СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 674.81 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-106-112

Особенности взаимодействия движителя колёсной лесной машины с неоднородным несущим слоем почвогрунта на склоне в лесах на многолетней мерзлоте

В.Я. Шапиро[1a], И.В. Григорьев[2b], П.Н. Перфильев[3c], Я.А. Рыжов[4d], Е.А. Тихонов[5e], С.И. Ревяко[6f]

[1] Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Институтский переулок, 3, Россия
[2] Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, 3, Якутск, Россия
[3] Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия
[4] Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8. г. Воронеж, Россия
[5] Петрозаводский государственный университет, Россия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33
[6] Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Пушкинская, д. 111, г. Новочеркасск, Россия
[a] shapiro54vlad@mail.ru, [b] silver73@inbox.ru, [c] p.perfilev@narfu.ru, [d] irosmagelav@mail.ru, [e] tihonov@petrsu.ru, [f] revyako77@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0002-6344-1239, [b] https://orcid.org/ 0000-0002-5574-1725,
[c] https://orcid.org/ 0000-0003-3041-7512, [d] https://orcid.org/ 0009-0000-8336-1124,
[e] https://orcid.org/ 0000-0003-2136-3268, [f] https://orcid.org/ 0000-0001-7362-5042.
Статья поступила 28.05.2026, принята 08.09.2026.

Леса на многолетней мерзлоте занимают около 60 % всей площади лесного фонда Российской Федерации. Ввиду экстремальных климатических условий их произрастания, крайне заторможенной почвенной биоты, короткого вегетативного периода, эти леса справедливо относятся к наиболее экологически чувствительным. Значительная часть лесов криолитозоны произрастает на пересечённой местности – склонах гор и сопок. Ярким примером таких лесов может служить южная Якутия. Часто склоны образованы из продуктов разрушения горных пород, покрытых сверху тонким слоем почвогрунта. Леса на склонах в любых лесорастительных условиях считаются особо ранимыми и сложными для освоения. В условиях многолетней мерзлоты это выражается особенно ярко. Из-за крайней бедности почвенной биоты образуется тонкий плодородный почвенный слой, подвергающийся к тому же негативному воздействию эффекта солифлюкции. Все эти обстоятельства делают работу лесных машин на склонах в криолитозоне особенно сложной. В настоящей статье разработана математическая модель взаимодействия движителя колёсной лесной машины с неоднородным несущим слоем на склоне в лесах в условиях многолетней мерзлоты и получены расчётные результаты, позволяющие на стадии проектирования технологических карт на разработку лесосеки оценить допустимые нагрузки на неоднородный несущий слой на склоне криолитозоны с учётом угла наклона склона и мощности несущего слоя; влажности и относительного уплотнения верхнего слоя почвогрунта; объёмной доли плиточных образований из известняка в нижележащем слое. Практическое использование полученных оценок может способствовать повышению работоспособности сети трелёвочных волоков, эффективности и производительности лесосечных и лесохозяйственных работ в сложных геотехнических условиях на склонах криолитозоны. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета.

Ключевые слова: леса на склонах; леса на многолетней мерзлоте; лесозаготовки; лесные машины; трелёвочные системы; деформация почвогрунта.

Features of the interaction of the propulsion of a wheeled forestry machine with an inhomogeneous bearing layer of soil on a slope in forests on permafrost

V.Ya. Shapiro[1a], I.V. Grigoriev[2b], P.N. Perfiliev[3c], Ya.A. Ryzhov[4d], E.A. Tikhonov[5e], S.I. Revyako[6f]

[1] St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia
[2] Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Russia

[3] Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia
[4] Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, Timiryazev str., 8, Russia
[5] Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia
[6] Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, Branch of Don State Agrarian University; 111, Pushkinskaya St., Novocherkassk, Russia
[a] shapiro54vlad@mail.ru, [b] silver73@inbox.ru, [c] p.perfilev@narfu.ru, [d] irosmagelav@mail.ru, [e] tihonov@petrsu.ru, [f] revyako77@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0002-6344-1239, [b] https://orcid.org/ 0000-0002-5574-1725,
[c] https://orcid.org/ 0000-0003-3041-7512, [d] https://orcid.org/ 0009-0000-8336-1124,
[e] https://orcid.org/ 0000-0003-2136-3268, [f] https://orcid.org/ 0000-0001-7362-5042.
Received 28.05.2026, accepted 08.09.2026.

Permafrost forests occupy about 60 % of the total area of the forest fund of the Russian Federation. Due to the extreme climatic conditions of their growth, extremely inhibited soil biota, and a short vegetative period, these forests are rightly among the most environmentally sensitive. A significant part of the forests of the cryolithozone grows on rough terrain – the slopes of mountains and hills. South Yakutia is a striking example of such forests. Often the slopes are formed from the products of the destruction of rocks, covered with a very thin layer of soil. Forests on slopes in any forest-growing conditions are considered particularly vulnerable and difficult to develop. This is especially pronounced in permafrost conditions. Due to the extreme poverty of the soil biota, a thin fertile soil layer is formed, which is exposed to the same negative effect of the solifluction effect. All these circumstances make the work of forest machinery on the slopes in the cryolithozone especially difficult. In this article, a mathematical model of the interaction of the propulsion of a wheeled forestry machine with an inhomogeneous bearing layer on a slope in forests under permafrost conditions has been developed, and clear results have been obtained that make it possible, at the design stage of technological maps for the development of a cutting area, to assess the permissible loads on an inhomogeneous bearing layer on the slope of a cryolithozone, taking into account the slope angle and the load-bearing capacity layer; humidity and relative compaction of the upper soil layer; volume fraction of limestone tile formations in the underlying layer. The practical use of the obtained estimates can contribute to improving the operability of the skidding fiber network, the efficiency and productivity of logging and forestry operations in difficult geotechnical conditions on the slopes of the cryolithozone. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of the logging industry and forestry" of the Arctic State Agrotechnological University.

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

Введение. Как известно, макро- и микрорельеф формируются за счёт действия внутренних и внешних сил. Внутренние силы подразумевают движения земной коры, например, перемещение литосферных плит. При столкновении литосферных плит один слой горных пород надвигается на другой, и формируются горные цепи. Если плиты расходятся в разные стороны, то образуются горные хребты за счёт излияния магмы и её застывания [1, 2].

Внешние силы, в основном, представлены эрозионными процессами, включающими работу ветра, поверхностных вод, подземных вод, ледников. Эти процессы разрушают горные породы и переносят продукты разрушения с одних участков поверхности на другие, где происходит их отложение и накопление. Созидательная сила внешних процессов проявляется в формировании небольших по размеру форм рельефа: на равнинах это холмы, овраги, речные долины, в горах – это осыпи, ущелья и скалы различных очертаний. Формирование рельефа является непрерывным процессом [3].

Сложение склонов, как и их угол уклона, могут значительно различаться. В Сибири и на Дальнем Востоке России достаточно часто встречаются склоны, на которых плодородный поверхностный слой почвогрунта располагается на частично разрушенных эрозией элементах скальных пород [4, 5].

При этом на большой части поверхности больших и малых форм рельефа произрастает древесно-кустарниковая растительность, в большой части случаев являющаяся лесом, требующим проведения различных лесохозяйственных мероприятий, включающих рубку лесных насаждений, содействия естественному лесовосстановлению, работ по комбинированному и/или искусственному лесовосстановлению, противопожарному обустройству, тушению лесных пожаров, и т. д. [6].

Эти работы выполняются, в большой части случаев, при помощи колёсных лесных машин, трелёвочных систем или машинно-тракторных агрегатов на их базе, работа которых в рассматриваемых условиях является особенно сложной [7–10].

Рассмотрим особенности работы колёсных лесных машин на склонах, образованных с участием эрозионных процессов, когда краевая часть опорного массива хемогенного оргомогенного происхождения характеризуется неоднородностью и содержит наряду с почвогрунтами массивные напластования известняка в виде плит различного размера (рис. 1). Такое явление достаточно распространено от Якутии до Южно-Сахалинска. Сверху плит находится тонкий слой почвогрунта, на котором произрастает древостой (рис. 1).



Рис. 1. Участок склона, образованный с участием эрозионных процессов

Как видно из рис. 1, несущий слой склона представляет собой неоднородную среду, состоящую из верхнего тонкого слоя почвогрунта с удельной объёмной плотностью $\rho_п$ = 800–1000 кг/м^3, мощность которого не превышает 0,05–0,1 м, что позволяет характеризовать его несущую способность и устойчивость как достаточно низкие, особенно в условиях влияния осадков и высокой влажности, когда величина сцепления C почвогрунта не превышает 8–10 кПа, а угол внутреннего трения ϕ –5–7° [11, 12].

Данные параметры являются компонентами паспорта прочности при реализации механизма сдвиговых разрушений и среза [13], и обозначенные их невысокие значения обусловливают соответствующий уровень несущей способности краевой части массива почвогрунта.

Ниже слоя почвогрунта располагаются плиты из плотного ($\rho_и$ = 2200–2900 кг/м^3) тонкозернистого известняка органогенной природы толщиной не более 0,05–0,1 м различного размера в плане, составляющим в среднем 0,3–0,45 м. Необходимо отметить, что указанный размер плит близок по значениям длине пятна контакта шины колесной лесной машины с почвогрунтом.

Таким образом, определённый научный и практический интерес представляет оценка предельной нагрузки на верхний несущий неоднородный слой мощностью (глубиной) не более h_k = 0,1–0,15 м при его взаимодействии с колёсной лесной машиной, трелёвочной системой или машинно-тракторным агрегатом на её базе.

Материалы и методы исследования. В основе исследований лежат принципы математического моделирования процесса деформирования краевой части массива сплошной среды с различными показателями удельной объёмной плотности: ρ = 300–600 кг/м^3 [14], ρ = 700–1200 кг/м^3 [15, 16], ρ = 2000–4500 кг/м^3 [17].

Пусть колёсная лесная машина общим весом Q перемещается по склону с углом наклона α к условной линии горизонта.

С учётом размеров пятна контакта при взаимодействии шины с краевой частью массива почвогрунта, а именно: шириной контакта B_k, его длиной L_k и площадью $S_k = B_kL_k$, величина вертикальной внешней нагрузки на почвогрунт составит $p = \frac{Q}{S_k}\cos\alpha$.

Рассмотрим элементарный объём V краевой части массива трассы движения колесной лесной машины площадью S_k и h_k.

Будем считать, что данный объём наполнен плитами известняка различного размера, объём которых составляет $V_к = \xi V$. Тогда объём почвогрунта $V_п = (1–\xi)V$, где

$$0 < \xi < 1.$$

Учитывая значения показателей плотности почвогрунта $\rho_п$ и известняка $\rho_и$, масса элементарного объёма составит:

$$M = \rho_п(1–\xi)V+\rho_и\xi V = [\rho_п(1-\xi)+\rho_и\xi]S_kh_k. \quad (1)$$

Пусть скорость звука в почвогрунте $C_п$ составляет 400–600 м/с, тогда как скорость звука в известняке $C_и$ изменяется в более широком диапазоне от 3200 до 5500 м/с. Это означает, что акустические жёсткости $\lambda = \rho C$ указанных сред отличаются на порядок, и коэффициент усиления давления β от менее плотного слоя почвогрунта в более плотный слой известняка равен:

$$\beta = \frac{2}{1+\lambda_п/\lambda_и}. \quad (2)$$

Оценки показывают, что поскольку отношение акустических жёсткостей является малой величиной порядка $\lambda_п/\lambda_и \approx 0{,}05$, коэффициент β изменяется в достаточно узком диапазоне от 1,87 до 1,93 и составляет в среднем 1,9.

Это означает, что через слой почвогрунта с низкой акустической жёсткостью нижележащему слою, содержащему плиты известняка с высокой акустической жесткостью, будет передаваться давление, в среднем на 90 % превышающее исходное внешнее давление p, которое оказывает движитель колесной лесной машины на верхний слой почвогрунта.

Для того, чтобы указанный выше элементарный объём массива за единицу масштаба времени пришёл в движение и переместился вдоль поверхности склона на расстояние, равное как минимум половине длины пятна контакта L_k, необходимо формирование импульса массы:

$$I_m = \frac{L_k}{2}[\rho_п(1-\xi)+\rho_и\xi]S_kh_k. \quad (3)$$

Импульс $I_с$ силы сдвига F_c, действующей на элементарный объем, за тот же период времени будет определяться суммой сил, а именно:

– силой трения $F_{mp} = \mu p\cos\alpha S_k$, где μ – коэффициент трения при взаимодействии шины с несущим слоем;

– силой инерции $F_u = p\sin\alpha S_k$;

– касательной силой сдвига $F_\theta = \gamma p\cos\alpha S_k$, возникающей в результате действия тангенциальной (касательной) компоненты тензора напряжений в пределах пятна контакта, где $\gamma=\frac{\nu}{1-\nu}$, ν – коэффициент Пуассона.

Из условия соотношения импульсов силы и массы $I_с \geq I_m$, обеспечивающего сдвиг несущего слоя, после сокращения обеих частей неравенства на S_k, выразив явно параметр давления p, определим с учётом соотношения (2), предельно допустимую величину давления p_c на элементарный объём верхнего слоя трассы мощностью h_k, превышение уровня которого приводит к сдвигу данного слоя краевой части массива вдоль поверхности склона:

$$p_c=\frac{L_k}{2\beta}h_k\,[\rho_п(1-\xi)+\rho_и\xi] / [\cos\alpha(\mu+\gamma)+\sin\alpha]. \quad (4)$$

Как следует из анализа соотношения (4) на величину $p_с$ влияние оказывают следующие параметры:

– геометрические: длина пятна контакта L_k, мощность несущего слоя h_k и угол наклона склона α;

– физико-механические свойства, а также состояние слоев почвогрунта и известняка посредством учёта их акустических жёсткостей, коэффициентов Пуассона и трения при взаимодействии с шиной, а также объёмных долей в пределах несущего слоя.

Результаты исследования. На рис. 2 на основании использования соотношения (4) представлена расчётная зависимость величины давления p_c, кПа, от параметра ξ.

Расчёты были выполнены при следующих исходных данных:

$$L_k = 0{,}42 \text{ м}, B_k = 0{,}73 \text{ м}, S_k = 0{,}3066 \text{ м}^2, \alpha = 15°, \mu = 0{,}41, \beta = 1{,}93, \nu = 0{,}28, \gamma = 0{,}39, \rho_п = 850 \text{ кг/м}^3, \rho_и = 2700 \text{ кг/м}^3, C_п = 400 \text{ м/с}, C_и = 3600 \text{ м/с}, h_k = 0{,}1 \text{ м}. \quad (5)$$

С высоким коэффициентом детерминации зависимость $p_c(\xi)$ подчиняется закону возрастающей экспоненты, что подтверждает характер упрочнения краевой части массива поверхности склона и повышения прочности несущего неоднородного слоя по мере увеличения в нём объёмной доли плотного известняка.

Учитывая постоянство размера пятна контакта, рост допустимого давления примерно в 2 раза с 25–30 кПа до 50–55 кПа обусловливает соответствующее увеличение предельного веса Q колесной лесной машины, трелёвочной системой, или машинно-тракторного агрегата на её базе в среднем с 8 до 14 т при условии, что объём плит известняка в элементарном слое массива возрастает в 3 раза с 25 до 75 %.

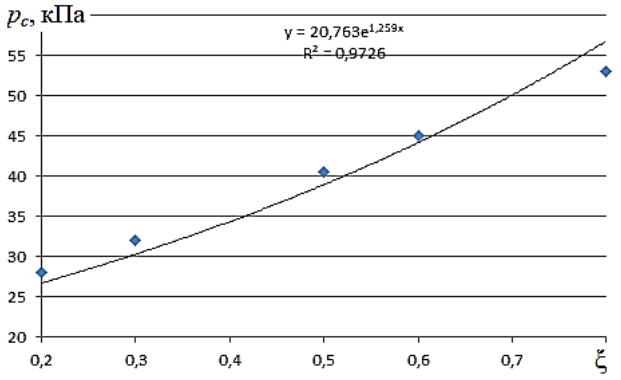


Рис. 2. Влияние объёмной доли плит известняка на допустимое давление на верхний слой массива поверхности склона

Одной из важных характеристик процесса вязкопластического деформирования массива сплошной среды с внутренним трением является коэффициент Пуассона ν, который зависит от влажности среды W, о чём свидетельствуют результаты исследований [6, 7].

При стремлении ν к 0,45–0,5, коэффициент γ→1, т. е. вертикальные и тангенциальные компоненты тензора напряжений близки как по величине, так и по направлению. Массив почвогрунта в этом случае находится в состоянии всестороннего сжатия, и его деформирование подчиняется закону несжимаемой жидкости.

Сравнительный анализ данных аппроксимации по методике [18] результатов лабораторных испытаний на образцах мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов [19] свидетельствует о том, что величина ν с погрешностью менее 5 % может быть в практических расчётах оценена как 1/100 от показателя W, %.

На рис. 3 представлены результаты исследований по влиянию показателя влажности W, %, на величину p_c, кПа.

Расчёты произведены при объёмном коэффициенте ξ = 0,3, остальные параметры, за исключением коэффициента Пуассона, соответствуют исходным данным (5). В качестве характеристики предела пластичности почвогрунта принят показатель влажности $W_П$ = 28 %, предела текучести – $W_Т$ = 43 %.

Как следует из анализа данных рис. 3, снижение p_c от уровня 50–55 кПа до 30–33 кПа имеет место при переходе почвогрунта из сухого состояния до состояния его влажности, близкой к величине предела пластичности. По мере дальнейшего увеличения влажности почвогрунта и стремлении его показателя $W \to W_т$, величина p_c существенно снижается до значений p_c = 18–20 кПа.

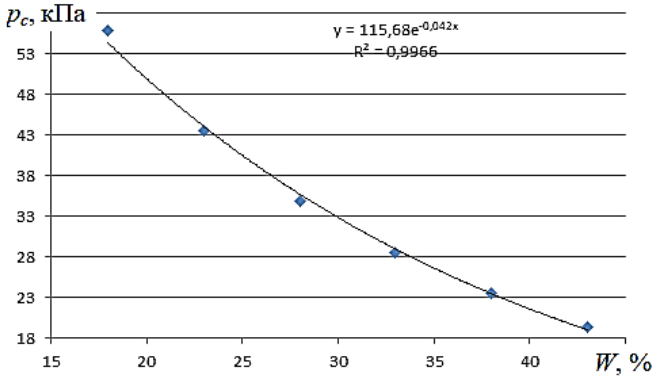


Рис. 3. Влияние влажности почвогрунта на величину предельного давления на верхний слой массива

В переувлажнённом почвогрунте в состоянии его вязкопластического течения в тёплое время года на склонах криолитозоны может проявляться эффект солифлюкции – попеременного промерзания и оттаивания краевой части массива, что может вызвать пучение почвогрунта.

В том случае, когда несущий слой неоднородный, пучение его верхней грунтовой зоны приводит к деформации и перемещению нижней, содержащий плиты известняка. Чем большее исходное значение объёмной доли ξ, тем большие отрицательные последствия окажет солифлюкция на работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) на поверхности склона, что необходимо учитывать при проектировании трасс движения лесной машины.

Плотность $\rho_п$ основных типов почвогрунтов – супесей, суглинков и других – является параметром вариативным, зависящим от ряда факторов: влажности, пористости, наличия и особенностей развития корневых систем древесно-кустарниковой растительности, и т. д.

Диапазон изменения $\rho_п$ достаточно широкий, тем более ещё необходимо учесть процесс уплотнения краевой части массива трассы движения лесной машины по сравнению с исходной плотностью вследствие многократных циклических проходов машины по одному и тому же участку волока.

Так, по данным результатов исследований [20], при 3–5 циклах проходов груженного лесного трактора плотность почвогрунта может возрастать на 40–60 и более %.

Введём параметр относительного уплотнения $\bar{\rho}$, равный отношению текущего значения плотности $\rho_п$ к начальному $\rho_{по}$= 850 кг/м^3, и оценим (рис. 4) влияние $\bar{\rho}$ на величину давления p_c, кПа. Расчёты соответствуют исходным данным (5).

Полученная линейная зависимость $p_c(\bar{\rho})$ свидетельствует о том, что повышение плотности верхнего слоя почвогрунта повышает его несущую способность, что допускает использование более тяжёлой техники и возможность перемещать соответствующий груз.

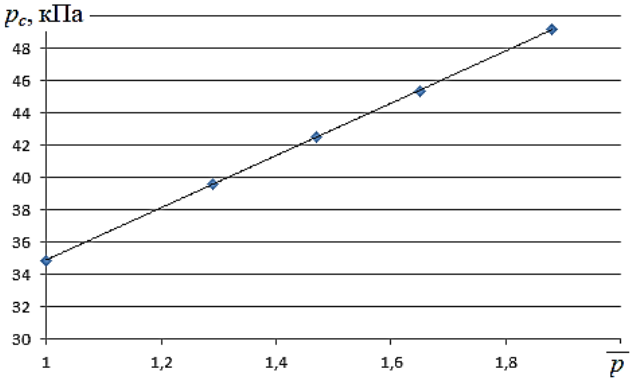


Рис. 4. Влияние относительного уплотнения почвогрунта на величину предельного давления на его краевую часть

Как видим на рис. 4, увеличение относительного уплотнения в 1,8–2 раза позволяет увеличить нагрузку на элементарный объём несущего слоя на склоне на 40 % с 35 до 49 кПа.

При многообразии геотехнических условий работы колёсных лесных машин на лесосечных и лесохозяйственных работах необходимо устанавливать соответствие числа проходов лесной машины состоянию краевой части массива почвогрунта с учётом её объёмного наполнения плитами известняка.

Наклон склона, как показали выполненные расчёты и данные рис. 5, является существенным геотехническим фактором ограничения предельной допустимой внешней нагрузки на несущий неоднородный слой поверхности склона.

На рис. 5 представлена линейная убывающая зависимость $p_c(\alpha°)$, полученная при расчётах для условий (5), которая свидетельствует о том, что при работах на крутых и очень крутых склонах с углами α более 25°, допускается p_c, не превышающее 25–30 кПа.

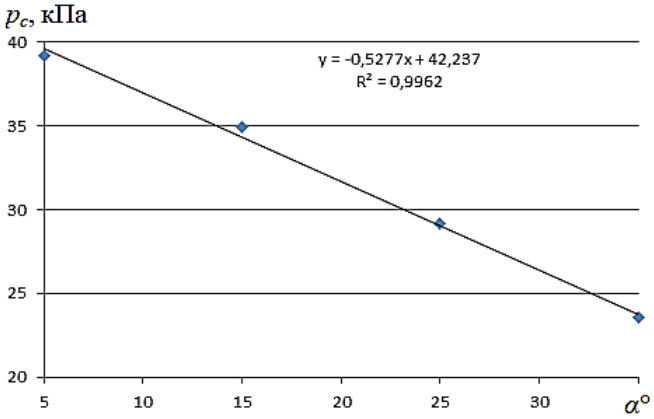


Рис. 5. Влияние угла наклона склона α на величину давления p_c

Для колёсной лесной машины с пятном контакта S_k = 0,3066 м^2 это соответствует весу Q перемещаемого груза не более 10 т.

При необходимости перемещения более тяжёлых грузов, следует увеличить площадь пятна контакта за счёт известных технических мероприятий по применению спаренных колёс, гибких лент и других, обеспечивающих заданный уровень предельной величины p_c.

Таким образом, на данном этапе исследований можно сделать вывод о том, что на величину предельной нагрузки на краевую часть массива, в котором сформирован верхний неоднородный несущий слой, влияет ряд факторов, одни из которых – объёмная доля ξ плит известняка и уплотнение $\bar{\rho}$ слоя почвогрунта способствуют увеличению p_c, а другие – коэффициент Пуассона ν и влажность W почвогрунта, а также угол наклона склона α – снижению p_c и веса Q лесной машины, трелёвочной системы или машинно-тракторного агрегата на её базе.

Сравнительный анализ значимости указанных факторов по методике, предложенной в работе [21], показал, что последовательное увеличение их абсолютных значений на заданную контрольную величину (10 %) приводит к соответствующим изменениям величины p_c (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ факторов

Наименование фактора	Изменение p_c, %	Значимость фактора, %
Объёмная доля известняка, ξ	+3,9	16,32
Влажность почвогрунта, W	–12,2	51,04
Относительное уплотнение, $\bar{\rho}$	+4,2	17,57
Угол наклона склона, α	–3,6	15,06
Итого		100

Как следует из анализа данных табл. 1, фактор влажности слоя почвогрунта практически в 3 раза является более существенным, чем все остальные разнонаправленные факторы.

Этот вывод свидетельствует о необходимости оперативного контроля состояния температурного и связанного с ним влажного поля почвогрунтов на склонах, особенно в условиях криолитозоны, в соответствии с методическими положениями и результатами [22], на основании которых осуществляется классификация и оценка работоспособности трелёвочных волоков/технологических коридоров в конкретных геотехнических условиях лесозаготовительных и лесохозяйственных работ.

Оценим совместное влияние некоторых отмеченных факторов на величину Q.

На рис. 6 показано влияние угла α°, и влажности почвогрунта W, %, на предельно допустимый вес колёсной лесной машины Q, т. Данные расчётов соответствуют условиям (5).

Как видим, более 60 % значений двумерной функции $Q(\alpha, W)$ из обозначенной области существования её аргументов лежит в интервале 7–10 т.

Установленное ограничение нагрузки обусловлено и тем обстоятельством, что несущий неоднородный слой является слабым и содержит 30 % (ξ = 0,3) укрепляющих его плит известняка в элементарном объёме краевой части массива. Учитывая укрепляющее влияние параметра ξ, его рост должен обеспечить возможность увеличения веса лесной машины, трелёвочной системы или машинно-тракторного агрегата на её базе.

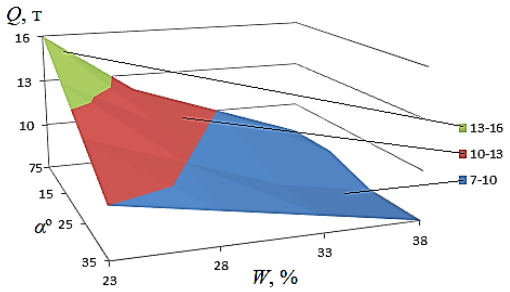


Рис. 6. Влияние угла наклона склона и влажности почвогрунта на допустимый вес колёсной лесной машины

Выполненные исследования полностью подтверждают данный тезис, их результаты представлены на рис. 7, когда наряду с фактором угла наклона склона α°, показано совместное с ним влияние параметра ξ, %, на величину Q, т.

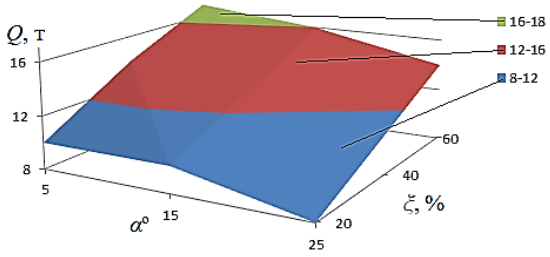


Рис. 7. Влияние угла наклона склона и объёмной доли известняка на допустимый вес колёсной лесной машины

Как следует из анализа данных рис. 7, увеличение параметра ξ в 2,5–3 раза от уровня в 20–30 % до 50–60 % способствует увеличению допустимого веса колёсной лесной машины в 1,5–2 раза с 8–12 т до 16–18 т при работе на наиболее часто встречаемых покатых склонах с углом наклона α = 15°.

Заключение. Разработанная математическая модель и полученные на её основе результаты выполненных исследований позволяют на стадии проектирования технологических карт на разработку лесосеки оценить допустимые нагрузки на неоднородный несущий слой на склоне криолитозоны с учётом ряда выявленных факторов, а именно:

– угла наклона склона и мощности несущего слоя;

– влажности и относительного уплотнения верхнего слоя почвогрунта;

– объёмной доли плиточных образований из известняка в нижележащем слое;

– акустических жёсткостей сред, заполняющих неоднородный несущий слой и коэффициента его трения с шиной лесной машины.

Установленная значимость отмеченных факторов диктует необходимость осуществления гидрогеологических мероприятий по районированию и классификации склонов с определением влажности и плотности почвогрунта, а также объёмной доли плит известняка в пределах несущего слоя трассы движения колёсных лесных машин.

В совокупности произведённые оценки будут способствовать повышению работоспособности трелёвочного волока/технологического коридора, эффективности и производительности лесосечных и лесохозяйственных работ в сложных геотехнических условиях на склонах криолитозоны.

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

Литература

1. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Николаев В.В., Семёнов Р.М. Буферные сейсмогенные структуры между Евразийской и Амурской литосферными плитами на юге Сибири // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 5–61.
2. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 5–17.
3. Лапин П.С. Устойчивое развитие современного рельефа в зоне сочленения Чуйской и Курайской внутригорных впадин (горный Алтай) // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 1. С. 26–39.
4. Хондусенко Т.С., Кукушкин И.А. Аспекты безопасной эксплуатации дорог горных территорий Хабаровского края // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия. Материалы X Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Редколлегия: О.Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре, 2023. С. 237–239.
5. Закабуня Р.Ю. Строительство в условиях горного рельефа // Военно-инженерное дело на Дальнем Востоке России. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. 2021. С. 121–124.
6. Рябухин П.Б., Абузов А.В. Горным лесоразработкам средосберегающее технологическое оборудование // Лесное хозяйство. 2008. № 6. С. 36–37.
7. Федоров А.Г., Алешков О.А. Особенности работы узлов и агрегатов машин в горных условиях // Современные аспекты развития и безаварийной эксплуатации автомобильной техники (бронетанкового вооружения и техники). Сборник научных статей межвузовской научно-технической конференции. Новосибирск, 2024. С. 256–261.
8. 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.
9. Каляшов В.А., До Т.А., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новогородов Д.В. Современные технические решения для обеспечения безопасной работы лесных машин на горных склонах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 2. С. 11–25.
10. Кривошеев А.А., Бурмистрова О.Н., Куницкая О.А., Задраускайте Н.О., Рябухин П.Б., Рудов С.Е. Экспериментальные исследования опорной проходимости колёсного движителя лесной машины при работе на склоне // Resources and Technology. 2025. Т. 22. № 4. С. 57–77.
11. Калабина М.В., Царапов М.Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки. Материалы

Всероссийской конференции с международным участием. 2017. С. 542–546.
12. Царапов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2007. № 6. С. 31–34.
13. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристики прочности методом одноплоскостного среза. М. Стандартинформ.2020. 20 с.
14. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Гумерова О.М. Моделирование процесса разрушения коры при окорке резанием // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 193. С. 211–221.
15. 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.
16. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Стародубцева Т.Н. Исследование процесса образования колеи и её устойчивости при работе лесных машин и трелевочных систем на склонах массива оттаивающего почвогрунта // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 2. (42). С. 121–132.
17. Shapiro V.Ya. Efficiency of cut configuration in driving tunnels with a set of blast holes. Soviet Mining Science. 1989. Т. 25. № 4. С. 379–386.
18. Цытович Н.А. Механика мёрзлых грунтов. М., Высшая школа.1983. 228 с.
19. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М., Высшая школа. 1978. 447 с.
20. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении. Известия высших учебных заведений // Лесной журнал. 2008. № 4. С. 7.
21. Шапиро В.Я., Гурьев А.Ю., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Друзьянова В.П., Марков О.Б. Оценка значимости геотехнических факторов лесозаготовительных работ на склонах криолитозоны // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 2(66). С. 92–100.
22. Новиков М.С., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Каляшов В.А. Методика и аппаратура экспериментальных исследований динамики температур слоев лесного почвогрунта криолитозоны // Практические аспекты ведения хозяйства и использования лесов. 2023. С. 142–147.

References

1. Imaev V.S., Imaeva L.P., Kozmin B.M., Nikolayev V.V., Semenov R.M. Buffer seismogenic structures between the Eurasian and Amur lithospheric plates in southern Siberia // Pacific Ocean Geology. 2003. Vol. 22. No. 6. pp. 5–61.
2. Imaeva L.P., Imaev V.S., Kozmin B.M. Seismic and geodynamics of the Aldan block // Pacific Ocean Geology. 2012. Vol. 31. No. 1. pp. 5–17.
3. Lapin P.S. Sustainable development of modern relief in the area of articulation of the Chuiskaya and Kurai intragastric depressions (Gorny Altai) // Regional geosystems. 2022. Vol. 46. No. 1. pp. 26–39.
4. Khondusenko T.S., Kukushkin I.A. Aspects of safe operation of roads in mountainous territories of Khabarovsk Krai // Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastre at the beginning of the third millennium. Materials of the X International Scientific and Practical Conference. In 2 parts. Editorial board: O.E. Sysoev (ed.) [and others]. Komsomolsk-on-Amur, 2023. pp. 237–239.
5. Zakabunya R.Y. Construction in conditions of mountainous relief // Military engineering in the Far East of Russia. Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference. 2021. pp. 121–124.
6. Ryabukhin P.B., Abuzov A.V. Environment-saving technological equipment for mining forestry. 2008. No. 6. pp. 36–37.
7. Fedorov A.G., Aleshkov O.A. Features of the operation of machine components and assemblies in mountainous conditions // Modern aspects of the development and trouble-free operation of automotive equipment (armored and tank weapons and equipment). Collection of scientific articles of the interuniversity scientific and technical conference. Novosibirsk, 2024. pp. 256–261.
8. 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. No. 2. pp. 1–47.
9. Kalyashov V.A., Do T.A., Grigoreva O.I., Guryev A.Yu., Novogorodov D.V. Modern technical solutions for ensuring safe operation of forest machinery on mountain slopes // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2022. No. 2. pp. 11–25.
10. Krivosheev A.A., Burmistrova O.N., Kunitskaya O.A., Zadrauskaite N.O., Ryabukhin P.B., Rudov S.E. Experimental studies of the basic cross-country ability of a wheeled propulsion system of a forest tire when working on a slope // Resources and Technology. 2025. Vol. 22. No. 4. pp. 57–77.
11. 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 conference with international participation. 2017. pp. 542–546.
12. Tsarapov M.N. Formation of strength characteristics of soils during thawing // Bulletin of the Moscow University. Series 4: Geology. 2007. No. 6. pp. 31–34.
13. GOST 12248.1-2020. Soils. Determination of strength characteristics by the single-plate section method. M. Standartinform.2020. 20 p.
14. Gazizov A.M., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Gumerova O.M. Modeling of the process of bark destruction during cutting // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2010. No. 193. pp. 211–221.
15. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Modeling the interaction of forest machines with soil when working on slopes // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine. 2021. No. 6 (384). pp. 121–134.
16. 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 the operation of forest machinery and traction systems on the slopes of a thawing soil massif // Forestry engineering magazine. 2021. Vol.11. No. 2. (42). pp.121–132.
17. Shapiro V.Ya. Efficiency of cut configuration in driving tunnels with a set of blast holes. Soviet Min-ing Science. 1989. T. 25. No. 4. C. 379–386.
18. Tsytovich N.A. Mechanics of frozen soils. Moscow, Higher School, 1983. 228 p.
19. Vyalov S.S. Rheological foundations of soil mechanics. Moscow, Higher School, 1978. 447 p.
20. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Zhukova A.I. Evaluation of soil deformation processes during cyclic compaction. Izvestia of higher educational institutions // Lesnoy zhurnal. 2008. No. 4. p. 7.
21. Shapiro V.Ya., Guryev A.Yu., Kalyashov V.A., Grigorev I.V., Druzyanova V.P., Markov O.B. Assessment of the significance of geotechnical factors of logging operations on the slopes of the cryolithozone // The system. Methods. Technologies. 2025. No. 2 (66). pp. 92–100.
22. Novikov M.S., Kunitskaya O.A., Rudov S.E., Kalyashov V.A. Methods and equipment for experimental studies of temperature dynamics of forest soil layers of the cryolithozone // Practical aspects of forest management and use. 2023. pp.142–147.