



Научная статья

УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-140-152

Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции

В.А. Каляшов¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

В.Я. Шапиро², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

И.В. Григорьев³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

О.А. Куницкая³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

И.С. Должиков¹, канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

В.П. Друзьянова⁴, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; vit832@yandex.ru, idolzhikov222@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; shapiro54vlad@mail.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

⁴Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, г. Якутск, Россия, 677000; druzvar@mail.ru

Поступила в редакцию 26.10.23 / Одобрена после рецензирования 20.01.24 / Принята к печати 22.01.24

Аннотация. В Российской Федерации значительная часть территории лесного фонда расположена на вечной мерзлоте. Многие регионы страны обладают большими запасами спелых и перестойных эксплуатационных лесов, причем значительная часть этих запасов находится в труднодоступных местах, не только ввиду недостаточно развитой дорожной сети, но и из-за сложного рельефа местности. В настоящее время подавляющий объем заготовок древесины в России производится при помощи современных машинных комплексов, в основном включающих колесные лесные машины различных компоновки и назначения (харвестеры, форвардеры, скиддеры и т. д.). При этом проблема негативного воздействия на почву 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 др. относятся к наиболее ранимым, подверженным водной и ветровой эрозии. Как

© Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П., 2024

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

известно, колея в почвогрунте формируется под воздействием нормальной нагрузки, передаваемой через пятно контакта движителя, а также под воздействием касательной силы, реализуемой движителем при перемещении машины. При подъеме машины на склон требуется большая касательная сила тяги движителя, чем при перемещении по равнине. Следовательно, на склоне интенсивность образования колеи при прочих равных условиях выше. Известны системы машин, в которых используются лебедки, помогающие машинам спускаться и подниматься по склону. Лебедки могут быть как отдельными, так и интегрированными в трансмиссию машин агрегатами. Исследование показало, что использование лебедок при подъеме машины на склон существенно уменьшает расход топлива и нагрузки в трансмиссии, что является следствием снижения необходимой для перемещения машины касательной силы тяги, реализуемой движителем. Таким образом, интенсивность образования колеи на склоне при работе машины с лебедкой меньше по сравнению с работой без лебедки.

Ключевые слова: леса на склонах, леса на вечной мерзлоте, лесозаготовка, лесные машины, трелевочные системы, солифлюкция, образование колеи

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование проведено за счет гранта РФФ № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Для цитирования: Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 140–152. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-140-152>

Original article

The Formation of a Track by the Propulsion of a Forestry Machine on the Slope of the Thawing Soil in the Permafrost Zone, Taking into Account the Effect of Solifluction

*Vitalij A. Kalyashov*¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

*Vladimir Ya. Shapiro*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

*Igor' V. Grigor'ev*³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

*Ol'ga A. Kunitskaya*³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

*Il'ya S. Dolzhikov*¹, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

*Varvara P. Druz'yanova*⁴, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

¹Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; vit832@yandex.ru, idolzhikov222@mail.ru

²Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; shapiro54vlad@mail.ru

³Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

⁴М.К. Ammosov North-Eastern Federal University, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russian Federation; druzvar@mail.ru

Received on October 26, 2023 / Approved after reviewing on January 20, 2024 / Accepted on January 22, 2024

Abstract. In the Russian Federation, a significant part of the forest fund territory is located on permafrost. Many regions of the country have large reserves of mature and overmature commercial forests, and a significant part of these reserves are located in hard-to-reach places, not only due to the underdeveloped road network, but also due to the difficult terrain. Currently, the vast majority of timber harvesting in Russia is carried out using modern machine complexes, mainly including wheeled forestry machines of various layouts and purposes (harvesters, forwarders, skidders, etc.). At the same time, the problem of the negative impact on the soil of forestry machines and skidding systems based on them not only remains relevant, but becomes even more acute, since the ecosystems of mountain forests, forests on the slopes of hills, etc. are among the most vulnerable, subject to water and wind erosion. As is known, the track in the soil is formed under the influence of normal load transmitted through the contact spot of the mover, as well as under the influence of the tangential force realized by the mover when moving the machine. When lifting a machine onto a slope, the tangential tractive effort of the propulsion is required than when moving across the plain. Consequently, the intensity of track formation on the slope is higher, all other things being equal. Machine systems are known where, when working on slopes, winches are used to help machines go down and up the slope. Winches can be either separate units or units integrated into the transmission of machines. The research has shown that using winches when lifting the machine onto a slope significantly reduces fuel consumption and transmission loads, which is a consequence of a decrease in the tangential tractive effort required to move the machine, realized by the engine. Then the intensity of track formation on the slope when the machine is working with a winch is less compared to working without a winch.

Keywords: forests on the slopes, forests on permafrost, logging, forestry machines, skidding systems, solifluction, track formation

Acknowledgements: The work was carried out 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 Russian Science Foundation grant no. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigor’ev I.V., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Druz’yanova V.P. The Formation of a Track by the Propulsion of a Forestry Machine on the Slope of the Thawing Soil in the Permafrost Zone, Taking into Account the Effect of Solifluction. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 140–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-140-152>

Введение

Для повышения эффективности работы лесных машин при проведении лесосечных и/или лесовосстановительных работ, создания и эксплуатации лесных плантаций, а иногда и борьбы с лесными пожарами на крутых и очень крутых склонах в некоторых странах мира (США, Австрия, Новая Зеландия, Финляндия и др.) созданы и успешно используются системы машин, включающие в себя лебедки [3–5, 19, 20]. При таком варианте существенно снижаются расход топлива, нагрузки в трансмиссиях машин, а так-

же степень повреждения почвогрунтов на склонах лесосек и вырубок. Для того чтобы наглядно проиллюстрировать, как лебедки облегчают для машин въезд на склон, можно привести в качестве примера человека, которому проще подниматься по лестнице с дополнительной помощью рук и перил.

Следует добавить, что при использовании на склонах колесных машин в подавляющем большинстве случаев их тандемные пары оснащаются колесными гусеницами.

Лебедки могут интегрироваться в трансмиссии машин в качестве отдельной дополнительной опции, например лебедки Synchronwinch, устанавливаемые на машины компании Ponsse (рис. 1). Интегрированные лебедки есть также на лесных машинах компаний John Deere, Komatsu Forest, Konrad Forsttechnik GmbH. Основным недостатком такого варианта использования лебедок является то, что монтироваться (и демонтироваться) на лесную машину они могут только на заводе-производителе машин или его партнере – производителе лебедок. Их масса составляет около 1 т, стоимость – от 100 до 200 тыс. евро. То есть при переходе лесозаготовительного предприятия от работ на склонах к работам на равнине смонтированные на лесные машины лебедки становятся «мертвым грузом» (что особенно плохо для трелевочной техники, поскольку существенно повышает удельный расход топлива на 1 м³ стрелеванной древесины) и замороженными оборотными средствами.

Рис. 1. Харвестер компании Ponsse, оснащенный лебедкой Synchronwinch [10]

Fig. 1. Ponsse harvester equipped with Synchronwinch winch [10]



Другим вариантом является использование отдельных самоходных лебедок на специальной беспилотной гусеничной (T-winch), экскаваторной (Summit Winch Assist) или бульдозерной (ROB) базах (рис. 2) [7]. Как показывает технологический анализ, применение отдельных самоходных лебедок является более предпочтительным, поскольку одна лебедка может последовательно обслуживать разные лесные машины, например сначала работать на склоне с харвестером, а затем с форвардером или сначала с валочно-пакетирующей машиной, а потом со скиддером и т. д. Кроме этого, такие лебедки на равнине могут быть эффективно задействованы в помощи застрявшим в заболоченной почве машинам, служить основой канатных трелевочных или погрузочно-разгрузочных установок. В том или ином случае тяговое усилие лебедки, к которой прикреплена поднимающаяся на склон лесная машина, позволяет последней снижать касательную силу тяги, развиваемую двигателем, а значит, в меньшей степени воздействовать на

поверхность движения и менее интенсивно образовывать колею (рис. 3). Этот эффект не так заметен при спуске лесной машины на лебедке с крутого или очень крутого склона.



а



б



в

Рис. 2. Самоходная лебедка на базе: а – беспилотной гусеничной T-winch; б – экскаваторной Summit Winch Assist; в – бульдозерной ROB [7]

Fig. 2. Self-propelled winch based on: а – an unmanned tracked T-winch; б – an excavator Summit Winch Assist; в – a bulldozer ROB [7]



Рис. 3. Сравнительный вид последствий работ лесных машин на склоне с использованием и без использования лебедки [7]

Fig. 3. A comparative view of the consequences of work of forestry machines on the slope with and without the use of a winch [7]

Исходя из того, что экосистемы лесов на склонах относятся к одним из самых ранимых, тем более лесов на вечной мерзлоте, значимость экологической безопасности проведения работ в таких условиях при помощи тяжелых

лесных машин возрастает кратно, и важной задачей становится разработка методики расчета результатов взаимодействия движителей машин и лесных почвогрунтов [1, 2, 12–14].

Отдельной эксплуатационной и экологической проблемой работы лесных машин на склонах лесов криолитозоны в теплый период года становится эффект солифлюкции – медленного вязкопластического течения на склонах переувлажненных почв и грунтов в условиях их попеременного промерзания и протаивания, действия силы тяжести [8, 9, 11, 17, 18]. Этот эффект активно проявляется при таянии верхнего слоя сезонной мерзлоты, в результате чего находящийся на них массив почвогрунта переувлажняется и сила тяжести стремится спустить его вниз по склону. При работе лесной машины на таком склоне ее касательная сила тяги начинает помогать этому процессу, что может привести к оползню [6].

Исследованию деформативных свойств почвогрунтов на склонах посвящены труды не только отечественных, но и зарубежных ученых [21–26], однако в результате проведенного информационного поиска не встречено работ, в которых учитывался бы эффект солифлюкции.

Цель – рассмотреть деформативные свойства мерзлотных почвогрунтов на склонах с учетом эффекта солифлюкции.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются почвогрунты лесов криолитозоны на склонах. Используются справочные данные о физико-механических свойствах почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Применялись методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Технологические и геомеханические особенности лесозаготовок на склонах лесов криолитозоны в условиях проявления эффекта солифлюкции заключаются в том, что влажность грунта W приближается к пределу текучести W_t .

На склоне с углом наклона α к линии горизонта оттаивающего почвогрунта вблизи границы зоны сезонной мерзлоты груженная лесная машина суммарной массой Q с гусеничным движителем при направлении движения к вершине склона с использованием лебедки находится под результирующим действием следующих сил:

- 1) тягового усилия лебедки

$$F_n = Q \sin\alpha + \chi Q \cos\alpha,$$

где χ – коэффициент трения гусеницы о влажный почвогрунт;

- 2) силы тяги трактора

$$F_t = N/v,$$

где N – развиваемая мощность двигателя; v – скорость движения трактора;

- 3) максимальной касательной силы сдвига

$$F_c = \tau S = (C + q \operatorname{tg}\varphi) S,$$

где τ – максимальное касательное напряжение сдвига; S – площадь пятна контакта гусеницы с участком поверхности склона; C – величина сцепления;

q – давление трактора на почвогрунт в направлении, перпендикулярном поверхности склона; φ – угол внутреннего трения.

Первые две силы действуют в направлении вершины склона, третья – к его основанию.

Параметры паспорта прочности грунта – C и φ – зависят от влажности и определяются с помощью соотношений [15]. В частности, для оттаивающего суглинка установлено:

$$C = C_c \left(-0,785 \ln \frac{W}{W_c} + 1,0435 \right);$$

$$\varphi = \varphi_c \left(-0,693 \ln \frac{W}{W_c} + 0,8745 \right),$$

где $C_c = 20$ кПа и $\varphi_c = 24^\circ$ – параметры, соответствующие сухому состоянию почвогрунта при влажности 15 %.

Таким образом, при приближении W к пределу текучести $W_T \approx 40\text{--}45\%$ показатели прочности снижаются: для C – с 20 до 4,1 кПа, для φ – с 24 до 4,25°, т. е. почти в 5 раз. Такая низкая несущая способность почвогрунта требует тщательной оценки критических нагрузок на него при перемещении лесных машин и трелевочных систем на их базе на склонах и глубины образованной колеи.

При направлении движения к вершине склона баланс сил принимает вид

$$\Delta F = F_n + F_T - F_c > 0.$$

Результирующая сила ΔF , отнесенная к площади пятна контакта S , должна обеспечить суммарное напряжение сдвига на глубину h массива, не превышающее несущую способность почвогрунта p_s . Как отмечалось в [16], при разрушении почвогрунта с внутренним трением вертикальные и тангенциальные компоненты тензора напряжений связаны между собой коэффициентом бокового распора $\mu = \nu/(1-\nu)$, где ν – коэффициент Пуассона.

В предельном состоянии при $W \rightarrow W_T$ коэффициент Пуассона $\nu \rightarrow 0,5$ [15], т. е. коэффициент затухания напряжений в глубине массива $n = 1 - \mu/2 \rightarrow 1/2$. Значение $\mu = 1$ означает, что массив почвогрунта находится в состоянии гидростатического сжатия, вертикальные и тангенциальные компоненты принимают близкие значения и в качестве начального давления на почвогрунт можно принять $q = \Delta F/S$.

Таким образом, приходим к ограничению на результирующую силу ΔF для образования колеи глубиной h_k :

$$\Delta F \leq p_s S \sqrt{\frac{h_k}{r_k}},$$

где r_k – радиус пятна контакта, $r_k = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$.

В итоге установлено ограничение мощности тяги движителя трактора при следовании к вершине склона с использованием силы тяги лебедки:

$$N \leq Sv \left[p_s \sqrt{\frac{h_k}{r_k}} + C + q \operatorname{tg} \varphi - \frac{Q}{S} (\sin \alpha + \chi \cos \alpha) \right].$$

Приняв нормативную глубину колеи $h_k = h_n = 0,1$ м, произведем расчеты при следующих исходных данных:

используется трактор John Deer 9RT с номинальной мощностью 570 л. с., массой 5,8 т и максимальной нагрузкой 9,072 т. Таким образом, суммарная масса Q в расчетах изменяется от 5,8 до 14,872 т;

скорость движения трактора принята 1 м/с, площадь пятна контакта гусеницы с грунтом – 5,3884 м², коэффициент трения – 0,05;

угол наклона склона изменяется от 5 до 40°;

несущая способность почвогрунта варьирует в диапазоне от 19,36 до 96,8 кПа, предел текучести грунта – 40–45 %, коэффициент Пуассона – 0,45–0,50.

На рис. 4 при $\alpha = 20^\circ$ и $Q = 14$ т представлена зависимость коэффициента K_N , равного отношению допустимой мощности трактора к номинальной, от величины p_s .

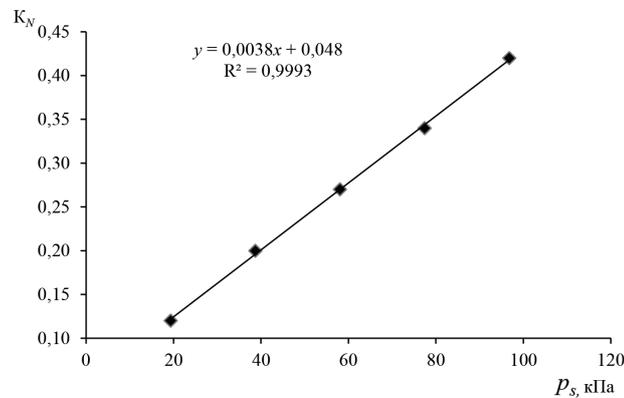


Рис. 4. Влияние несущей способности почвогрунта на мощность трактора

Fig. 4. The effect of soil bearing capacity on the tractor power

Линейный характер связи указывает на то, что при работе на слабых почвогрунтах при проявлении эффекта солифлюкции реализуемая мощность трактора на касательную силу тяги не должна превышать 15–20 % ее номинального значения, для того чтобы глубина колеи не была больше нормативного показателя.

Если задаться целью полностью исключить образование колеи, т. е. $h_k \rightarrow 0$, то $K_N \leq 0,1$. Это означает, что участие силы тяги трактора будет минимальным по сравнению с силой тяги лебедки, которая и обеспечит движение трактора вверх по склону.

Исследуем влияние угла наклона склона на силу тяги лебедки (рис. 5).

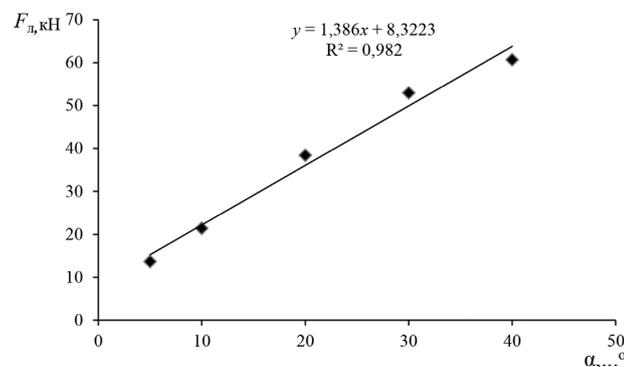


Рис. 5. Влияние угла наклона склона на силу тяги лебедки

Fig. 5. The effect of the slope angle on the winch tractive effort

Установленный коэффициент пропорциональности, равный 1,386 в линейном уравнении связи, являясь производной полученной функции $F_d(\alpha)$, свидетельствует о существенной динамике в процессе воздействия угла α на силу F_d .

Особое значение для рассматриваемого вопроса представляет исследование влияния массы нагруженного трактора Q на соотношение сил максимального сдвига и тяги лебедки. Результаты этого исследования представлены на рис. 6. Данные получены при различных значениях угла наклона склона: 10 и 20°.

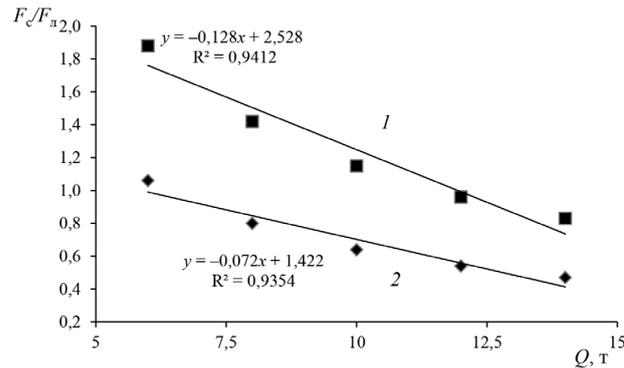


Рис. 6. Влияние массы трактора на соотношение сил сдвига и тяги лебедки при угле наклона склона: 1 – 20°; 2 – 10°

Fig. 6. The effect of the tractor mass on the ratio of shear force and the winch tractive effort at the slope angle: 1 – 20°; 2 – 10°

Как следует из рис. 6, при небольших нагрузках на почвогрунт и углах наклона склона сила тяги лебедки близка к максимальной силе сдвига с определенным положительным балансом. Однако с ростом Q равновесие нарушается в пользу величины F_d , существенно превышающей силу F_c по мере достижения максимальной загрузки трактора. Мощность касательной силы тяги трактора при этом можно минимизировать.

С ростом угла наклона склона проявляется более существенное участие силы F_c по сравнению с F_d практически во всем диапазоне суммарной массы Q . В этой ситуации необходимо дополнительное участие касательной силы тяги трактора в соответствии с ограничением мощности тяги двигателя трактора. И только по достижении максимальных значений Q ситуация меняется в пользу большего влияния силы тяги лебедки с одновременным снижением реализуемой двигателем мощности трактора.

На рис. 7 отражено совместное воздействие массы трактора Q и угла α на силу тяги лебедки.

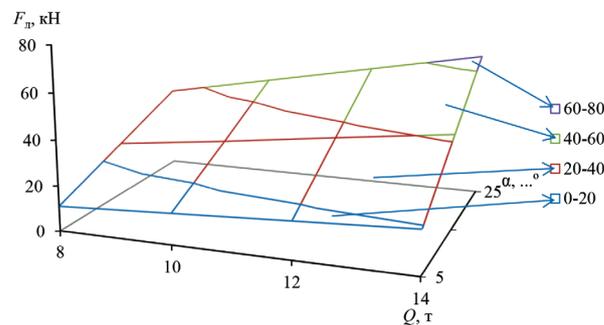


Рис. 7. Влияние массы трактора и угла наклона склона на силу тяги лебедки

Fig. 7. The effect of the tractor mass and the slope angle on the winch tractive effort

Из рис. 7 видно, что с ростом массы лесной машины от 8 до 14 т и угла наклона склона от 5 до 25° сила тяги лебедки увеличивается более чем в 5–6 раз и без соответствующей работы двигателя переместить тяжелый трактор по крутому склону вверх не представляется возможным.

Заключение

Таким образом, произведенные оценки позволяют в сложных условиях солифлюкции переувлажненного оттаивающего лесного почвогрунта установить необходимые ограничения на касательную силу тяги трактора при использовании лебедок с целью минимизации образования колеи при работах на склонах в криолитозоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуал. направления науч. исследований XXI в.: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4(40). С. 25–29.

Grigoreva O.I. Features of Natural Reforestation in the Conditions of the Cryolithozone. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2018, vol. 6, no. 4(40), pp. 25–29. (In Russ.).

2. Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 19 апр. 2018 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень, 2018. С. 79–83.

Grigoreva O.I. Efficiency of Transport and Technological Systems for Forestry. *Transport and Transport-Technological Systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference* (Tyumen', April 19, 2018). Ed.-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 79–83. (In Russ.).

3. Григорьева О.И., Гринько О.И., Николаева Ф.В. Лесопожарные транспортно-технологические комплексы на базе колесных форвардеров // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 15 апр. 2021 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень, 2021. С. 55–58.

Grigoreva O.I., Grinko O.I., Nikolaeva F.V. Forest Fire Transport and Technological Complexes Based on Wheeled Forwarders. *Transport and Transport-Technological Systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference* (Tyumen', April 15, 2021). Ed.-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen, 2021, pp. 55–58. (In Russ.).

4. Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И., Войнаш С.А. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров // Машиностроение: новые концепции и технологии: Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 20 окт. 2020 г. Красноярск, 2020. С. 45–49.

Grigoreva O.I., Davtyan A.B., Grinko O.I., Voynash S.A. The Concept of a Universal Machine for Performing Forestry Work and Extinguishing Forest Fires. *Mechanical Engineering: New Concepts and Technologies: All-Russian Scientific and Practical Conference for Students, Postgraduates and Young Scientists* (Krasnoyarsk, October 20, 2020). Krasnoyarsk, 2020, pp. 45–49. (In Russ.).

5. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Лесные плантации для сырьевого обеспечения деревоперерабатывающих предприятий // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы 3-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Петрозаводск, 30 мая 2017 г. Петрозаводск, 2017. С. 59–61.

Grigoreva O.I., Nguyen F.Z. Forest Plantations for Raw Material Supply of Wood-Processing Enterprises. *Improving the Efficiency of the Forest Complex: Materials of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation* (Petrozavodsk, May 30, 2017). Petrozavodsk, 2017, pp. 59–61. (In Russ.).

6. Каляшов В.А., Григорьев И.В., Иванов В.А., Юдильевич А.М., Бурмистрова О.Н., Охлопкова М.К., Григорьева О.И. Особенности лесных почвогрунтов криолитозоны как объекта воздействия движителей лесных машин // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4(60). С. 94–101.

Kalyashov V.A., Grigoriev I.V., Ivanov V.A., Yudilevich A.M., Burmistrova O.N., Okhlopko M.K., Grigorieva O.I. Features of Forest Soils of the Cryolithozone as an Object of Influence of Forest Machinery Movers. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2023, no. 4(60), pp. 94–101. (In Russ.).

7. Каляшов В.А., До Туан А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1–47.

Kalyashov V.A., Do Tuan A., Hitrov E.G., Grigoreva O.I., Gur'ev A.Yu., Novgorodov D.V. Modern Systems of Machinery and Technologies for Timber Harvesting and Reforestation in Mountain Forests. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6163>

8. Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Угаров И.С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли. 2006. Т. X, № 3. С. 15–22.

Konstantinov P.Ya., Argunov R.N., Gerasimov E.Y., Ugarov I.S. On the Relationship between Seasonal Thaw Depth and Interannual Variation of Mean Annual Ground Temperature. *Kriosfera Zemli* = Earth's Cryosphere, 2006, vol. X, no. 3, pp. 15–22. (In Russ.).

9. Кулижский С.П. Оценка физического состояния почв на основе зависимости потенциала (давления) почвенной влаги от влажности // Современные проблемы мерзлотного почвоведения и прикладной экологии Севера: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Якутск, 29–30 марта 2012 г. Якутск: СВФУ, 2013. С. 48–63.

Kulizhskiy S.P. Assessment of the Physical Condition of Soils Based on the Dependence of Soil Moisture Potential (Pressure) on Humidity. *Current Problems of Permafrost Soil Science and Applied Ecology of the North: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (Yakutsk, March 29–30, 2012). Yakutsk, NEFU Publ., 2013, pp. 48–63. (In Russ.).

10. Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. СПб.: Изд.-полигр. ассоц. высш. учеб. заведений, 2019. 192 с.

Kunitskaya O.A., Chernutskiy N.A., Derbin M.V., Rudov S.E., Grigorev I.V., Grigoreva O.I. *Machine Harvesting of Wood Using Scandinavian Technology*. St. Petersburg, Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019. 192 p. (In Russ.).

11. Лейбман М.О. Динамика слоя сезонного оттаивания пород и методика измерения его глубины в различных ландшафтах Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2001. Т. V, № 3. С. 17–24.

Leibman M.O. Dynamics of the Layers of Seasonal Thawing of Rocks and Methods for Measuring its Depth in Various Landscapes of Central Yamal. *Kriosfera Zemli* = Earth's Cryosphere, 2001, vol. V, no. 3, pp. 17–24. (In Russ.).

12. Никифорова А.И., Григорьева О.И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуал. направления науч. исследований XXI в.: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4(16-4). С. 320–323.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Modeling of the Impact of the Propulsion of Forest Machines on the Soil of the Cutting Area. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual Directions of Scientific Research of the XXI century: Theory and Practice, 2015, vol. 3, no. 5-4(16-4), pp. 320–323. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/16269>

13. Никифорова А.И., Григорьева О.И., Киселев Д.С., Хахина А.М., Рудов М.Е. Оценка экологической безопасности работы лесных машин // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: материалы Междунар. науч.-практ. форума, Хабаровск, 25–26 окт. 2012 г. Хабаровск: ТГУ, 2013. С. 134–138.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kiselev D.S., Khakhina A.M., Rudov M.E. Assessment of Environmental Safety of Forestry Machines. *Natural Resources and Ecology of the Far Eastern Region: Materials of the International Scientific and Practical Forum* (Khabarovsk, October 25–26, 2012). Khabarovsk, TSU Publ., 2013, pp. 134–138. (In Russ.).

14. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Уч. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2014. № 2(139). С. 87–91.

Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymskiy A.A., Grigor'eva O.I. Two-Layer Ground Draught Definition under Logging Machine Passage. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskkiye nauki* = Proceedings of Petrozavodsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences, 2014, no. 2(139), pp. 87–91. (In Russ.).

15. Рудов С.Е., Шати́ро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Пучнин А.Н. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 116–128.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'ev M.F., Puchnin A.N. Features of Taking into Account the Condition of Frozen Soils Solid Mass in Cyclic Interaction with the Skidding System. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2019, vol. 9, no. 1(33), pp. 116–128. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5c92016f49c838.40242030

16. Рудов С.Е., Шати́ро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 101–117.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. The Study of the Destruction Process of Frozen and Thawing Soils Exposed to the Skidding System. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 2, pp. 101–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-101-117>

17. Савви́нов Д.Д. Гидротермический режим почв в зоне многолетней мерзлоты. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 254 с.

Savvinov D.D. *Hydrothermal Regime of Soils in the Permafrost Zone*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Siberian Department), 1976. 254 p. (In Russ.).

18. Савви́нов Д.Д. Фундаментальные и прикладные проблемы мерзлотного почвоведения // Современные проблемы мерзлотного почвоведения и прикладной экологии Севера: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Якутск, 29–30 марта 2012 г. Якутск: СВФУ, 2013. С. 9–17.

Savvinov D.D. Fundamental and Applied Issues of Permafrost Soil Science. *Current Problems of Permafrost Soil Science and Applied Ecology of the North: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (Yakutsk, March 29–30, 2012). Yakutsk, NEFU Publ., 2013, pp. 9–17. (In Russ.).

19. Тетеревлева Е.В., Гринько О.И., Григорьева О.И. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колесных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 22 окт. 2020 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 374–377.

Teterevleva E.V., Grin'ko O.I., Grigoreva O.I. Transport and Technological Vehicles for Extinguishing Forest Fires Based on Wheeled All-Terrain Vehicles. *Transport and Transport-Technological Systems: Materials of the International Scientific and Technical*

Conference (Tyumen', October 22, 2020). Ed.-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen', 2020, pp. 374–377. (In Russ.).

20. Чемишкова Ю.М., Давтян А.Б., Григорьева О.И. Транспортно-технологические системы для лесоразведения на базе гусеничных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 22 окт. 2020 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 400–403.

Chemshikova Yu.M., Davtyan A.B., Grigoreva O.I. Transport and Technological Systems for Afforestation Based on Tracked All-Terrain Vehicles. *Transport and Transport-Technological Systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference* (Tyumen', October 22, 2020). Ed.-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen', 2020, pp. 400–403. (In Russ.).

21. Abdelbaki A.M. Evaluation of Pedotransfer Functions for Predicting Soil Bulk Density for U.S. Soils. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9, iss. 4, pp. 1611–1619. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.12.002>

22. Amoozegar A., Heitman J.L., Kranz C.N. Comparison of Soil Particle Density Determined by a Gas Pycnometer Using Helium, Nitrogen, and Air. *Soil Science Society of America Journal*, 2023, vol. 87, iss. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1002/saj2.20476>

23. Gonçalves J.L.M., Alvares C.A., Rocha J.H.T., Brandani C.B., Hakamada R. Eucalypt Plantation Management in Regions with Water Stress. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 2017, vol. 79, iss. 3, pp. 169–183. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415>

24. Marra E., Laschi A., Fabiano F., Foderi C., Neri F., Mastrodonardo G., Marchi E. Impacts of Wood Extraction on Soil: Assessing Rutting and Soil Compaction Caused by Skidding and Forwarding by Means of Traditional and Innovative Methods. *European Journal of Forest Research*, 2022, vol. 141, pp. 71–86. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01420-w>

25. Strandgard M., Alam M., Mitchell R. Impact of Slope on Productivity of a Self-Levelling Processor. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 35, iss. 2, pp. 193–200.

26. Zhou C., Huang W., Qiu S., Liu Z. A Quantitative Study on the Amount of Water-Retaining Agent Based on Adhesive-Modified Red Bed Weathered Soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, vol. 80, pp. 3139–3150. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02113-9>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article