

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6143

Статья

Исследование устойчивости массива оттаивающего почвогрунта при его динамическом взаимодействии с колёсной лесной машиной на склонах

Каляшов Виталий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), vit832@yandex.ru

Шапиро Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), shapiro54vlad@mail.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

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

Григорьева Ольга Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru

Получена: 26 января 2022 / Принята: 31 марта 2022 / Опубликовано: 4 апреля 2022

Аннотация: В Российской Федерации значительная часть территории лесного фонда расположена на вечной мерзлоте. К таким территориям относятся: Республика Саха (Якутия), Республика Коми, Магаданская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, Чукотский автономный округ, Мурманская область, значительные территории Сибири и Дальнего Востока. Многие перечисленные регионы обладают большими запасами спелых и перестойных эксплуатационных лесов, причём значительная часть этих запасов расположена в труднодоступных местах, не только по отношению к развитости дорожной сети, но и рельефу

местности. В настоящее время подавляющий объём заготовок древесины в России производится при помощи современных машинных комплексов, в основном включающих колёсные 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 колёсных лесных машин и трелёвочных систем на их базе не просто остаётся актуальной, а приобретает ещё бóльшую 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 динамического взаимодействия колёсной лесной машины (трелёвочной системы) с почвогрунтом на склонах, которая позволяет на стадии проектных (подготовительных) работ, при наличии достоверных данных о гидрогеологии массива оттаивающего почвогрунта адекватно оценивать устойчивость и работоспособность волока. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

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

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6143

Article

Assessment of the efficiency of the skidding portage on the slope of the thawing soil mass under cyclic static loads

Vitalij Kalyashov

Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), vit832@yandex.ru

Vladimir Shapiro

D. Sc. in engineering, professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), shapiro54vlad@mail.ru

Igor Grigorev

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inboxl.ru

Ol'ga Kunickaya

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

Olga Grigoreva

Ph. D. in agriculture, associate professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru

Received: 26 January 2022 / Accepted: 31 March 2022 / Published: 4 April 2022

Abstract: In the Russian Federation, a significant part of the forest fund is located on permafrost. Such areas include: Republic of Sakha (Yakutia), Komi Republic, Magadan Oblast, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Chukotka Autonomous Okrug, Murmansk Oblast, and significant areas of Siberia and the Far East. Many of these regions have large reserves of mature and overmature forests, and a significant portion of these reserves is located in places that are inaccessible due to road network and topography challenges. Currently, a vast majority of timber harvesting in Russia is performed by using modern machinery complexes mainly composed of wheeled forest machines of various configurations and purposes (harvesters, forwarders and skidders). These machines can successfully operate even on fairly steep slopes due to special technical solutions, such as winches integrated into the transmission, or self-propelled winches (T-winch, ROB). However, the problem of negative effect of wheeled forest machines

and skidding systems based on them not only remains topical, but becomes even more acute, since the ecosystems of mountain forests and forests on the slopes of hills are among the most vulnerable ones, exposed to water and wind erosion. The article presents the developed mathematical model of dynamic interaction of a wheeled forest machine (a skidding system) with soil on slopes. The model allows adequate assessment of stability and working capacity of the skidding trail at the stage of design (preparatory) works given reliable data on hydrogeology of thawing soil massif. The work was performed within the framework of the scientific school «Innovative developments in the field of logging industry and forestry» of the Arctic State Agrotechnological University. The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

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

1. 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 лесосечных работах на склонах различной конфигурации — крутых, протяжённых или длинных, с гребнями и раздробленных, при углах наклона α их поверхности к условной линии горизонта от 15° и более — возникают особые геотехнические условия взаимодействия колёсной лесной машины, или трелёвочной системы на её базе, с краевой частью массива почвогрунта.

Математическая модель статического взаимодействия рассмотрена в работе [11], в которой установлены закономерности развития процесса разрушения в пределах заданной трассы движения и получены основные соотношения для определения глубины колеи.

Эти же процессы, но при циклических (многократных) нагрузках на почвогрунт при проходе колёсной лесной машины по одну и тому же участку волока изучены в ходе исследований [12], [13].

Однократные и циклические процессы взаимодействия при лесосечных работах на мёрзлых и оттаивающих грунтах подробно рассмотрены в публикациях [14], [15]. Динамические процессы взаимодействия на равнинных участках исследованы в работе [16].

Вопросу статического взаимодействия колёсной лесной машины (трелёвочной системы) с краевой частью массива почвогрунта на склонах посвящена работа [17].

Отметим основные положения, развитые в публикации [16], где разработанная и реализованная динамическая модель позволила выявить особенности колебательных процессов движения колёсной лесной машины (трелёвочной системы) с тремя степенями свободы: вертикальными перемещениями, продольно-угловыми и поперечно-угловыми перемещениями кузова. В итоге определены факторы и критерии усиления воздействия колёсной лесной машины (трелёвочной системы) на почвогрунт.

2. Материалы и методы

Основываясь на полученных результатах, рассмотрим задачу динамического взаимодействия колёсной лесной машины (трелёвочной системы) с почвогрунтом на склонах.

На рисунке 1 представлена схема колёсной лесной машины (трелёвочной системы), которая оказывает динамическое воздействие на массив оттаивающего грунта на склоне.

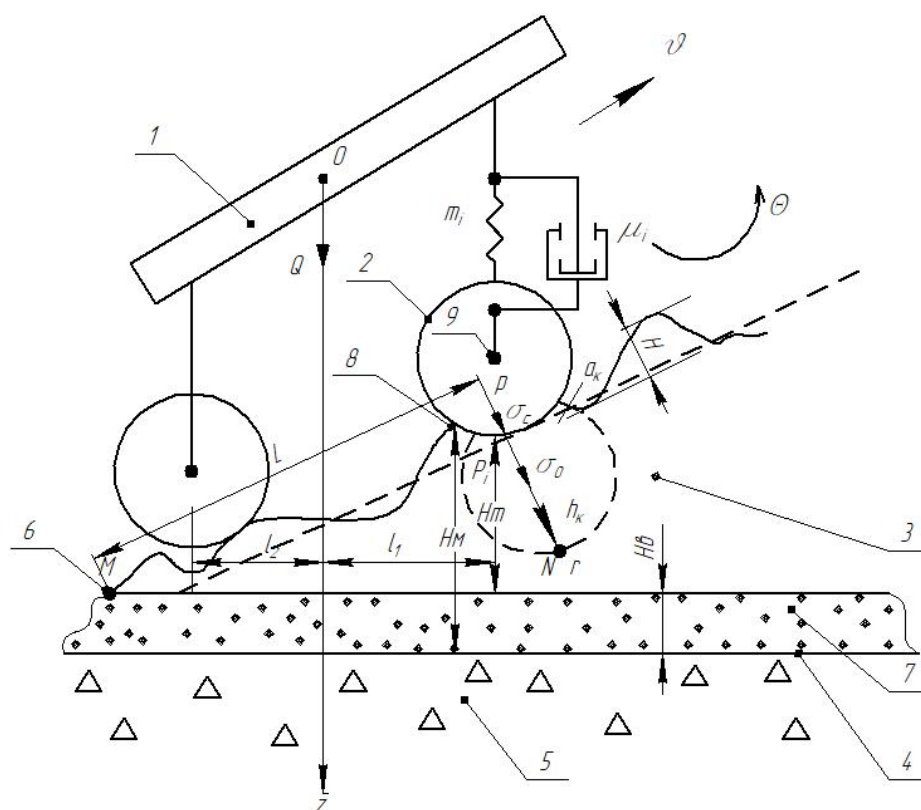


Рисунок 1. Схема динамической двухосной колёсной лесной машины (трелёвочной системы) при оценке устойчивости краевой части массива почвогрунта

Figure 1. Diagram of a dynamic two-axle wheeled forest machine (skidder system) in assessing the stability of the soil mass edge

Вес системы I (сила Q) приложен к её центру тяжести в точке O и направлен вдоль оси z , воздействуя динамической нагрузкой σ_0 через шины 2 в точке P на массив оттаивающего почвогрунта 3 , мощность слоя которого равна H_T . Место P приложения нагрузки отстоит от границы 4 с мёрзлым почвогрунтом 5 на расстоянии H_m , а от подошвы 6 склона в точке M — на расстоянии L . Поскольку мёрзлый почвогрунт 5 является водонепроницаемым, в непосредственной близости от его границы 4 формируется слой воды 7 мощностью H_B .

Колёсную лесную машину (трелёвочную систему) будем рассматривать с симметричной подвеской, причём все жёсткости и вязкости имеют линейные характеристики с коэффициентами жёсткости m_i и коэффициентами сопротивления шин μ_i , где индекс $I = 1, 2$.

При наезде на микронеровность профиля поверхности движения 8 колёса 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 поверхности движения к колёсной паре, причём время запаздывания τ_i определяется как:

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

где l_1 — расстояние (параметр базы системы) от линии центра тяжести O до линии оси 9 передней пары колёс 2; 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 необходимо определить частотные характеристики колебательного процесса, а именно скорости колебаний $\dot{z}(t)$, поскольку с квадратом этой величины связаны как кинетическая энергия динамического воздействия, так и возникающие напряжения от динамического удара колёсной пары по почвогрунту.

Изображение скорости линейных вертикальных колебаний представляет собой произведение передаточной функции скорости $W(s)$ на изображение $F(s)$ функции воздействия $f(t)$. Для симметричной подрессоренной системы передаточная функция равна:

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

где $c = \sum_{i=1}^{2n} e^{-\tau_i s}$; m_p — подрессоренная масса системы, которая в расчётах 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 поверхности движения представляет собой внешнее синусоидальное воздействие в виде:

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

где H — максимальная амплитуда отклонения профиля поверхности движения от условной горизонтальной плоскости, проведённой через самую низкую точку профиля, ω_1 — частота внешнего воздействия (вынужденных колебаний) профиля поверхности движения.

Тогда изображения этого воздействия определим как:

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

В конечном итоге, с учётом выражений (1)—(4), получено соотношение для определения скорости колебаний $\dot{z}(s)$:

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

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 $A_z(i\omega)$:

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

где K_ω , C_ω , M_ω и N_ω — коэффициенты, определяемые из следующих соотношений:

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

Отнесение величины $A_z(i\omega)$ к H приводит к введению безразмерного параметра \bar{A}_z , который в статистической динамике сельскохозяйственных машин именуют коэффициентом демпфирования.

Введённый коэффициент демпфирования обуславливает оптимальный подбор собственных колебаний колёсной лесной машины (трелёвочной системы) по отношению к вынужденным колебаниям и позволяет кратно уменьшить амплитуду их скорости, что приводит к снижению силового динамического воздействия на почвогрунт.

На этом основании величину $K_\omega = (1 + \bar{A}_z \cdot \cos \alpha)^2$ обоснованно можно считать коэффициентом динамического усиления скорости амплитудных колебаний колёсной лесной машины (трелёвочной системы).

Расчёты с применением соотношений (1)—(7) показывают, что при значениях безразмерного параметра отношения частот $\frac{\omega}{\omega_1} \leq 0,8$ коэффициент K_ω близок к значениям 1—1,05, т. е. динамическим усилением можно пренебречь.

Однако при $\frac{\omega}{\omega_1} > 0,8$, и особенно в предельном состоянии $\frac{\omega}{\omega_1} \rightarrow 1$, динамическое усиление весьма значительное, причём его рост подчиняется экспоненциальному закону, а коэффициент динамического усиления возрастает кратно в 2—3 раза и более.

Эти выводы сделаны при следующих исходных (базовых) данных системы взаимодействия:

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

Отметим, что показатель жёсткости рессоры для применяемых колёсных лесных машин (трелёвочных систем) изменяется в диапазоне от 100 до $400 \cdot 10^{-3}$ кН/м, а коэффициент сопротивления шин μ — от 1 до $5 \cdot 10^{-2}$ кНс/м.

Вес колёсной лесной машины (трелёвочной системы) будем при расчётах варьировать в диапазоне от 10 до 22 т, параметр H амплитуды профиля поверхности движения составляет от 0,05 до 0,3 м.

Динамические нагрузки, передаваемые от шин к почвогрунту, должны учитывать соотношение акустических жёсткостей λ_i материалов взаимодействия, равных произведению их плотностей на скорости продольных волн.

Из этого следует, что величину K_ω необходимо умножить на коэффициент акустического преломления $K_\lambda = \frac{2}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}$, где λ_1 — акустическая жёсткость материала шины, равная,

в частности: $\lambda_1 = 1,2 \cdot 1800 = 2160 \text{ т/м}^2 \cdot \text{с}$; λ_2 — акустическая жёсткость почвогрунта, равная для примера: $\lambda_2 = 1,5 \cdot 1100 = 1650 \text{ т/м}^2 \cdot \text{с}$.

В этом случае имеем $K_\lambda = 0,87$, т. е. динамические усилия, передаваемые от шин почвогрунту, снижаются на 15—20 %, когда коэффициент $K_\lambda < 1$. По мере роста несущей способности почвогрунта и его акустической жёсткости параметр K_λ растёт, достигая 1, а для крепких почвогрунтов и превышая это значение. Как следствие, имеет место усиление динамического воздействия колёсной лесной машины (трелёвочной системы) на почвогрунт.

Объединяя оба критерия, введём интегральный коэффициент динамичности системы $K_d = K_\omega K_\lambda$, который учитывает как колебательный процесс, так и эффект акустического преломления.

Зафиксируем акустическую жёсткость шин на уровне $\lambda_1 = 2160 \text{ т/м}^2 \cdot \text{с}$ и исследуем влияние акустической жёсткости почвогрунта на изменение критерия K_d .

3. Результаты

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

Анализ полученных данных показывает, что установленная зависимость с высокой достоверностью подчиняется логарифмическому закону, т. е. имеет место асимптотическое ограничение K_d по мере роста показателя λ_2 .

Рассмотрим вопрос о влиянии угла α наклона поверхности склона на величину K_d (рисунок 3).

Для этого в базовых условиях (8) α принимаем переменной в диапазоне от 5 до 35° при фиксированных значениях $\frac{\omega}{\omega_1} = 0,83$ и $K_\lambda = 1,29$.

На рисунке 3 представлена полученная зависимость, где по оси ординат отложены значения коэффициента K_d , а по оси абсцисс — угла α° .

Видно, что эффект динамического воздействия колёсной лесной машины (трелёвочной системы) на почвогрунт в направлении, перпендикулярном плоскости склона, линейно снижается с ростом угла наклона последнего.

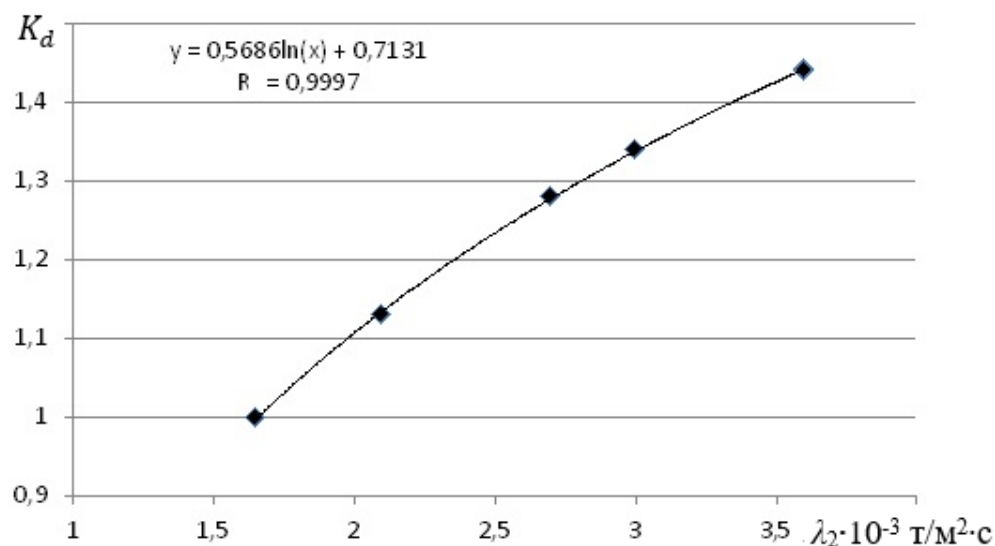


Рисунок 2. Влияние акустической жёсткости почвогрунта на коэффициент динамичности

Figure 2. Influence of soil acoustic impedance on the coefficient of dynamics

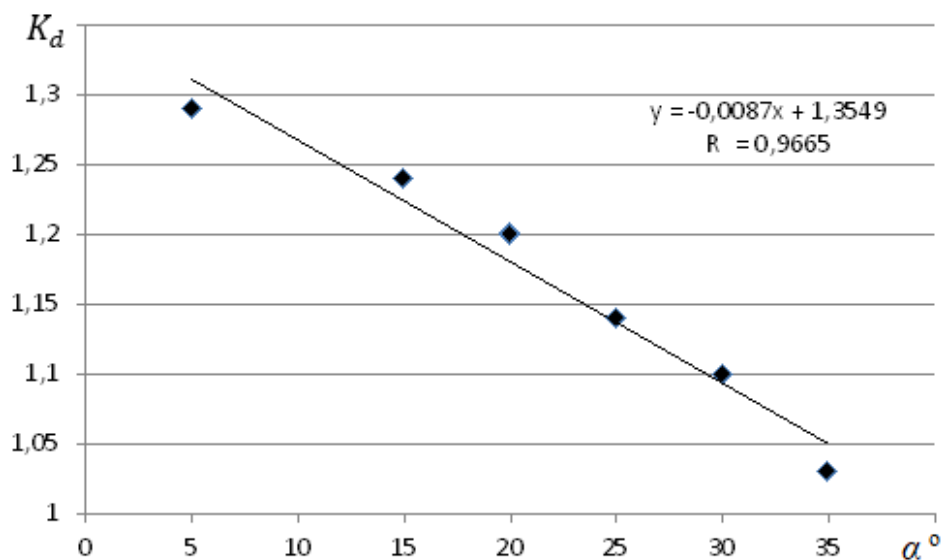


Рисунок 3. Зависимость коэффициента динамичности от угла наклона поверхности склона

Figure 3. Dependence of the coefficient of dynamics on the slop angle of gradient

Оценим устойчивость участка профиля поверхности движения колёсной лесной машины (трелёвочной системы) на склоне при динамической нагрузке на массив оттаивающего почвогрунта.

Модель статического взаимодействия подробно рассмотрена в работе [18], в которой показано влияние влажности почвогрунта W вблизи с водонепроницаемой границей с зоной мерзлоты на характеристики прочности массива: величину сцепления C и угол внутреннего трения φ .

Исследования [19] показали, что минимальная влажность почвогрунта (на верхних участках склона) после оттока влаги будет стремиться к нижнему пределу пластичности или величине на границе раскатывания (W_p), тогда как максимальная влажность на нижних участках склона будет стремиться к верхнему пределу пластичности или величине на границе текучести (W_t).

В этой связи, следуя исследованию [18], введём коэффициент относительной влажности $K_W = \frac{W}{W_t}$ для более объективной оценки состояния параметров сцепления C и угла внутреннего трения φ , которые являются основными характеристиками паспорта прочности при построении кругов Мора.

В таблице представлены опытные данные параметров C и φ , полученные для оттаивающего суглинка в работе [19] при изменении его влажности W в широком диапазоне — от 22 до 41 %.

Таблица. Зависимость параметров прочности почвогрунта от величины его относительной влажности

Table. Dependence of soil strength parameters on the value of its relative humidity

K_w	C , кПа	φ , °
0,5	45	32
0,6	30	24
0,7	19	18
0,8	11	13
0,9	6	10

Обработка данных таблицы проиллюстрирована рисунком 4, где линия 1 — сцепление C , кПа, линия 2 — угол φ° , по оси абсцисс — K_w .

Как следует из анализа полученных данных, кратное снижение показателей прочности имеет место уже по достижении K_w значений 0,7 и более, что при величине предела текучести почвогрунта $W_T = 45\%$ соответствует влажности W более 31—32 %.

Точка P приложения динамической нагрузки σ_0 в направлении, перпендикулярном к поверхности склона, при её удалении от точки M — подошвы склона — на расстояние L соответствует тому, что ось передней пары колёс будет отстоять от зоны мерзлоты на $H_M = H_T + H_B = L \cdot \sin\alpha + H_B$.

Если принять во внимание механизм фильтрации воды вследствие линейного рассеивания порового давления и допустить, что на вершине склона влажность близка к значениям 0,9 W_T , а в зоне подошвы 0,5 W_T , то для оценки величины K_w можно использовать линейное соотношение

$$K_w = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin\alpha}{H_T}. \quad (9)$$

Основываясь на полученных регрессионных зависимостях (рисунок 4) и соотношении (9) для текущего местоположения колёсной пары на склоне, представляется возможным определить прочностные характеристики почвогрунта, которые используются при оценке критерия устойчивости K_y участка профиля поверхности движения [9]:

$$K_y = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\alpha} (1 - f) + \frac{c}{\sigma_n \operatorname{tg}\alpha}, \quad (10)$$

где $f = \frac{\rho_B}{\rho} \left(1 + \frac{H_B}{H_T}\right)$, ρ_B и ρ — плотности соответственно воды и грунта, σ_0 — динамическая нагрузка колёсной лесной машины (трелёвочной системы), передаваемая от шины почвогрунту.

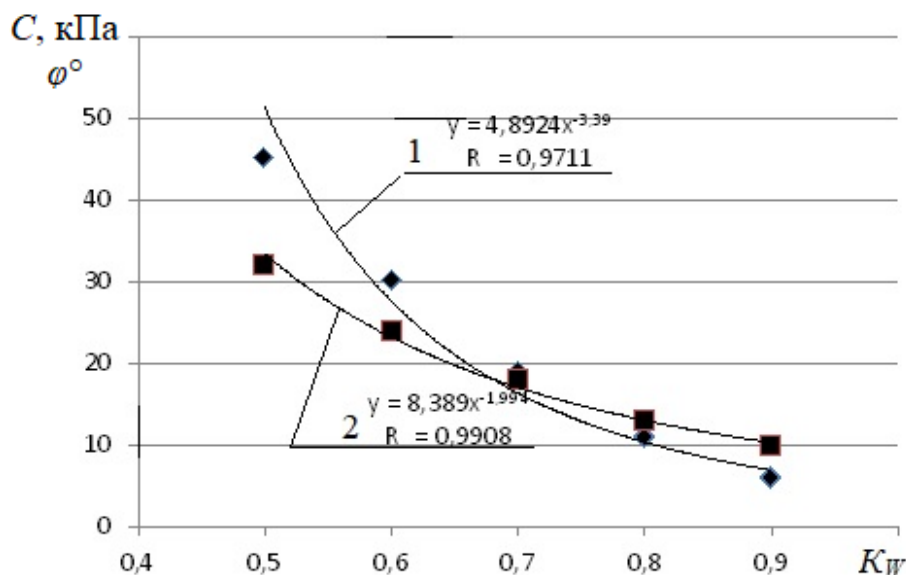


Рисунок 4. Зависимость параметров прочности почвогрунта от его относительной влажности

Figure 4. Dependence of soil strength parameters on its relative humidity

Величину σ_0 определяют в результате умножения статического давления в шинах σ_c на коэффициент динамичности системы K_d .

Величина σ_c для различных колёсных лесных машин (трелёвочных систем) изменяется от 27 до 80 кПа, а при использовании шин со сверхнизким давлением σ_c может снижаться до 10—12 кПа.

При значениях критерия $K_y > 1$ участок почвогрунта в пределах профиля дороги считается устойчивым, в противном случае созданы условия для потери устойчивости и сползания грунта в направлении подошвы склона.

Исследуем влияние параметров динамической системы на показатель устойчивости K_y при базовых условиях (8), которые дополним данными о следующих параметрах: $\lambda_1 = 2160 \text{ т/м}^2 \cdot \text{с}$, $\lambda_2 = 2700 \text{ т/м}^2 \cdot \text{с}$, принимаем переменными угол $\alpha = 5-35^\circ$ и величину статического давления в шинах $\sigma_c = 35-80 \text{ кПа}$ при постоянных $L = 5 \text{ м}$ и $H_T = 10 \text{ м}$.

На рисунке 5а представлен график функции $K_y\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)$ при $\sigma_c = 35 \text{ кПа}$ (линия 1) и $\sigma_c = 56 \text{ кПа}$ (линия 2), $\alpha = 15^\circ$.

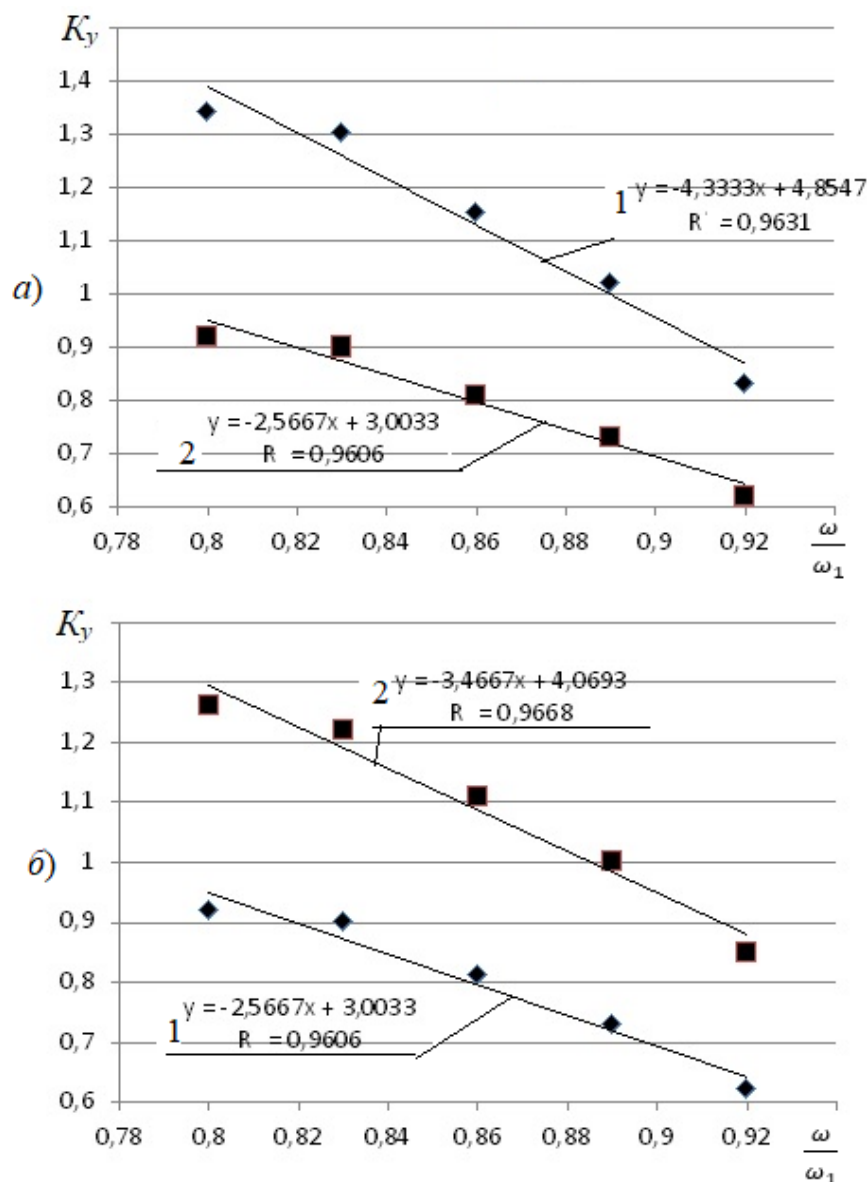


Рисунок 5. Графики функции $K_y(\frac{\omega}{\omega_1})$: 1 — $\sigma_c = 35$ кПа, 2 — $\sigma_c = 56$ кПа

Figure 5. Function graphs $K_y(\frac{\omega}{\omega_1})$: 1 — $\sigma_c = 35$ кПа, 2 — $\sigma_c = 56$ кПа

Установленные функциональные зависимости являются линейными и строго убывающими, при этом использование шин с более низким давлением (линия 1) обеспечивает устойчивость участка волокна ($K_y > 1$) даже при приближении показателя $\frac{\omega}{\omega_1}$ к уровню 0,9, т. е. в область резонанса.

Применение шин с более высоким давлением (линия 2) во всём диапазоне изменения показателя отношения частот $\frac{\omega}{\omega_1}$ приводит к неустойчивому состоянию почвогрунта с показателем $K_y < 1$.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о том, что при работах на участках склона, характеризующихся повышенной влажностью и низкой несущей способностью почвогрунта, снижение давления в шинах или применение шин сверхнизкого давления является существенным фактором обеспечения эффективности использования колёсных лесных машин (трелёвочных систем).

Зафиксируем величину $\sigma_c = 56$ кПа и сравним (рисунок 5б) состояние устойчивости по мере перемещения колёсной лесной машины (трелёвочной системы) к вершине склона по его поверхности от положения с $L = 5$ м (линия 1) до положения с $L = 15$ м (линия 2).

Сравнительный анализ графических данных (линии 1 на рисунке 5а и линии 2 на рисунке 5б) свидетельствует о том, что с позиций оценки устойчивости почвогрунта в границах волока перемещение колёсной лесной машины (трелёвочной системы) в направлении вершины склона, т. е. на более сухие участки, равносильно снижению величины давления в шинах.

Этот вывод подчёркивает важность гидрогеологических работ и осуществления районирования оттаивающих почвогрунтов по показателю влажности при подготовке к проведению лесосечных работ, особенно в межсезонные периоды.

Рассмотрим влияние амплитуды H неровностей профиля поверхности движения на показатель устойчивости.

На рисунке 6 при $\sigma_c = 40$ кПа приведены графики зависимости функции K_y от H (ось абсцисс, м) для двух местоположений системы на склоне: $L = 10$ м (линия 1) и $L = 5$ м (линия 2).

При работе на более низком участке склона, даже при невысоком давлении в шинах, обеспечить устойчивость почвогрунта не представляется возможным. В этом случае необходимо либо снижать давление в шинах, либо существенно (в 1,5—2 раза) снизить вес колёсной лесной машины (трелёвочной системы) Q , что негативно скажется на их производительности и эффективности эксплуатации.

Перемещение колёсной лесной машины (трелёвочной системы) на более сухие участки приводит к тому, что их устойчивость достигается уже при амплитуде профиля $H > 0,15$ м.

Анализ данных рисунков 5 и 6 показывает, что при планировании лесосечных работ на склонах необходимо детально исследовать гидрогеологию массива оттаивающего почвогрунта для того, чтобы прокладываемые волокна и технологические коридоры, а также технические параметры колёсной лесной машины (трелёвочной системы) в максимальной степени обеспечивали их проектную производительность.

В этом контексте актуальным вопросом является районирование и классификация почвогрунтов на участках трассы по критерию устойчивости с учётом вышерассмотренных факторов.

Как видим, микронеровности профиля поверхности движения и характеристики волновых колебаний колёсной лесной машины (трелёвочной системы) определяют процессы их динамического взаимодействия с почвогрунтом.

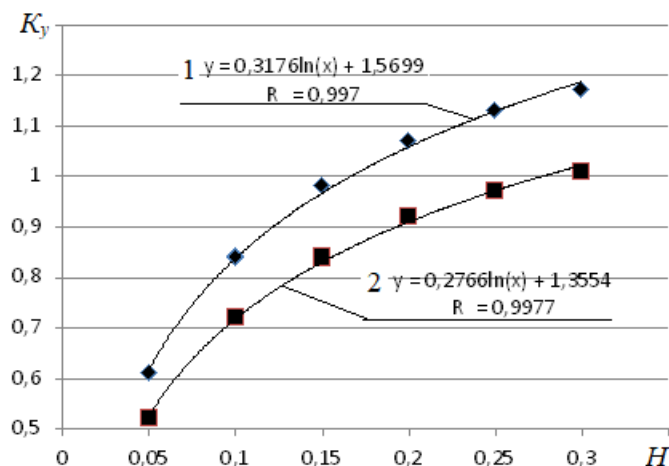


Рисунок 6. Графики функции $K_y(H)$: 1 — $L = 10$ м, 2 — $L = 5$ м

Figure 6. Function graphs $K_y(H)$: 1 — $L = 10$ м, 2 — $L = 5$ м

На рисунке 7 отражено совместное влияние параметров профиля поверхности движения $\frac{\omega}{\omega_1}$ (ось абсцисс) и амплитуды H (ось ординат, м) на показатель устойчивости K_y , отложенный по оси аппликат.

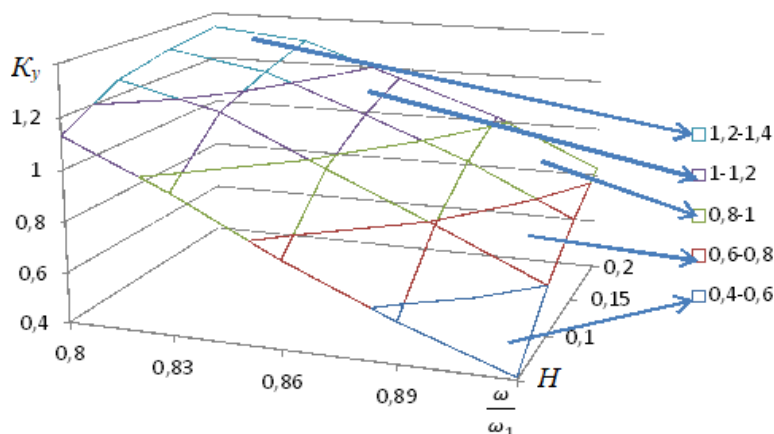


Рисунок 7. Влияние параметров профиля поверхности движения на устойчивость почвогрунта

Figure 7. Influence of sliding surface profile parameters on soil stability

Можно заключить, на основе данных рисунка 7, что в 35—40 % случаях возможных сочетаний параметров $\frac{\omega}{\omega_1}$ и H достигается устойчивость почвогрунта в пределах участка волока. Вместе с тем в 60—65 % случаев имеет место потеря устойчивости, что значительно ухудшает общее состояние волока при последующих циклах прохода колёсной лесной машины (трелёвочной системы) на этом участке.

Необходимо отметить, что в процессе моделирования не учитывалось влияние на устойчивость почвогрунта следующих технических параметров лесной машины: наличие цепей, съемных гусениц и количество активных осей, что является предметом отдельного исследования.

Установленные закономерности отражают состояние устойчивости почвогрунта при его однократном взаимодействии с колесной парой и полученные результаты составляют научную основу изучения особенностей, обусловленных циклическими проходами лесной машины или трелевочной системы по одному и тому же участку волока.

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, разработанная математическая модель динамического взаимодействия колёсной лесной машины (трелёвочной системы) с почвогрунтом на склонах позволяет на стадии проектных (подготовительных) работ при наличии достоверных данных о гидрогеологии массива оттаивающего почвогрунта адекватно оценивать устойчивость и работоспособность волока.

Список литературы

1. *Рябухин П. Б., Абузов А. В.* Горным лесоразработкам — средосберегающее технологическое оборудование // Лесное хозяйство. 2008. № 6. С. 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. С. 148—155.
4. *Рябухин П. Б., Луценко Е. В., Кравец А. Д.* Эффективные объёмы лесозаготовительного производства в условиях горных лесных массивов Дальнего Востока // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. по итогам междунар. научно-техн. конф. Брянск: БГИТА, 2010. Вып. 25. 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: [Монография]. 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: Материалы Всерос. научно-практич. конф. 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: Сб. материалов по итогам Всерос. научно-практич. конф. / 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: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2021. С. 79—82.
11. Григорьев И. В., Макуев В. А., Шапиро В. Я., Рудов М. Е., Никифорова А. И. Расчёт показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелёвке пачки хлыстов // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2013. № 2. С. 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). С. 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). С. 94—100.
14. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Особенности взаимодействия трелёвочной системы с оттаивающим почвогрунтом // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 1. С. 52—61.
15. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Оценка несущей способности мёрзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелёвочной системой // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 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. С. 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). С. 121—134.
18. Каляшов В. А., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Оценка работоспособности трелёвочного волокна на склоне массива оттаивающего почвогрунта при циклических статических нагрузках // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 2. С. 79—95.
19. Царанов М. Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2007. № 6. С. 31—34.

References

1. Ryabukhin P. B., Abuzov A. V. To the mountain logging — medium-saving technological equipment. *Forestry*, 2008, no. 6, pp. 36—37. (In Russ.)
2. Ryabukhin P. B., Kovalev A. P., Kazakov N. V., Lutsenko E. V. *Logging in the Far East — status and prospects*. Khabarovsk, Publishing house of the Dal'nii ILLKh, 2010. 283 p. (In Russ.)

3. Ryabukhin P. B., Lutsenko E. V., Kravets A. D. Analysis of logging machinery systems for the development of mountain forests on the criteria of performance and economic efficiency. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2010, no. 10, pp. 148—155. (In Russ.)
4. Ryabukhin P. B., Lutsenko E. V., Kravets A. D. Effective volumes of logging production in the mountain forests of the Far East. *Actual problems of forestry complex. Collection of scientific papers on the results of international scientific and technical conference*. Bryansk, BGITA, 2010, issue 25, pp. 160—163. (In Russ.)
5. Abuzov A. V., Ryabukhin P. B. *Aerostat transport for mountain logging in conditions of the Far East*. Khabarovsk, Publishing house of the Pacific State University, 2013. 199 p. (In Russ.)
6. Ryabukhin P. B., Ryzhakov M. R. Efficiency of logging machine systems in forest and production conditions of the Far East. Philosophy of modern nature management in the Amur River basin: *Proceedings of an international ecological seminar (Khabarovsk, May 6—8, 2015)*, edited by prof. P. B. Ryabukhin. Khabarovsk, Publishing house of the Pacific State University, 2015, pp. 74—78. (In Russ.)
7. Ryabukhin P. B. *Assessment of the effectiveness of logging machines in the natural-production conditions of timber enterprises of the Far Eastern Federal District*, monograph. Khabarovsk, Publishing house of the Pacific State University, 2018. 176 p. (In Russ.)
8. Lyshko A. S., Mokhired A. P., Medvedev S. O. Prospects for transport infrastructure in the Arctic and the Far North. *Modern machinery, equipment and IT-solutions of the timber industry: theory and practice. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Voronezh, 2021, pp. 235—239. (In Russ.)
9. Mokhired A. P., Bragina N. A., Rukomoinikov K. P. Processing of statistical data on climatic conditions of northern timber regions. *Forest and Chemical Complexes — problems and solutions. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*, edited by Yu. Logins. Krasnoyarsk, 2021, pp. 37—41. (In Russ.)
10. Lyshko A. S., Medvedev S. O., Mokhired A. P. Justification of transport-logistic routes in the Arctic and the Far North of Krasnoyarsk Krai. *Innovations in chemical and forestry complex: trends and prospects for development. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk, 2021, pp. 79—82. (In Russ.)
11. Grigorev I. V., Makuyev V. A., Shapiro V. Y., Rudov M. E., Nikiforova A. I. Calculation of indicators of soil compaction process at skidding a pack of logs. *Bulletin of the Moscow State Forest University — Forest Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 112—118. (In Russ.)
12. Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Zhukova A. I. Influence of shear deformations on process of cyclic compaction of soil. *Natural and technical sciences*, 2006, no. 1 (21), pp. 174—180. (In Russ.)
13. Shapiro V. Y., Grigorev I. V. Deformation and cyclic compaction of soil between grousers of large-sized forest tires. *Technique and technology*, 2006, no. 2 (14), pp. 94—100. (In Russ.)
14. Rudov S. E., Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Peculiarities of interaction of the skidding system with thawing ground. *Forestry Bulletin. Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 52—61. (In Russ.)
15. Rudov S. E., Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Assessment of bearing capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with skidding system. *Systems. Methods. Technology*, 2019, no. 2 (42), pp. 80—86. (In Russ.)
16. Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Zhukova A. I., Ivanov V. A. Research of mechanical processes of cyclic compaction of soil under dynamic loads. *Bulletin of KarsGAU*, 2008, no. 1, pp. 163—175. (In Russ.)

17. Rudov S. E., Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Modeling of interaction of forest machines with the soil when working on slopes. *Izvestiya vysshee uchebnykh obrazovaniyakh. Forest Journal*, 2021, no. 6 (384), pp. 121—134. (In Russ.)
18. Kalyashov V. A., Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Estimation of skidder performance on the slope of the thawing soil mass at cyclic static loads. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 79—95. (In Russ.)
19. Tsarapov M. N. Formation of Strength Characteristics of Soils during Thawing. *Bulletin of Moscow University. Series 4: Geology*, 2007, no. 6, pp. 31—34. (In Russ.)

© Каляшов В. А., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И., 2022