of dynamism

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

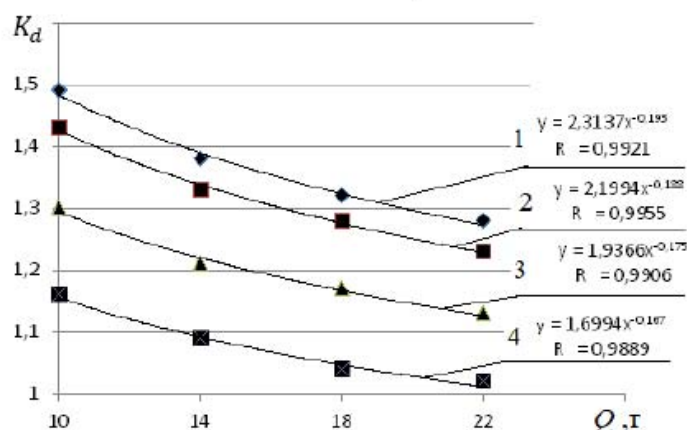


Рисунок 9. Влияние веса колесной лесной машины (трелевочной системы) на коэффициент динамичности:

1 -  $\alpha=5^\circ$ , 2 -  $\alpha=15^\circ$ , 3 -  $\alpha=25^\circ$ , 4 -  $\alpha=35^\circ$

Figure 9. Influence of the weight of a wheeled forest machine (skidding system) on the dynamism coefficient:

1 -  $\alpha=5^\circ$ , 2 -  $\alpha=15^\circ$ , 3 -  $\alpha=25^\circ$ , 4 -  $\alpha=35^\circ$

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

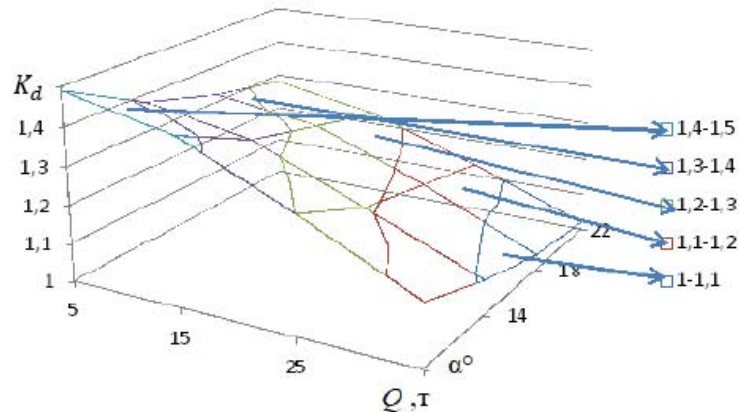


Рисунок 10. Совместное влияние веса системы и угла наклона поверхности склона на динамическое усиление колесной лесной машины (трелевочной системы)

Figure 10. Joint effect of system weight and slope inclination angle on the dynamic reinforcement of a wheeled forestry machine (skidding system)

Источник: результаты аналитических исследований авторов.

Source: results of the authors' analytical studies.

### Выводы

Как показали расчеты в исследованном диапазоне изменения веса  $Q$ , скорость движения колесной лесной машины (трелевочной системы)  $v$  оказывает слабое воздействие на коэффициент динамичности - отклонения от среднего значения отличаются не более, чем на 3-6%.

Таким образом, разработанная модель и полученные зависимости позволяют обоснованно произвести оценку динамического воздействия колесной лесной машины (трелевочной системы) на почвогрунт при работе на склонах с учетом основных технических и технологических факторов.

Исследованная двухосная система естественным образом распространяется на системы с 3 и более осями путем последовательного соединения каждой последующей колесной пары с предыдущей.

### Список литературы

1. Рябухин П. Б., Абузов А. В. Горным лесоразработкам – средосберегающее технологическое оборудование. Лесное хозяйство. 2008; 6: 36-37.
2. Рябухин П. Б., Ковалев А. П., Казаков Н. В., Луценко Е. В. Лесозаготовки на Дальнем Востоке – состояние и перспективы. Хабаровск : Изд-во ДальНИИЛХ, 2010. 283 с.
3. Рябухин П. Б., Луценко Е. В., Кравец А. Д. Анализ систем лесозаготовительных машин для освоения горных лесов по критериям производительности и экономической эффективности. Вестник КрасГАУ. 2010; 10: 148-155.
4. Рябухин П. Б., Луценко Е. В., Кравец А. Д. Эффективные объемы лесозаготовительного производства в условиях горных лесных массивов Дальнего Востока. Актуальные проблемы лесного комплекса : сб. науч. трудов по итогам междунар. науч.-техн. конференции. Вып. 25. Брянск : БГИТА, 2010. С. 160–163.

5. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. 199 с.
6. Рябухин П. Б., Рыжаков М. Р. Эффективность систем лесозаготовительных машин в лесорастительных и производственных условиях Дальнего Востока. Философия современного природопользования в бассейне реки Амур : сб. докл. междунар. экол. семинара (Хабаровск, 6-8 мая 2015 г.) / под ред. проф. П. Б. Рябухина. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. С. 74–78.
7. Рябухин П. Б. Оценка эффективности лесозаготовительных машин в природно-производственных условиях лесопромышленных предприятий Дальневосточного федерального округа : моногр. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 176 с.
8. Лышко А. С., Мохирев А. П., Медведев С. О. Перспективы транспортной инфраструктуры Арктики и Крайнего Севера. Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика : Матер. Всерос. науч.-практ. конференции. Воронеж, 2021. С. 235–239.
9. Мохирев А. П., Брагина Н. А., Рукомойников К. П. Обработка статистических данных о климатических условиях северных лесопромышленных регионов. Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сборник материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конференции ; под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. Красноярск, 2021. С. 37–41.
10. Лышко А. С., Медведев С. О., Мохирев А. П. Обоснование транспортно-логистических маршрутов на территории Арктики и крайнего севера Красноярского края. Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития : сборник матер. Всерос. науч.-практ. конференции. Красноярск, 2021. С. 79–82.
11. Григорьев И. В., Макуев В. А., Шапиро В. Я., Рудов М. Е., Никифорова А. И. Расчет показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелевке пачки хлыстов. Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2013; 2: 112-118.
12. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы. Естественные и технические науки. 2006; 1 (21): 174-180.
13. Шапиро В. Я., Григорьев И. В. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин. Техника и технология. 2006; 2 (14): 94-100.
14. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Особенности взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим почвогрунтом. Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2019; 23 (1): 52-61. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-52-61.
15. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Оценка несущей способности мерзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелевочной системой. Системы. Методы. Технологии. 2019; 2 (42): 80-86. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-2-80-86.
16. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И., Иванов В. А. Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках. Вестник КрасГАУ. 2008; 1: 163-175.
17. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021; 6 (384): 121-134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134.
18. Jarkko L. Design Parameter Analysis of the Bogie Track Surface Pressure in Peatland Forest Operations. Master of Science Thesis. Tampere, Tampere University of Technology, 2018. 59 p.
19. Lepilin D., Laurén A., Uusitalo J., Tuittila E-S. Soil Deformation and Its Recovery in Logging Trails of Drained Boreal Peatlands. Canadian Journal of Forest Research, 2019, vol. 49, no. 7, pp. 743–751. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0385>.
20. Yao L., Wang Y., Zeng Z., Kan J. Vibration Analysis and Optimization of a Vertical Disc Stump Grinder. Advances in Mechanical Engineering, 2018, vol. 10, iss. 2, pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018758577>.

21. Ding L., Yang H., Gao H. et al. Terramechanics Based Modeling of Sinkage and Moment for in-situ Steering Wheels of Mobile Robots on Deformable Terrain. *Mechanism and Machine Theory*, 2017; 116: 14-33. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011.

### References

1. Ryabuhin P. B., Abuzov A. V. Gornym lesorazrabotkam – sredosberegayushchee tekhnologicheskoe oborudovanie. *Lesnoe hozyajstvo*. 2008; 6: 36-37 (In Russian).
2. Ryabuhin P. B., Kovalev A. P., Kazakov N. V., Lucenko E. V. Lesozagotovki na Dal'nem Vostoke – sostoyanie i perspektivy. Khabarovsk : Izd-vo Dal'NILH, 2010. 283 p. (In Russian).
3. Ryabuhin P. B., Lucenko E. V., Kravec A. D. Analiz sistem lesozagotovitel'nyh mashin dlya osvoeniya gornyh lesov po kriteriyam proizvoditel'nosti i ekonomicheskoy effektivnosti. *Vestnik KrasGAU*. 2010; 10: 148-155 (In Russian).
4. Ryabuhin P. B., Lucenko E. V., Kravec A. D. Effektivnye ob"emy lesozagotovitel'nogo proizvodstva v usloviyah gornyh lesnyh massivov Dal'nego Vostoka. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. Sbornik nauchnyh trudov po itogam mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Vypusk 25. Bryansk: BGITA, 2010, pp. 160-163 (In Russian).
5. Ryabuhin P. B., Abuzov A. V. Aerostatnyj transport dlya gornyh lesozagotovok v usloviyah Dal'nego Vostok. – Khabarovsk : Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2013. 199 p. (In Russian).
6. Ryabuhin P. B., Ryzhakov M. R. Effektivnost' sistem lesozagotovitel'nyh mashin v lesorastitel'nyh i proizvodstvennyh usloviyah Dal'nego Vostoka. *Filosofiya sovremennogo prirodo-pol'zovaniya v bassejne reki Amur: sb. dokl. mezhdunar. ekol. seminar (Khabarovsk, 6-8 maya 2015 g.) / pod red. prof. P. B. Ryabuhina*. Khabarovsk : Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2015, pp. 74-78 (In Russian).
7. Ryabuhin P.B. Ocenka effektivnosti lesozagotovitel'nyh mashin v prirodno-proizvodstvennyh usloviyah lesopromyshlennyh predpriyatij Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga: monografiya. Khabarovsk : Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2018. 176 s. (In Russian).
8. Lyshko A. S., Mohirev A. P., Medvedev S. O. Perspektivy transportnoj infrastruktury Arktiki i krajnego severa. *Sovremennye mashiny, oborudovanie i IT-resheniya lesopromyshlennogo kom-pleksa: teoriya i praktika. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Voronezh, 2021*, pp. 235-239 (In Russian).
9. Mohirev A. P., Bragina N. A., Rukomojnikov K. P. Obrabotka statisticheskikh dannyh o klimaticheskikh usloviyah severnyh lesopro-myshlennyh regionov. *Lesnoj i himicheskij kompleksy – problemy i resheniya. Sbornik materialov po itogam Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. pod obshchej redakciej Yu. Yu. Loginova*. Krasnoyarsk, 2021, pp. 37-41 (In Russian).
10. Lyshko A. S., Medvedev S. O., Mohirev A. P. Obosnovanie transportno-logisticheskikh marshrutov na territorii Arktiki i kraj-nego severa Krasnoyarskogo kraja. *Innovacii v himiko-lesnom komplekse: tendencii i perspektivy razvitiya. Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Krasnoyarsk, 2021*, pp. 79-82 (In Russian).
11. Grigor'ev I. V., Makuev V. A., Shapiro V. Ya., Rudov M. E., Nikiforova A. I. Raschet pokazatelej processa uplotneniya pochvogrunta pri trelevke pachki hlystov. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik*. 2013; 2: 112-118 (In Russian).
12. Shapiro V. Ya., Grigor'ev I. V., Zhukova A. I. Vliyanie sdvigovyh deformacij na process ciklicheskogo uplotneniya pochvy. *Estestvennyye i tekhnicheskie nauki*. 2006; 1 (21): 174-180 (In Russian).
13. Shapiro V. Ya., Grigor'ev I. V. Deformaciya i ciklicheskoe uplotnenie pochvogrunta mezhdun gruntozacepami krupnogabaritnyh lesnyh shin. *Tekhnika i tekhnologiya*. 2006; 2 (14): 94-100 (In Russian).
14. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigor'ev I. V., Kunickaya O. A., Grigor'eva O. I. Osobennosti vzaimodejstviya trelevochnoj sistemy s ottaivayushchim pochvogruntom. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*. 2019; 23 (1): 52-61 (In Russian). DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-52-61.

15. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigor'ev I. V., Kunickaya O. A., Grigor'eva O. I. Ocenka nesushchej sposobnosti merzlogo i ottayavshogo grunta pri nepolnoj informacii o sostoyanii ego vzaimodejstviya s trelevochnoj sistemoj. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2019; 2(42): 80-86 (In Russian). DOI: 10.18324/2077-5415-2019-2-80-86.
16. Shapiro V. Ya., Grigor'ev I. V., Zhukova A. I., Ivanov V. A. Issledovanie mekhanicheskikh processov ciklicheskogo uplotneniya pochvogrunta pri dinamicheskikh nagruzkah. *Vestnik KrasGAU*. 2008; 1: 163-175 (In Russian).
17. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigor'ev I. V., Kunickaya O. A., Grigor'eva O. I. Modelirovanie vzaimodejstviya lesnyh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonah. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2021; 6 (384): 121-134 (In Russian). DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134.
18. Jarkko L. Design Parameter Analysis of the Bogie Track Surface Pressure in Peatland Forest Operations. Master of Science Thesis. Tampere, Tampere University of Technology, 2018. 59 p.
19. Lepilin D., Laurén A., Uusitalo J., Tuittila E-S. Soil Deformation and Its Recovery in Logging Trails of Drained Boreal Peatlands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49, no. 7, pp. 743–751. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0385>.
20. Yao L., Wang Y., Zeng Z., Kan J. Vibration Analysis and Optimization of a Vertical Disc Stump Grinder. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, iss. 2, pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018758577>.
21. Ding L., Yang H., Gao H. et al. Terramechanics Based Modeling of Sinkage and Moment for in-situ Steering Wheels of Mobile Robots on Deformable Terrain. *Mechanism and Machine Theory*, 2017; 116: 14-33. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011.

### Сведения об авторах

*Виталий А. Каляшов* – доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., 4, г. Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, e-mail: [vit832@yandex.ru](mailto:vit832@yandex.ru).

*Владимир Я. Шапиро* – профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: [shapiro54vlad@mail.ru](mailto:shapiro54vlad@mail.ru).

*Игорь В. Григорьев* – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Республика Саха (Якутия), шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru).

*Ольга А. Куницкая* – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Республика Саха (Якутия), шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru).

*Ольга И. Григорьева* – доцент кафедры Лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, e-mail: [grigoreva\\_o@list.ru](mailto:grigoreva_o@list.ru).

### Information about the authors

*Vitaly A. Kalyashov* – Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeyskaya str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, e-mail: vit832@yandex.ru.

*Vladimir Ya. Shapiro* – Professor of the Department of Higher mathematics, Saint Petersburg state forest engineering University named after S.M. Kirov, 5, Institutsky lane, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

*Igor V. Grigoriev* – Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", Arctic state agrotechnological university, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d. 3, 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

*Olga A. Kunitskaya* – Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", Arctic state agrotechnological university, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d. 3, 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

*Olga I. Grigorieva* – Associate Professor of the Department of Forestry, Saint Petersburg state forest engineering university named after S.M. Kirov, Institutsky lane, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, e-mail: grigoreva\_o@list.ru.