

Оценка значимости геотехнических факторов лесозаготовительных работ на склонах криолитозоны

В.Я. Шапиро^{1а}, А.Ю. Гурьев^{2б}, В.А. Каляшов^{3с}, И.В. Григорьев^{2д}, В.П. Друзьянова^{4е},
О.Б. Марков^{5ф}

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

²Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, 3, Якутск, Россия

³Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, Россия

⁴Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, ул. Белинского, 58, Якутск, Россия

⁵Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Россия

^а shapiro54vlad@mail.ru, ^б sashafuryjager96@gmail.com, ^с vit832@yandex.ru, ^д silver73@inbox.ru, ^е druzvar@mail.ru, ^ф 79212222619@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, ^д <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^е <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>, ^ф <https://orcid.org/0000-0002-2467-9607>

Статья поступила 11.04.2025, принята 16.05.2025

В статье выполнен математический анализ и получены аналитические выражения, отражающие степень влияния углового параметра наклона плоскости склона к линии горизонта, влажности почвогрунта, мощности силы тяги лесной машины, углового параметра наклона плоскости анизотропии к плоскости склона, углового параметра наклона плоскости дилатансии почвогрунта к плоскости склона, веса лесной машины или трелевочной системы на ее базе и давления движителя на почвогрунт на интенсивность образования колеи при проведении лесосечных работ на склонах в условиях криолитозоны. Результаты анализа важны для принятия организационно-технических решений, повышающих эксплуатационную и экологическую эффективность работы лесных машин в рассматриваемых природно-производственных условиях, а также для обеспечения безопасности работ. Материалы статьи обосновывают необходимость постоянного мониторинга рассматриваемых факторов и перспективность создания системы автоматизированного контроля. Полученные в работе оценочные соотношения могут составить основу функционала, который через интерфейс мобильного приложения будет служить оперативной поддержкой принятия решений оператором лесной машины. Такая система позволит оперативно, например, с помощью смартфона, реагировать на конкретную геотехническую обстановку при работе на склонах и корректировать технологические показатели и параметры трелевочной системы – скорость движения, грузоподъемность, мощность тяги двигателя, нагрузку на вспомогательную лебедку и др. Работа оператора, в свою очередь, будет поддаваться контролю со стороны инженерно-технических служб – технолога, механика. В конечном итоге вполне возможно формирование системы управления базой данных технологических работ на склонах (СУБД), как одного из наиболее перспективных направлений цифровизации и информационной поддержки технологических процессов работы лесных машин.

Ключевые слова: леса на склонах; леса на многолетней мерзлоте; лесозаготовки; лесные машины; трелевочные системы; деформация почвогрунта; колесобразование; геотехнические факторы.

Assessment of the importance of geotechnical factors of logging operations on the slopes of the cryolithozone

V.Ya. Shapiro^{1а}, A.Yu. Guriev^{2б}, V.A. Kalyashov^{3с}, I.V. Grigoriev^{2д}, V.P. Druzyanova^{4е},
O.B. Markov^{5ф}

¹ St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia

² Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoye Shosse, Yakutsk, Russia

³ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

⁴ North-eastern Federal University named after M.K. Ammosov; 58, Belinsky St., Yakutsk, Russia

⁵ Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia

^а shapiro54vlad@mail.ru, ^б sashafuryjager96@gmail.com, ^с vit832@yandex.ru, ^д silver73@inbox.ru, ^е druzvar@mail.ru, ^ф 79212222619@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, ^д <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^е <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>, ^ф <https://orcid.org/0000-0002-2467-9607>

Received 11.04.2025, accepted 16.05.2025

Mathematical analysis is performed in the article, and analytical expressions are obtained reflecting the degree of influence of the angular parameter of the slope plane to the horizon, soil moisture, traction power of the forest machine, the angular parameter of the slope of the anisotropy plane to the slope plane, the angular parameter of the slope of the dilatation plane of the soil to the slope plane, the weight of the forest machine, or skidding system on its base, and the pressure of the propulsor on the soil base on the intensity of track formation during logging operations on slopes in cryolithozone conditions. The results of the analysis are important for making organizational and technical decisions that increase the operational and environmental efficiency of forest machines in the considered natural and production conditions, as well as for ensuring work safety. The materials of the article substantiate the need for constant monitoring of the factors under consideration, and the prospects for creating an automated control system. The estimated ratios obtained in the work can form the basis of the functionality, which through the interface of the mobile application will serve as operational support for decision-making by the operator of the forest machine. Such a system will make it possible to react promptly, for example, using a smartphone, to respond to the specific geotechnical situation when working on slopes and adjust the technological indicators and parameters of the skidding system - speed, load capacity, engine traction power, load on the auxiliary winch and others. The operator's work, in its turn, will be controlled by engineering and technical services - technologist, mechanic. Ultimately, it is quite possible to form a database management system for technological works on slopes as one of the most promising directions of digitalization and information support of technological processes of forest machines operation.

Keywords: forests on slopes; forests on permafrost; logging; forestry machines; skidding systems; soil deformation; rutting; geotechnical factors.

Введение. При оценке эффективности рубок леса принято выделять эксплуатационную и экологическую эффективность. Эксплуатационная эффективность подразумевает прежде всего оценку производительности и энергоемкости всего комплекса работ или отдельных технологических операций. Экологическая эффективность в первую очередь подразумевает оценку ущерба, наносимого лесной экосистеме, временные и стоимостные затраты на восстановление лесной среды после проведения рубок [1–4].

Эксплуатационная и экологическая эффективности во многом взаимосвязаны и во многом зависят от совместимости используемых машин и оборудования, а также технологических процессов и схем разработки лесосек с лесной средой в конкретных природно-производственных условиях эксплуатации. Например, применение тяжелых колесных лесных машин и трелевочных систем на их базах на слабонесущих почвогрунтах без использования моногусениц, укрепления ездовой части трелевочных волоков и использования специальных схем разработки лесосек, снижающих грузовую работу волоков, приводит к сильному колееобразованию – сильному повреждению лесной среды, т. е. отрицательно сказывается на экологической эффективности [5–8]. Одновременно с этим с ростом глубины колеи возрастают нагрузки в трансмиссии машин, снижается их скорость перемещения (а значит и производительность), увеличивается расход топлива, т. е. снижается и эксплуатационная эффективность [9–12].

Чем более ранимы лесные экосистемы, тем тщательнее необходимо подходить к планированию лесосечных работ – выбору применяемых машин и оборудования, технологических процессов и схем разработки лесосек [13–17].

Ярким примером особо ранимых лесных экосистем являются леса криолитозоны, особенно на склонах на многолетней мерзлоте, в которых неправильное планирование и выполнение работ по рубке лесных насаждений приводит к очень существенному ущербу для лесной среды одновременно с существенным ухудшением условий для движения лесных машин и трелевочных систем на их базах (рис. 1).



Рис. 1. Негативные последствия воздействия лесных машин на трелевочный волок на склоне

Для повышения эксплуатационной и экологической эффективности работы лесных машин и трелевочных систем на их базах в настоящее время все шире используются специальные лебедки, помогающие машинам перемещаться по склонам. Такие лебедки могут быть встроены в трансмиссию лесных машин, или быть отдельными самоходными (рис. 2, 3). Также при работе на склонах колесные лесные машины принято оснащать колесными моногусеницами (см. рис. 3) [18–20].



Рис. 2. Самоходная лебедка T-winch



Рис. 3. Харвестер, оснащенный лебедкой Synchrowinch

Материалы и методы исследования. Для исследования применялись справочные данные о физико-механических свойствах мерзлых и оттаивающих почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Использованы методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования. Эффективность выполнения основных операций лесосечных работ, прежде всего тракторной трелевки на склонах лесов на многолетней мерзлоте, зависит от ряда геотехнических параметров (факторов), к которым в первую очередь относится состояние краевой части массива оттаивающего почвогрунта слоя сезонной мерзлоты, слагающего трассу движения лесной машины и подверженного чередующимся промерзаниям и оттаиваниям.

Близость мерзлого водонепроницаемого слоя приводит к тому, что концентрация влаги растет, особенно у подошвы склона, что увеличивает общую влажность (W , %) почвогрунта до уровней предела его текучести (W_T , %). Для оценки влажности почвогрунта введем безразмерный коэффициент $K_W = W/W_T$.

Отмеченные факторы в условиях предельного состояния почвогрунта, когда $K_W \rightarrow 1$, являются причиной существенного снижения его прочности – величины сцепления C и угла внутреннего трения φ , что сказывается на глубине h_k , образующейся под действием движителей лесных машин колеи и работоспособности трелевочного волокна (или технологического коридора) в целом как при статических, так и динамических нагрузках [21–23]. При работах на склонах эти факторы приобретают особую значимость.

Разработанная в работе [24] для таких природно-производственных условий работ математическая модель позволила установить соотношение, определяющее ограничение мощности (N) силы тяги лесной машины при движении к вершине склона при использовании дополнительной силы тяги лебедки:

$$N \leq Sv \left[p_s \sqrt{\frac{h_k}{r_k}} + C + q \operatorname{tg} \varphi - \frac{Q}{S} (\sin \alpha + \chi \cos \alpha) \right], \quad (1)$$

где C – величина сцепления; φ – угол внутреннего трения; p_s – несущая способность почвогрунта; Q – вес лесной машины или трелевочной системы; q – давление движителя лесной машины на почвогрунт в направлении, перпендикулярном поверхности склона;

S, r_k – площадь и радиус пятна контакта гусеницы с участком поверхности склона; v – скорость движения лесной машины; h_k – глубина образующейся колеи; α – угол наклона склона к линии горизонта; χ – коэффициент трения гусеницы о влажный почвогрунт.

Из соотношения (1) в работе [5] предложено определять h_k в виде:

$$h_k \geq \sqrt{\frac{S}{\pi} \left\{ \frac{1}{p_s} \left[\frac{N}{vS} + q (\sin \alpha + \chi \cos \alpha - \operatorname{tg} \varphi) - C \right] \right\}^2}. \quad (2)$$

Работоспособным будем считать такой трелевочный волок (технологический коридор), у которого величина h_k не превосходит нормативную величину $h_n = 0,1$ м.

Для сравнительных оценок введем безразмерный коэффициент $K_h = \frac{h_k}{h_n}$ как меру превышения глубины колеи своего нормативного уровня.

В работе [25] отмечено влияние следующих факторов на процесс образования колеи при тракторной трелевке на склоне с применением сил тяги трактора и лебедки:

- углового параметра α наклона плоскости склона к линии горизонта;
- влажности W почвогрунта;
- мощности N силы тяги лесной машины;
- углового параметра β наклона плоскости анизотропии к плоскости склона, когда показатели свойств и характеристик почвогрунта, в первую очередь относящиеся к паспорту прочности, отличаются в различных направлениях;
- углового параметра ψ наклона плоскости дилатансии почвогрунта к плоскости склона, которая при внешних нагрузках вызывает в краевой части массива рост средних напряжений, что обуславливает увеличение сопротивления сдвигу и повышение несущей способности почвогрунта;
- веса Q лесной машины, или трелевочной системы на ее базе, и давления q движителя на почвогрунт.

Остановимся подробнее на учете влияния всех отмеченных факторов на формирование глубины колеи и работоспособности трелевочного волокна (технологического коридора) в контексте критериев, развитых в работе [26].

Для корректного сравнительного анализа значимости факторов необходимо установить однородные функциональные или корреляционные соотношения, определяющие их влияние на глубину колеи в общей области определения функций.

Расчеты произведены для суглинка с характеристиками прочности в сухом состоянии при $W = W_c = 15$ %: $p_{sc} = 96$ кПа, $C_c = 20$ кПа, и $\varphi_c = 24^\circ$. Перерасчет параметров прочности при реальной влажности грунта W произведен на основании соотношений, полученных в работе [25].

Предел текучести влажного суглинка принят $W_T = 45$ %, $K_W = 0,78$ ($W = 35$ %), нормативная глубина колеи $h_n = 0,1$ м.

Используется гусеничная лесная машина с номинальной мощностью $N_m = 419$ кВт, весом 5,8 т, и максимальной нагрузкой до 9,072 т, т. е. суммарный вес

трелевочной системы Q на базе принятой лесной машины изменялся в расчетах от 5,8 до 14,872 т, давление движителя на почвогрунт q – от 10,76 до 27,6 кПа.

Скорость движения трелевочной системы $v = 1$ м/с, площадь пятна контакта гусеницы с грунтом $S = 5,3884$ м², коэффициент трения $\chi = 0,05$.

Для оценки относительной величины допустимой, обеспечивающей равновесное состояние краевой части массива почвогрунта, мощности силы тяги лесной машины введен коэффициент $K_N = \frac{N}{N_m}$. Абсолютное значение допустимой мощности силы тяги лесной машины принято в данном примере $N = 83,85$ кВт ($K_N = 0,2$).

Фактор угла наклона поверхности склона. На рис. 4 показано влияние относительного угла $\bar{\alpha}$ на коэффициент K_h . Поскольку при расчетах диапазон изменения абсолютной величины α составлял 10–30°, то параметр $\bar{\alpha}$ изменялся от 1 до 3.

Как видим, корреляционную зависимость K_h ($\bar{\alpha}$) можно считать практически функциональной, с высоким коэффициентом детерминации, и она подчиняется линейному закону в своей области определения относительного аргумента от 1 до 3:

$$K_h = 0,475 \bar{\alpha} + 0,0567. \quad (3)$$

Для таких условий перемещения лесной машины (трелевочной системы на ее базе) и данного примера расчета при пологих и не крутых склонах (α не более 20°) расчетная глубина колеи не будет превышать нормативного значения ($K_h \leq 1$).

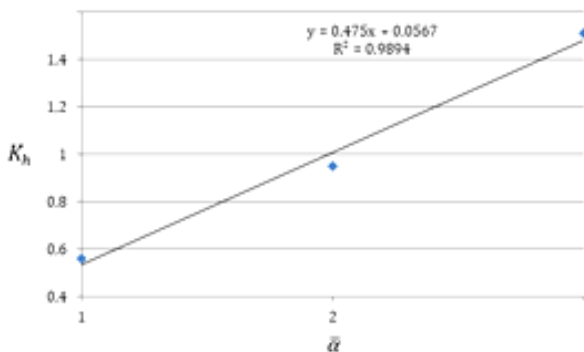


Рис. 4. Влияние угла наклона склона на глубину колеи

Фактор влажности почвогрунта. Зафиксируем угловой параметр $\alpha = 10^\circ$ и исследуем влияние влажности почвогрунта на коэффициент K_h .

Результаты расчетов представлены на рис. 5, где показано влияние относительной влажности $\bar{W} = W/W_c$ по оси ординат – K_h .

В диапазоне изменения $\bar{W}$ от 1 до 2,4 (W от 15 до 35 %) с достаточно высоким коэффициентом детерминации зависимость K_h от $\bar{W}$ также подчиняется линейному закону:

$$K_h = 0,6786 \bar{W} - 0,7613, \quad (4)$$

при этом глубина образуемой колеи не выходит за границы нормативного уровня.

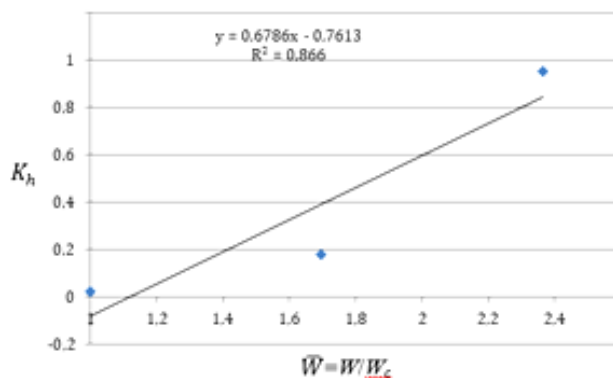


Рис. 5. Влияние влажности почвогрунта на глубину образуемой колеи

Фактор мощности силы тяги лесной машины на глубину образуемой колеи. Зафиксируем $K_W = 0,9$ ($W = 35$ %) и оценим (рис. 6) влияние параметра N на глубину колеи.

Для корректного сравнительного анализа значения N отнесены к величине, соответствующей минимальному значению $N = 41,9$ кВт ($K_N = 0,1$).

В этом случае на оси абсцисс представляется возможным отразить величину относительной мощности $\bar{N}$ в диапазоне от 1 до 2, т. е. в области, близкой к области определения для двух предыдущих соотношений, а на оси ординат также отложить коэффициент K_h .

Близкая к функциональной линейная корреляционная зависимость может быть описана уравнением:

$$K_h = 2,14 \bar{N} - 1,688. \quad (5)$$

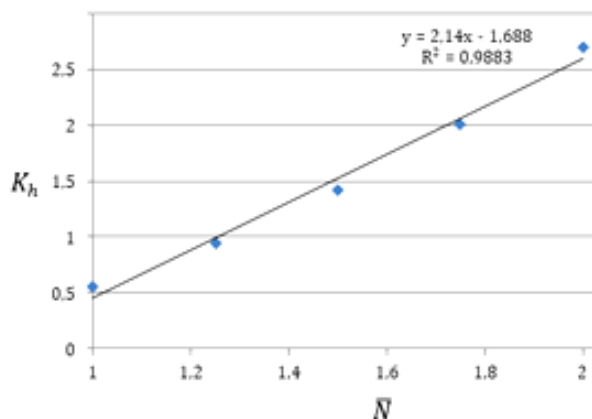


Рис. 6. Влияние мощности силы лесной машины на глубину образуемой колеи

Как следует из анализа данных рис. 6, нормативное значение глубины колеи достигается при использовании мощности силы тяги лесной машины, не более чем на 20–25 % превышающий минимальный уровень, и основное усилие по перемещению лесной машины (трелевочной системы на ее базе) к вершине склона обеспечивается с помощью лебедки.

Факторы анизотропии и дилатансии. Рассмотрим при постоянном параметре $N = 83,85$ кВт ($K_N = 0,2$) и давлении движителя лесной машины на почвогрунт

$q = 18,56$ кПа ($Q = 10$ т) влияние анизотропии и дилатансии на распределение сил тяги лесной машины и лебедки для благоприятных условий перемещения, а именно: перемещение по пологому склону ($\alpha = 5^\circ$) и массив почвогрунта умеренно влажный ($K_W = 0,73$, $W = 33\%$).

Оценка основана на методических положениях [27–29] о влиянии анизотропии свойств и дилатансии почвогрунта на параметры паспорта его прочности.

Эти положения использованы в [30] при определении устойчивости краевой части массива оттаивающего почвогрунта на склонах лесов зоны криолита и работоспособности трелевочного волока (технологического коридора).

На рис. 7 представлены результаты расчетов, где отложены безразмерные угловые параметры $\bar{\beta}$ и $\bar{\psi}$ (β и ψ отнесены к 10°), и безразмерный коэффициент K_h .

При оценке влияния одного углового параметра другой параметр принимался равным нулю, т. е. оценка производилась последовательно. В итоге получены соотношения:

$$K_h = -0,05\bar{\beta} + 0,505, \quad (6)$$

$$K_h = -0,017\bar{\psi} + 0,475. \quad (7)$$

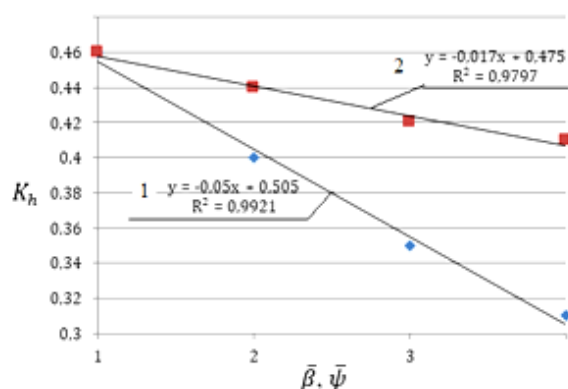


Рис. 7. Влияние анизотропии и дилатансии на глубину образуемой колеи: 1 – анизотропия; 2 – дилатансия

Фактор веса лесной машины (трелевочной системы на ее базе) и давления движителя на почвогрунт. Исследуем возможность достижения нормативных значений глубины колеи при наиболее типовых условиях перемещения лесной машины (трелевочной системы на ее базе), а именно при значениях: $\alpha = 15^\circ$, $K_W = 0,78$ ($W = 35\%$), $K_N = 0,2$ при изменении веса Q от 5,8 до 12 т и давления движителя q от 10,76 до 22,27 кПа (относительная величина $\bar{q}$ изменялась от 1 до 2,07). На рис. 8 представлены результаты расчетов влияния величины $\bar{q}$ на параметр K_h .

Полученные данные описываются линейной зависимостью:

$$K_h = 0,5621\bar{q} + 0,2572. \quad (8)$$

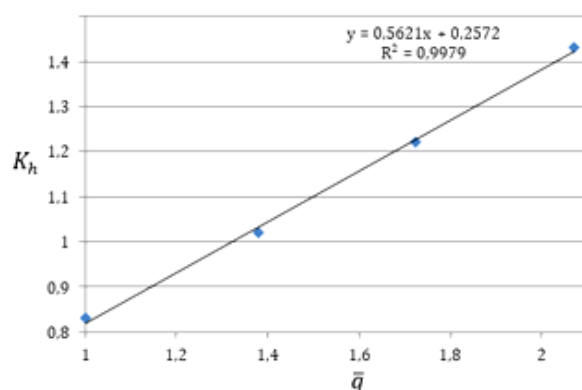


Рис. 8. Влияние давления движителя лесной машины на глубину образуемой колеи

Установленные линейные зависимости (3)–(8) на общих участках их областей определения позволяют произвести сравнительный анализ значимости изученных факторов в процессе образования колеи.

С этой целью при фиксированном значении аргументов, которое равно 2, определялись соответствующие значения функций K_h .

Далее всем аргументам придавали фиксированное, в частности, 10%-е, приращение и оценивали соответствующие приращения функций. Доля этих приращений в величине результирующего приращения определяет фактор значимости конкретного аргумента.

Результаты расчетов сведены в таблице, причем знак плюс означает, что фактор с его ростом способствует увеличению глубины образуемой колеи, а знак минус – уменьшению, при этом ноль соответствует тому, что фактор является нейтральным.

Таблица. Оценка значимости факторов

Фактор	Приращение K_h	Значимость
	%	
Влажность, W	+21,67	41
Мощность силы тяги, N	+16,60	32
Наклон склона, α	+8,91	17
Давление движителя, q	+7,91	15
Анизотропия, β	-2,50	5
Дилатансия, ψ	0	0
	ИТОГО 52,65 %	ИТОГО 100 %

Выводы. Таким образом, предложенный математический анализ и выполненные оценки позволяют сделать вывод о том, что для условий реализации машинных лесосечных работ, в том числе при тракторной трелевке на склонах лесов криолитозоны, установлено различное влияние на процесс образования колеи и работоспособность трелевочных волоков (технологических коридоров) ряда геотехнических, технологических и геомеханических факторов.

К факторам, оказывающим наиболее существенное влияние на увеличение глубины колеи, следует отнести состояние влажности почвогрунта W и мощность силы тяги лесной машины N .

К значимым факторам относятся такие параметры как ориентация α поверхности склона к линии горизон-

та и величина давления q двигателя на краевую часть массива почвогрунта.

Факторы ориентации β плоскости анизотропии свойств массива в направлениях параллельном и перпендикулярном поверхности склона и ориентации ψ плоскости дилатансии почвогрунта следует признать малозначимыми.

Необходимо отметить, что если угловой параметр α известен до начала работ, параметры q и N контролируются оператором лесной машины в процессе работы, то величина влажности W является наиболее неопределенным и вариативным параметром, который изменяется даже в пределах отдельных участков трассы от подошвы склона до его вершины.

Как показали произведенные оценки, рост величины W на один относительный процент обуславливает четырехпроцентное увеличение глубины колеи. Допустим, что массив почвогрунта на некотором участке волокна или технологического коридора в определенных условиях движения лесной машины (трелевочной системы) характеризуется как достаточно сухой с показателем влажности $W = 20\text{--}25\%$.

При транспортировке 7 т груза к вершине склона величина силы тяги трактора $N = 111,5$ кВт, давление двигателя на почвогрунт $q = 20\text{--}22$ кПа и глубина образуемой колеи при этом не выходит за границы нормативного уровня $h_n = 0,1$ м.

Если вследствие ряда геотехнических или сезонно-климатических условий влажность W увеличилась в 2 раза до 40–45 % и почвогрунт перешел в состояние предела своей текучести, то прогнозировать глубину образуемой колеи необходимо на уровне значений $h_k = 0,31\text{--}0,32$ м (рост на 216 %), что негативно отразится как на эксплуатационной, так и на экологической эффективности работы лесной машины.

Для сохранения нормативных показателей глубины образуемой колеи необходимо в этом случае выполнить одно из двух мероприятий:

– либо снизить величину силы тяги лесной машины в 2,5–2,7 раза до 40–45 кВт, а в критических случаях и до почти нулевых значений, компенсируя недостающую мощность тяги двигателя использованием силы тяги лебедки;

– либо обеспечить снижение уровня давления двигателя на почвогрунт на 75–80 % до $q = 10\text{--}12$ кПа за счет соответствующего уменьшения трелевочной веса пачки, что отрицательно скажется на производительности.

Таким образом, наиболее адекватной и эффективной реакцией на резкое ухудшение геотехнических и геомеханических условий работы лесных машин на склонах оттаивающих почвогрунтов в их предельном состоянии текучести является максимальное использование силы тяги лебедки при перемещении лесных машин.

Выполненные оценки значимости изученных геотехнических факторов выдвигают проблему мониторинга гидрогеологического состояния краевой части массива почвогрунта на склонах и их классификацию по показателю влажности в границах трелевочных волоков и технологических коридоров в разряд наиболее актуальных, решение которой будет способствовать повышению эффективности лесозаготовительных работ в криолитозоне.

Полученные оценочные соотношения могут составить основу функционала, который через интерфейс мобильного приложения будет служить оперативной поддержкой принятия решений оператором лесной машины. Такая система позволит оперативно, например, с помощью смартфона, реагировать на конкретную геотехническую обстановку при работе на склонах и корректировать технологические показатели и параметры трелевочной системы – скорость движения, грузоподъемность, мощность тяги двигателя, нагрузку на вспомогательную лебедку и др. Работа оператора в свою очередь будет поддаваться контролю со стороны инженерно-технических служб – технолога, механика. В конечном итоге вполне возможно формирование системы управления базой данных технологических работ на склонах, как одного из наиболее перспективных направлений цифровизации и информационной поддержки технологических процессов работы лесных машин.

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

Литература

1. Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: Мат-лы Междунар. науч.-технич. конф. 2018. Тюмень: Изд-во Тюмен. индустриал. Ун-та, 2018. С. 79–83.
2. Григорьева О.И. Перспективные направления повышения эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: Мат-лы третьей Всеросс. науч.-практич. конф. с междунар. участием. 2017. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводск. гос. ун-та, 2017. С. 56–58.
3. Никитина Е.И., Куницкая О.А., Николаева Ф.В. Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: Сб. науч. статей по мат-лам Всеросс. студенческой науч.-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума – 2020» (29–30 сентября 2020 г., Якутск) и Международной научной онлайн летней школы – 2020 (6–20 июля 2020 г., Якутск). 2020. Ставрополь: Изд-во Ставропол. гос. аграр. ун-та, 2020. С. 138–148.
4. Куницкая О.А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Мат-лы Шестой Всеросс. национал. науч.-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводск. гос. ун-та, 2020. С. 86–87.
5. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы: Мат-лы Междунар. науч.-технич. конф. Тюмень: Изд-во Тюмен. индустриал. ун-та, 2020. С. 323–326.

6. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Калита О.Н. Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на производительность форвардера // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2021. № 1. С. 3-16.
7. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // *Уч. записки Петрозаводск. гос. ун-та*. 2014. № 2 (139). С. 87-91.
8. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Григорьева О.И., Рудов М.Е. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой // *Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности: Мат-лы республиканской науч.-практич. конф., посвященной 75-летию ПетрГУ*. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводск. гос. ун-та, 2015. С. 9-11.
9. Григорьева О.И. Новая машина для очистки лесосек // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2014. Т. 2, № 5-3 (10-3). С. 96-99.
10. 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: Мат-лы Междунар. науч.-технич. конф. Тюмень: Изд-во Тюмен. индустриал. ун-та, 2020. С. 374-377.*
11. Куницкая О.А., Никитина Е.И., Николаева Ф.В. Особенности лесозаготовки в Республике Саха Якутия // *Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: Сб. мат-лов Всеросс. науч.-практич. конф. с междунар. участием, посвященной 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий*. Якутск: Издательство ЯРО РГО «Академия», 2021. С. 308-313.
12. Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А., Вернер Н.Н., Швецова В.В. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2022. Т. 26, № 5. С. 93-101.
13. Куницкая О.А., Никитина Е.И. Экологические аспекты выборочных рубок леса // *Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации: сб. статей III Междунар. науч.-технич. конф. «Минские научные чтения-2020»*: в 3 т. Минск: Изд-во Белорусс. гос. технологич. ун-та, 2021. С. 286-291.
14. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: мат-лы науч.-технич. конф. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербург. гос. лесотехнич. ун-та, 2016. С. 112-114.*
15. Никифорова А.И., Григорьева О.И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3, № 5-4 (16-4). С. 320-323.
16. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuiev V.A., Sivtseva T.V., Zdrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the far east // *Forest Science and Technology*. 2022. Т. 18, № 4. С. 190-200.
17. Куницкая О.А., Степанова Д.И., Григорьев М.Ф. Перспективные направления развития транспортно-технологических систем лесного комплекса России // *Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Мат-лы междунар. науч.-практич. конф. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. аграр. ун-та, 2018. С. 109-114.*
18. 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.
19. До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Оценка тягово-сцепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 2 (54). С. 78-84.
20. До Т.А., Злобина Н.И., Каляшов В.А., Гурьев А.Ю., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Теоретические исследования влияния угла склона на несущую способность почвогрунта при работе лесных машин // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2022. № 2. С. 18-27.
21. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // *Изв. высших учеб. заведений. Лесной журнал*. 2020. № 2(374). С. 101-117.
22. Рудов С.Е., Шапиро 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 // *Лесотехнический журнал*. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 116-128.
23. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Оценка работоспособности трелевочного волока на склоне массива оттаивающего почвогрунта при циклических статических нагрузках // *Resources and Technology*. 2021. Т. 18, № 2. С. 79-95.
24. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Особенности образования колеи под действием движителя лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции // *Изв. высших учеб. заведений. Лесной журнал*. 2024. № 3 (399). С. 140-152.
25. Гурьев А.Ю., Шапиро В.Я., Морковин В.А., Дьяченко В.М., Григорьев И.В. Оценка влияния типа движителя лесной машины на процесс уплотнения почвогрунта при работах на склонах // *Лесотехнический журнал*. 2024. Т. 14, № 3(55). С. 152-167.
26. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Стародубцева Т.Н. Исследование процесса образования колеи и ее устойчивости при работе лесных машин и трелевочных систем на склонах массива оттаивающего почвогрунта // *Лесотехнический журнал*. 2021. Т. 11, № 2 (42). С. 121-132.
27. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // *Инженерные изыскания*. 2013. № 9. С. 44-50.
28. Мирный А.Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы ее количественной оценки // *Инженерная геология*. 2019. Т.14, № 2. С. 34-43.
29. Калабина М.В., Царапов М.Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // *Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Мат-лы Всеросс. конф. с междунар. участием. М.: Изд-во «Перо», 2017. С. 542-546.*
30. Шапиро В.Я. Влияние эффектов анизотропии и дилатансии свойств массива почвогрунта на устойчивость его краевой части на склоне // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2024. № 65. С. 182-185.

References

1. Grigoreva O.I. Efficiency of transport and technological systems for forestry // *Transport and transport and technological systems: Materials of the Internat. Scientific and Technical Conf. Tyumen: Publishing House of Tyumen Industrial University, 2018. P. 79-83.*

2. Grigoreva O.I. Promising directions for improving the efficiency of logging and forest maintenance // Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the third All-Russian scientific and Practical Conf. with Internat. participation. Petrozavodsk: Publishing House of Petrozavodsk State University. 2017. P. 56-58.
3. Nikitina E.I., Kunitskaya O.A., Nikolaeva F.V. A project for the organization of logging in the conditions of the Aldan forestry using multi-operational logging complexes // Modern problems and achievements of agricultural science in the Arctic. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Student Scientific and Practical Conf. with Internat. participation within the framework of the Northern Forum 2020 (September 29-30, 2020, Yakutsk) and the Internat. Scientific Online Summer School 2020 (July 6-20, 2020, Yakutsk). Stavropol: Publishing House of Stavropol State Agrarian University. 2020. P. 138-148.
4. Kunitskaya O.A. Proactive service for forest machines // Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conf. with Internat. participation. Petrozavodsk: Publishing House of Petrozavodsk State University. 2020. P. 86-87.
5. Rudov S.E., Kunitskaya O.A. Theoretical studies of the ecological compatibility of wheeled forest vehicles and permafrost soils of cryolithozone forests // Transport and transport-technological systems: Materials of the Internat. Scientific and Technical Conf. Tyumen: Publishing House of Tyumen Industrial University 2020. P. 323-326.
6. Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Khitrov E.G., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Kalita O.N. Influence of variable coefficients of resistance to movement and coupling on forwarder performance // The woodworking industry. 2021. № 1. P. 3-16.
7. Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymsky A.A., Grigoreva O.I. Determination of precipitation during movement of a logging machine on a two-layer base // Scientific Notes of Petrozavodsk State University. 2014. № 2 (139). P. 87-91.
8. Grigorev I.V., Tikhonov I.I., Grigoreva O.I., Rudov M.E. Search for new technical solutions to improve the environmental compatibility of forest machinery with the forest environment // Intensification of the formation and protection of intellectual property: Materials of the republican scientific and practical Conf. dedicated to the 75th anniversary of PetrSU. Petrozavodsk: Publishing House of Petrozavodsk State University. 2015. P. 9-11.
9. Grigoreva O.I. A new cutting machine // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2014. Vol. 2, № 5-3 (10-3). P. 96-99.
10. Teterevleva E.V., Grinko O.I., Grigoreva O.I. Transport and technological machines for extinguishing forest fires based on wheeled all-terrain vehicles // Transport and transport and technological systems. Materials of the Internat. Scientific and Technical Conf. Editor-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen: Publishing House of Tyumen Industrial University, 2020. P. 374-377.
11. Kunitskaya O.A., Nikitina E.I., Nikolaeva F.V. Features of logging in the Republic of Sakha Yakutia // Land management, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects of development. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical Conf. with Internat. participation dedicated to the 255th anniversary of the Land Management of Yakutia and the Year of Science and Technology. Yakutsk, Publishing house YARO RGO "Academy", 2021. P. 308-313.
12. Mohirev A.P., Kunitskaya O.A., Kalita G.A., Werner N.N., Shvetsova V.V. Evaluation of the reliability of a logging harvester // Forestry Bulletin. 2022. Vol. 26, № 5. P. 93-101.
13. Kunitskaya O.A., Nikitina E.I. Ecological aspects of selective logging // Ecological, economic and technological aspects of sustainable development of the Republic of Belarus and the Russian Federation. collection of articles of the III Internat. Scientific and Technical Conf. "Minsk Scientific Readings 2020": in 3 vol. Minsk: Publishing House of Belarusian State Technological University, 2021. P. 286-291.
14. Grigoreva O.I., Nguyen F.Z. Promising equipment for logging and forest maintenance // Forests of Russia: politics, industry, science, education. materials of the scientific and technical Conf. Saint Petersburg: Publishing House of Saint Petersburg State Forestry Engineering University, 2016. P. 112-114.
15. Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Modeling of the impact of forest machinery propellers on the soils of logging areas // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3, № 5-4 (16-4). P. 320-323.
16. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zdrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the far east // Forest Science and Technology. 2022. Vol. 18, № 4. P. 190-200.
17. Kunitskaya O.A., Stepanova D.I., Grigorev M.F. Promising areas of development of transport and technological systems of the Russian forest complex // Energy efficiency and energy conservation in modern production and society. Materials of the Internat. scientific and practical Conf. Under the general editorship of V.A. Gulevsky. Voronezh: Publishing House of Voronezh State Agrarian University. 2018. P. 109-114.
18. Kalyashov V.A., Do Tuan A., Khitrov E.G., Grigoreva O.I., Guryev A.Yu., Novgorodov D.V. Modern machine systems and technologies for harvesting wood and reforestation in conditions of mountain logging areas // Resources and Technology. 2022. Vol. 19, № 2. P. 1-47.
19. Do T.A., Grigorev G.V., Kalyashov V.A., Novgorodov D.V., Grigoreva O.I., Khitrov E.G. Evaluation of traction properties of the propulsion of a forest tracked vehicle operating on a slope // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 2 (54). P. 78-84.
20. Do T.A., Zlobina N.I., Kalyashov V.A., Guryev A.Yu., Grigoreva O.I., Khitrov E.G. Theoretical studies of the influence of slope angle on the bearing capacity of soil during operation of forest machinery // The woodworking industry. 2022. № 2. P. 18-27.
21. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Investigation of the process of destruction of frozen and thawing soils under the influence of a skidding system // Proceedings of higher educational institutions. Forest magazine. 2020. № 2(374). P. 101-117.
22. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorev M.F., Puchnin A.N. Features of accounting for the state of a frozen soil mass during cyclic interaction with a skidding system // Forestry Engineering Journ. 2019. Vol. 9, № 1(33). P. 116-128.
23. Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Assessment of the operability of a skidding portage on the slope of a thawing soil massif under cyclic static loads // Resources and Technology. 2021. Vol. 18, № 2. P. 79-95.
24. Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P. Features of track formation under the action of a forest engine on the slope of a thawing cryolithozone soil, taking into account the effect of solifluction // Proceedings of higher educational institutions. Forest magazine. 2024. № 3 (399). P. 140-152.
25. Guryev A.Yu., Shapiro V.Ya., Morkovin V.A., Dyachenko V.M., Grigorev I.V. Assessment of the effect of the type of propulsion of a forest vehicle on the process of compaction of soil during work on slopes // Forestry journ. 2024. Vol. 14, №3(55). P. 152-167.

26. Kalyashov V.A. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I., Starodubtseva T.N. Investigation of the process of track formation and its stability during operation of forest machinery and skidding systems on the slopes of a thawing soil massif // Forestry engineering magazine. 2021. Vol. 11, № 2 (42). P. 121-132.
27. Zerkal O.V., Fomenko I.K. Assessment of the influence of anisotropy of soil properties on slope stability // Engineering surveys. 2013. № 9. P. 44-50.
28. Mirny A.Y. Studies of dilatancy in dispersed soils and methods of its quantitative assessment // Engineering geology. 2019. Vol. 14, № 2. P. 34-43.
29. Kalabina M.V., Tsarapov M.N. Strength properties of thawing soils // Current state, problems and prospects of development of branch science. Materials of the All-Russian Conf. with Internat. participation. Moscow: Publishing House "Pero", 2017. P. 542-546.
30. Shapiro V.Ya. The influence of the effects of anisotropy and dilatation of the properties of the soil mass on the stability of its marginal part on the slope // Actual problems of the forest complex. 2024. № 65. P. 182-185.