

Особенности разрушения оттаивающего почвогрунта на склоне в боковых полосах трасс движения лесных машин

В.Я. Шапиро^{1а}, Я.А. Рыжов^{2б}, И.В. Григорьев^{3с}, Е.А. Тихонов^{4д}, А.В. Алексеева^{5е},
Е.Ю. Кривоконева^{6ф}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Институтский переулок, 3, Россия

² Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8, Россия

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

⁴ Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, Россия

⁵ Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия

⁶ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, 111, Россия

^а shapiro54vlad@mail.ru, ^б irosmagelav@mail.ru, ^с silver73@inbox.ru,

^д tihonov@petersu.ru, ^е savadf0706@mail.ru, ^ф Krivokoneva.egorka@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^б <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>,

^е <https://orcid.org/0000-0002-1599-631X>, ^ф <https://orcid.org/0000-0001-9868-7143>

Статья поступила 15.12.2025, принята 19.01.2026

Преобладающими древесными породами лесов на многолетней мерзлоте являются светолюбивые хвойные – сосна и лиственница. Эти породы показывают качественное и устойчивое, последующее естественно лесовосстановление после рубок лесных насаждений и лесных пожаров. Основной задачей последующих лесохозяйственных мероприятий является поддержание оптимальной полноты таких насаждений, что достигается проведением рубок ухода за лесом, являющимися, по технологии проведения, выборочными рубками. С целью сохранения подстиляющей лесные насаждения мерзлоты и предотвращения её таяния при проведении рубок спелых и перестойных насаждений в криолитозоне также рекомендуется отдавать предпочтение выборочным рубкам. При выборочных рубках лесных насаждений корневые системы оставляемых на доращивание деревьев и подроста, находящихся вблизи трасс движения лесных машин (трелёвочных волоков и технологических коридоров), могут подвергаться негативному воздействию от сил, действующих от движителей машин на боковые полосы трасс движения. Такое негативное воздействие приводит к ухудшению корневого питания, снижению прироста, ослаблению деревьев, и, соответственно, повышению вероятности их поражению вредителями и болезнями. Результаты данной работы позволяют на стадии проектирования технологических схем лесохозяйственных и лесозаготовительных работ на склонах на многолетней мерзлоте произвести оценку размеров боковых защитных полос и границ безопасных зон с целью сохранения корневых систем подроста и/или оставляемых на доращивание деревьев.

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

Features of the destruction of thawing soil on a slope in the side lanes of forestry machinery routes

V.Ya. Shapiro^{1а}, Ya.A. Ryzhov^{2б}, I.V. Grigoriev^{3с}, E.A. Tikhonov^{4д}, A.V. Alekseeva^{5е},
E.Yu. Krivokoneva^{6ф}

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

² Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

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

⁴ Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia

⁵ North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov; 58, Belinsky St., Yakutsk, Russia

⁶ Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, Branch of Don State Agrarian University; 111, Pushkiskaya St., Novocherkassk, Russia

^а shapiro54vlad@mail.ru, ^б irosmagelav@mail.ru, ^с silver73@inbox.ru,

^д tihonov@petersu.ru, ^е savadf0706@mail.ru, ^ф Krivokoneva.egorka@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^б <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>,

^е <https://orcid.org/0000-0002-1599-631X>, ^ф <https://orcid.org/0000-0001-9868-7143>

Received 15.12.2025, accepted 19.01.2026

The predominant tree species in permafrost forests are sun-loving conifers – pine and larch. These species demonstrate high-quality and sustainable natural regeneration following logging and forest fires. The primary objective of subsequent forest management is to maintain optimal stand density, which is achieved through thinning, which is technically considered selective logging. To preserve the underlying permafrost and prevent its thaw, selective logging is also recommended when logging mature and overmature stands in the permafrost zone. During selective logging of forest stands, the root systems of trees and young growth left for regeneration near forest machine routes (skidding trails and utility corridors) may be negatively impacted by the forces exerted by the machine propellers on the side strips of the routes. This negative impact leads to reduced root nutrition, reduced growth, weakened trees, and, consequently, an increased risk of pest and disease infestation. The results of this study allow one to estimate the dimensions of lateral protective strips and the boundaries of safe zones during the design phase of forest management and harvesting operations on slopes with permafrost soil, in order to preserve the root systems of young growth and/or trees left for regeneration.

Keywords: forests on slopes, forests on permafrost, logging, forestry machines, skidding systems, soil deformation, selective logging, tree root systems.

Введение. В настоящее время в лесозаготовительном производстве и в лесном хозяйстве преобладают машины с колёсными движителями и машинно-тракторные агрегаты на их базе. Значительная часть лесного фонда Российской Федерации располагается на уклонах. Работа на таких участках связана с дополнительными сложностями и затратами, которые увеличиваются по мере роста угла уклона склона.

Для повышения эффективности освоения участков лесного фонда на склонах известно большое количество технических и технологических решений, таких как, например, нарезание террас, специальные схемы разработки лесосек, канатные трелёвочные установки различных конструкций, горные процессоры, различные лебёдки, как самоходные, так и встроенные в трансмиссию лесных машин, модернизация движителей машин – оснащение моногусеницами, цепями противоскольжения, наполнение колёс соляным раствором, перевод на полугусеничный ход (если конструкция трактора это позволяет) и т. д.

Все эти решения в той или иной мере оправданы при работе лесных машин и транспортно-технологических агрегатов на их базе на протяжённых склонах, например, в горной местной, на больших осваиваемых площадях, значительных запасах древесины или объёмах лесохозяйственных работ – например, подготовке почв на вырубках/гарях.

Но в значительном количестве случаев, при проведении лесосечных и/или лесохозяйственных работ приходится сталкиваться с небольшими по протяжённости (площади), но часто достаточно крутыми уклонами, например, при рубке линейных объектов, на которых использование указанных выше технических и технологических решений неоправданно экономически. И при этом выполнить лесосечные и/или лесохозяйственные работы на них необходимо и часто строго по графику работ, невзирая на сиюминутные климатические условия, прежде всего осадки.

На склонах не встречаются заболоченные участки, но они могут оказаться значительно переувлажнены после дождя или во время снеготаяния. Сила гравитации ускоряет сток воды к подошве склонов, у которых покрывающие склон почвогрунты оказываются переувлажнены в наибольшей степени.

Необходимость выполнения работ колёсными лесными машинами на переувлажнённых склонах, как и при работе лесных машин на переувлажнённых почвогрунтах на равнине, приводит к быстрому образованию колеи, разрушению почвогрунта под движителем

и в боковых полосах трелёвочного волока (технологического коридора).

При увеличении глубины колеи до величины дорожного просвета (клиренса) машин работоспособность трассы движения является исчерпанной. При этом при планировании и выполнении лесосечных работ необходимо соблюдать требования Приказа Министерства Природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 17.01.2022 г. № 23 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки», существенно ограничивающего процент площади лесосеки, занятой трелёвочными волоками (технологическими коридорами).

На практике часто можно наблюдать картину, когда при работе в рассматриваемых выше условиях с целью продлить работоспособность трассы движения (в случае необходимости неоднократного перемещения по ней) машина начинает выполнять манёвры («галсы»), за счёт которых колёсный движитель срезает нарастающий межколеяный выступ, предотвращая тем самым его рост до величины дорожного просвета машины.

При этом слабая несущая способность переувлажнённого почвогрунта, заключающаяся не только в снижении его сопротивления разрушению, но и в снижении возможности реализации движителем касательной силы тяги, особенно при подъёме лесной машины на склон, очень часто приводит к появлению эффекта буксования, вызывающего не только повышение расхода топлива, но и увеличение негативного воздействия движителя на почвогрунт. То есть при буксовании движитель не только продавливает, но также ещё и «выкапывает» колею, за счёт чего интенсивность её образования ещё более увеличивается.

Особенности маневрирования колёсных лесных машин на склонах при работе на слабонесущих почвогрунтах с учётом буксования является пока малоизученным вопросом, как с теоретической, так и с практической точек зрения. При этом данный вопрос часто является критически важным, как с точки зрения обеспечения безопасности персонала, так и с точки зрения эффективности работы самой лесной машины.

При проведении выборочных рубок леса, включая рубки ухода за лесом, а также рубок, ориентированных на естественно последующее лесовосстановление с оставлением на вырубке семенных деревьев, остро встаёт вопрос не только о сохранении подроста и оставляемых

на доразраживание деревьев при проведении лесосечных работ, но и о перспективах их дальнейшего развития и роста [1, 2]. Последнее во многом зависит от степени повреждения (угнетения) корневых систем, степень которой не видно при визуальном осмотре вырубki. Однако невидимое не является несуществующим. В связи с тем, что деформация почвогрунта при воздействии на него движителей лесных машин распространяется не только нормально к поверхности движения, но и по бокам от ездовой поверхности трасс движения лесных машин – трелёвочных волоков или технологических коридоров (рис. 1) [3–5], корневые системы находящиеся в боковых полосах трассы движения лесных машин деревьев и/или подроста, очевидно, будут этому воздействию подвержены.

Такое уплотняющее воздействие может приводить к угнетению корневых систем из-за снижения порозности почвогрунта, ухудшения корневого питания, снижения аэрации [2, 5–9], и т. д.

Исходя из того, что древесно-кустарниковые растения, произрастающие на многолетней мерзлоте, и так находятся в достаточно экстремальных условиях, в том числе ввиду сильно заторможенных почвенных процессов, дополнительное угнетение их корневых систем может привести к существенному замедлению роста или вовсе к их отпадy [10]. В результате лесоводственные эффекты от проведения, например, рубок ухода за лесом, будут значительно ухудшены.

В обычных условиях, прежде всего, это относится к древесным породам с поверхностными корневыми системами, такими как ель и пихта. Но в условиях многолетней мерзлоты древесные породы с обычно стержневыми корневыми системами, такие как сосна и лиственница, также образуют корневые системы близки к поверхности (в слоях сезонной мерзлоты), не заглубляя корни в слой многолетней мерзлоты.

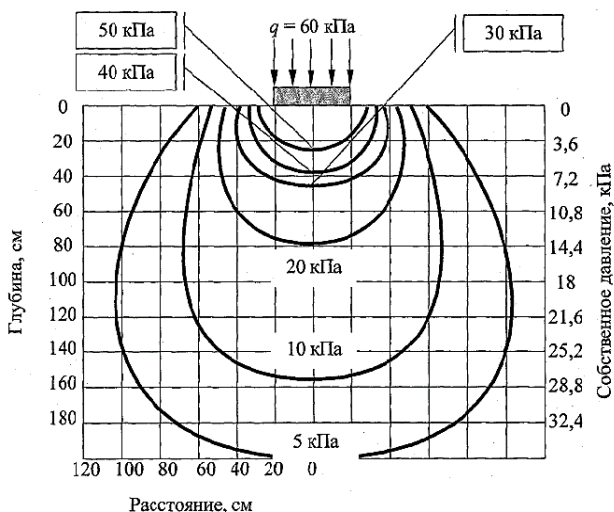


Рис. 1. Эпюра дополнительных напряжений в идеальном почвогрунте и его собственное давление при плотности $1,8 \text{ г/см}^3$ [6]

Материалы и методы исследования. Моделирование процессов деформирования и уплотнения различных почвогрунтов на равнинной местности под

воздействием лесных машин и трелёвочных систем в боковых полосах трелёвочного волока изложено в работах [11, 12].

Поставленные в этих работах задачи решались с использованием объёмных моделей деформирования почвогрунтов в главных напряжениях с целью минимизации вредного воздействия статических нагрузок на корневые системы подроста и/или оставляемых на доразраживание деревьев при выборочных рубках лесных насаждений, включая рубки ухода за лесом, при многократном проходе лесных машин и трелёвочных систем. Это обусловлено нормативными требованиями движения лесных машин и трелёвочных систем по заранее намеченным трассам движения (трелёвочным волокам и технологическим коридорам).

На рис. 2 представлена одна из типовых схем проведения рубки лесных насаждений на склоне с сохранением подроста, что обуславливает необходимость установления допустимого расстояния G от боковых границ трелёвочных волоков.

Величина G должна устанавливаться с учётом ширины H охранной полосы от границы трелёвочного волока или технологического коридора до расположения корневой системы подроста и/или оставляемых на доразраживание деревьев с тем, чтобы исключить разрушение краевой части массива оттаивающего почвогрунта на склоне от действующих нагрузок.

Закономерности такого разрушения и выявленные основные геотехнические и геомеханические факторы установлены в работах [14–16].

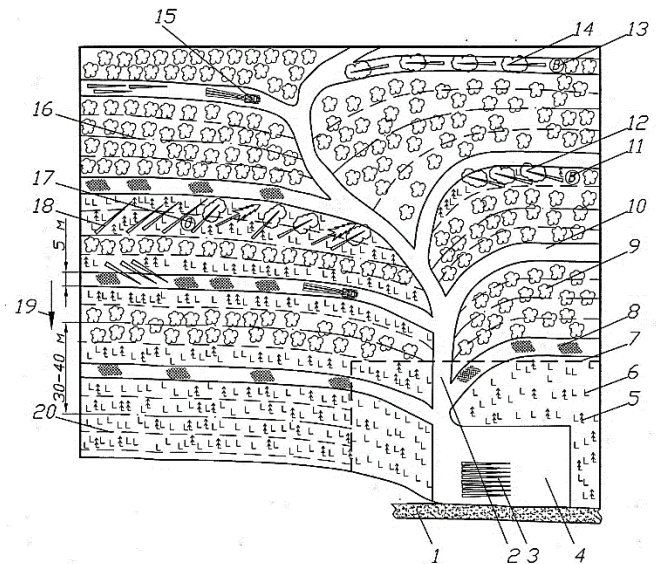


Рис. 2. Схема проведения сплошной рубки лесных насаждений с сохранением подроста на склоне [13]: 1 – лесовозный ус; 2 – магистральный трелёвочный волок; 3 – штабель лесоматериалов; 4 – верхний склад (погрузочный пункт); 5 – подрост; 6 – пни; 7 – границы зоны безопасности; 8 – порубочные остатки; 9 – насаждения до рубки; 10 – пасечный волок; 11 – вальщик; 12 – вырубленные деревья на лентах; 13 – прорубка пасечного волока; 14 – поваленные деревья на пасечном волоке; 15 – трелёвочный трактор; 16 – границы пасек; 17 – обрезка сучьев; 18 – хлысты; 19 – направление склона; 20 – граница лент

Проблемы, связанные с разрушением массива почвогрунта в боковых полосах трелёвочного волока или технологического коридора, возникают в момент маневрирования лесных машин и трелёвочных систем, поскольку в этом случае возникают значительные сдвиговые напряжения и деформации в направлении, перпендикулярном направлению движения, т. е. в направлении к границе безопасной для корневых систем подростка и/или оставляемых на дорастивание деревьев зоны.

В процессе движения лесных машин, особенно при тракторной трелёвке, точно выдержать заданное направление движения затруднительно, и лесные машины, особенно трелёвочные системы многократно совершают поворотные движения (манёвры).

В этом случае почвогрунт переходит в сложное объёмное напряжённо-деформированное состояние с возникновением дополнительных сдвиговых деформаций.

С позиций механики контактного разрушения в этом случае напряжения возникают на произвольных, в общем случае, неглавных площадках, что обуславливает действие касательных напряжений в направлении, перпендикулярном направлению трассы движения лесных машин и трелёвочных систем.

Результаты исследования. Следуя положениям [11, 12], будем считать, что под действием вертикальной нагрузки весом P на почвогрунт в зоне контакта действует сила тяжести, приложенная к центру масс лесной машины или трелёвочной системы и направленная вертикально вниз вглубь массива почвогрунта.

Вследствие этого процесс деформирования краевой части массива почвогрунта происходит в пространственной подвижной декартовой системе координат $Oxyz$, связанной с местоположением центра масс.

Ось x направим вдоль поверхности склона, y – в направлении охранной полосы, z – перпендикулярно к поверхности склона, и в этом направлении действует проекция силы P , равная $Q = P \cos \alpha$, где α – угол наклона поверхности склона к линии горизонта.

Если оси системы являются главными, то на элементарных площадках действуют соответствующие главные напряжения: $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_y$, $\sigma_3 = \sigma_x$, и касательные напряжения в этом случае отсутствуют.

В процессе движения лесные машины или трелёвочные системы могут совершать маневрирование и отклонение от осевого направления движения на угол θ .

В этом случае процесс деформирования почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $zr\theta$ с вертикальной z , радиальной r и тангенциальной θ координатами.

Компоненты тензора напряжений в этой системе координат при наличии касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ определяются как:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_1; & \sigma_r &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; & (1) \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; & \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta. \end{aligned}$$

Из (1) следует, что при отсутствии поворота ($\theta = 0$) компоненты тензора напряжений являются главными:

$$\sigma_z = \sigma_1, \sigma_r = \sigma_2, \sigma_\theta = \sigma_3, \tau_{r\theta} = 0, \quad (2)$$

которые в соответствии с [17] равны:

$$\sigma_z = -\frac{3Q}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-5/2}, \quad (3a)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\}, \quad (3b)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] + z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right\}, \quad (3в)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Характер изменения касательных напряжений $\tau_{r\theta}$, кПа с ростом расстояния r , м в направлении к границе безопасной для корневых систем зоны и угла θ° представлен в табл. 1.

Вычисления произведены с использованием соотношений (1)–(3) при фиксированных: $Q = 19$ т, $\nu = 0,35$, $\alpha = 15^\circ$.

Как видим, при удалении от центра приложения статической нагрузки на расстояние от $r = 0,2$ м до $r = 0,4$ м касательные напряжения существенно снижаются, с ростом θ – увеличиваются.

Таблица 1. Зависимость касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ от угла θ и расстояния r

Угол θ°	$r = 0,2$ м	$r = 0,4$ м
5	14,51	6,23
10	28,77	12,35
20	57,28	24,59

Графическая обработка результатов расчётов показала, что снижение касательных напряжений в радиальном направлении подчиняется затухающему экспоненциальному закону для любого фиксированного угла θ .

В качестве критерия разрушения примем условие превышения величиной $\tau_{r\theta}$ предельного сопротивления грунта сдвигу τ_c , определяемого в соответствии с паспортом прочности Кулона-Мора:

$$\tau_c = C + \sigma_z \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где C – величина сцепления, а φ – угол внутреннего трения грунта.

Обратившись к соотношению (3a), можно заключить, что при постоянном и заданном z , в частности на глубине корневой системы подростка или оставляемых на дорастивание деревьев ($z = 0,1-0,2$ м), вертикальная σ_z компонента тензора напряжений с ростом радиальной координаты r снижается по закону $\sigma_z \sim 1/r^5$, т. е. $\sigma_z \rightarrow 0$.

Как следует в этом случае из анализа (4), предел прочности почвогрунта на сдвиг τ_c с удалением от границы трелёвочного волока или технологического коридора в направлении к границе зоны безопасности корневых систем будет определяться в основном величиной сцепления C .

В результате исследований [14–16], установлено, что параметр C существенно зависит от влажности W почвогрунта на склоне на многолетней мерзлоте.

Так, для оттаивающего суглинки:

$$C = C_c(-1,1091K_W + 1,3189), \quad (5)$$

где C_c – величина сцепления почвогрунта в сухом состоянии ($W = 15 - 18 \%$), коэффициент влажности K_W равен отношению показателя общей влажности W грунта к пределу его текучести, т. е. $K_W = W/W_T$.

Оценки C при двукратном увеличении коэффициента влажности K_W с 0,5 до 1 при $W_T = 40 \%$ (рост общей влажности W с 20 до 40 %) дают при $C_c = 20$ кПа диапазон снижения величины сцепления C от 14,15 кПа (70,7 % C_c) до 3,62 (18,1% C_c), т. е. практически в 4 раза.

Сравнение таких показателей прочности почвогрунта со значениями формируемых касательных напряжений (табл. 1) позволяет сделать вывод об образовании существенных по размерам зон разрушения в направлении к границе зоны безопасности для сохранения корневых систем подроста и/или оставляемых на дорастивание деревьев.

Таким образом, в качестве критерия разрушения принимаем условие:

$$\tau_{r\theta} > \tau_c, \quad (6)$$

согласно которому определяется размер зоны разрушения $r = r_p$, принимаемой за ширину H охранной полосы.

Важной характеристикой процесса деформирования влажного почвогрунта с внутренним трением является коэффициент Пуассона ν , который зависит от влажности почвогрунта W , о чем свидетельствуют результаты исследований [18].

На рис. 3 представлены зависимости ν от W , %: кривая 1 – данные аппроксимации по методике [19] лабораторных испытаний на образцах мёрзлых и оттаивающих грунтов [18], прямая 2 – расчётная, полученная как 1/100 от показателя W , %. Относительная погрешность оценки ν не выходит за пределы 3,5–4,5%.

Показатель влажности W зависит от местоположения участка волока на поверхности склона, когда оттаивающий слой почвогрунта граничит с водонепроницаемым слоем вечной мерзлоты, иначе говоря – слой сезонной мерзлоты граничит со слоем многолетней мерзлоты.

Следуя положениям [14–16], будем считать, что лесная машина или трелёвочная система на склоне с углом наклона α удалены от его подошвы на расстоянии L .

Тогда коэффициент влажности K_W :

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin \alpha}{H_{от}}, \quad (6)$$

где $H_{от}$ – мощность оттаивающего слоя почвогрунта, граничащего с мёрзлым слоем.

Коэффициент Пуассона ν входит в соотношения (3б), (3в), определяющие радиальные, тангенциальные, а значит и касательные напряжения $\tau_{r\theta}$.

На рис. 4 представлены результаты математического моделирования по оценке влияния показателя W , % на величину H , м при двух возможных углах маневрирования лесной машины или трелевочной системы: $\theta = 20^\circ$ и $\theta = 5^\circ$.

Расчёты выполнены для оттаивающего суглинка при следующих параметрах: $Q = 14$ т, $\alpha = 15^\circ$. Значения

L и $H_{от}$ варьировались с целью достижения заданных показателей W .

Данным рис. 4 позволяют заключить, что при работе на переувлажнённых нижних участках склона и возможных существенных маневрах лесной машины или трелёвочной системы величина H достигает 1 м, т. е. между границей трелёвочного волока или технологического коридора и границей безопасной зоны корневых систем в этом случае необходимо предусмотреть достаточно широкие боковые полосы.

На более сухих участках (в средней и верхней частях склона) при влажности W не более 30 % при незначительном маневрировании (угол поворота не более 5°) ширина безопасной для корневых систем полосы допускает снижение в 2 раза до 0,5 м.

Таким образом, при проектировании сети трелёвочных волоков и технологических коридоров на склонах на многолетней мерзлоте необходимо учитывать, как возможные отклонения трассы движения от заданного направления, так и геотехнические параметры склона, в совокупности оказывающие влияние на определение параметров безопасной для корневых систем подроста и/или оставляемых на дорастивание деревьев зоны.

Вес лесной машины или трелёвочной системы также является существенным фактором развития указанных процессов [20–25].

Расчётным путём оценим (рис. 5) влияние веса Q , т на величину H , м. Исходные данные: $W = 35 \%$, $\alpha = 15^\circ$, $\theta = 20^\circ$.

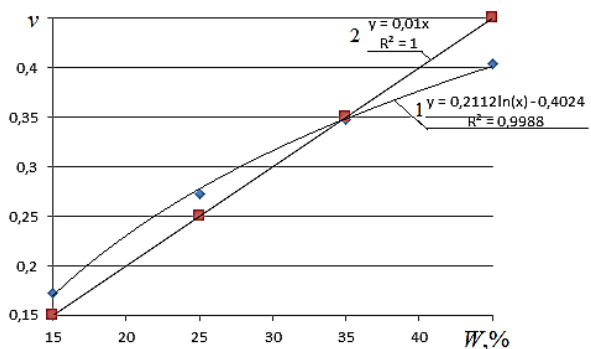


Рис. 3. Зависимость коэффициента Пуассона от влажности W : 1 – данные аппроксимации по методике [19] лабораторных испытаний на образцах мёрзлых и оттаивающих грунтов [18]; 2 – расчётная прямая, полученная как 1/100 от показателя W , %

Логарифмический характер зависимости $H(W)$ позволяет заключить, что наибольшее относительное увеличение ширины охранной полосы для корневых систем наблюдается при изменении веса в диапазоне 6–12 т. Дальнейший рост Q вызывает асимптотическое увеличение H .

Рис. 6 иллюстрирует совместное влияние параметров Q , т и θ° на формирование охранной полосы для корневых систем шириной H , м.

Как показывает анализ данных рис. 6, медианные значения H заполняют диапазон 0,6–0,9 м, что позволяет с двукратной надёжностью оценить минимально допустимое расстояние $G = 1,2-1,8$ м удаления безопасной границы зоны подроста и/или оставляемых на дорастивание деревьев от границы трелёвочного волока или технологического коридора.

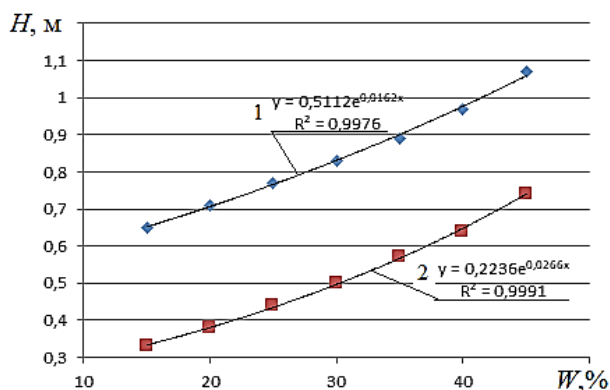


Рис. 4. Влияние влажности грунта на ширину охранной полосы корневых систем: 1 – $\vartheta = 20^\circ$; 2 – $\vartheta = 5^\circ$

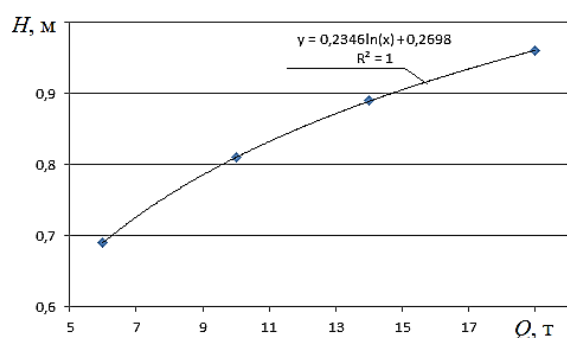


Рис. 5. Влияние веса лесной машины или трелёвочной системы на ширину охранной полосы корневых систем

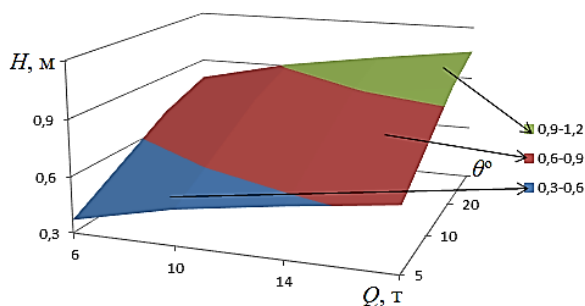


Рис. 6. Зависимость размера охранной полосы для корневых систем от давления движителя и его маневрирования

Литература

1. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. Мат-лы науч.-техн. конф. 2016. С. 112–114.
2. 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. Мат-лы Междунар. науч.-практ. форума. 2013. С. 134–138.
3. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2 (139). С. 87–91.
4. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Дмитриева М.Н., Песков В.Б., Григорьева О.И. Уточненная модель для оценки тягово-

Заключение. Выполненные исследования и установленные закономерности свидетельствуют о том, что с целью снижения вредного воздействия деформирования, уплотнения и разрушения почвогрунта в зоне корневых системы подроста и/или оставляемых на доращивание деревьев при работе лесных машин на склонах на многолетней мерзлоте, необходимо обеспечить реализацию ряда геотехнических мероприятий, а именно:

- устанавливать границы безопасной для корневых систем зоны с учётом размеров (ширины) охранных боковых полос;
- обеспечить снижение веса трелёвочных систем или применение колесных движителей с низким давлением в шинах;
- минимизировать маневрирование лесных машин и трелёвочных систем, особенно на участках с высокой влажностью почвогрунта, достигающей своего предела пластичности;
- оснащать тандемные мосты колёсных лесных машин моногусеницами, снижающими давление на почвогрунт, что равносильно соответствующему снижению веса трелёвочных систем и лесных машин;
- при отсутствии тандемных мостов оснащать колеса лесных машин цепями противоскольжения, что при работе на крутых склонах препятствует пробуксовке и способствует снижению уровня дополнительных сдвиговых деформаций;
- использовать при низкой несущей способности почвогрунта на склонах оттаивающих почвогрунтов самоходные лебёдки или лебёдки, интегрированные в трансмиссию лесных машин, которые позволяют ограничить потребную мощность силы тяги движителя и повысить эффективность и безопасность работ.

Результаты выполненных исследований позволяют на стадии проектирования технологических схем лесохозяйственных и лесозаготовительных работ на склонах на многолетней мерзлоте произвести оценку размеров боковых защитных полос и границ безопасных зон с целью сохранения корневых систем подроста и/или оставляемых на доращивание деревьев.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Материалы исследования получены за счёт гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

5. 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.
6. Карасев Ю.А., Марков В., Дмитриев А.С., Должиков И.С., Юдилевич А.М. Перспективность дальнейших исследований по совершенствованию гусеничных лесных машин // Resources and Technology. 2023. № 1, Т. 20. С. 42–86.
7. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных А., лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы. Мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. Отв. редактор Н.С. Захаров. 2020. С. 323–326.

8. 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. Сборник мат-лов Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием, посвященной 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 308-313.
9. Куницкая О.А., Никитина Е.И. Экологические аспекты выборочных рубок леса // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации. сборник статей III Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения-2020»: в 3 томах. Белорусский государственный технологический университет, Представительство федерального агентства по делам СНГ, соотечественников, проживающих за рубежом, и по международному гуманитарному сотрудничеству (Россотрудничество) в Республике Беларусь. Минск, 2021. С. 286–291.
10. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. № 4 (40). С. 25–29.
11. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Лепилин Д.В., Жукова А.И. Моделирование уплотнение почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6 (111). С. 61–64.
12. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Жукова А.И. Модель процесса циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелевочному волоку // Вестник КрасГАУ. 2010. №2(41). С. 8–14.
13. 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.
14. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Пучнин А.Н. Особенности учёта состояния массива мёрзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой // Лесотехнический журнал. 2019. Т.9. №1 (33). С. 116–128.
15. 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 // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. №2 (374). С. 101–117.
16. 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.
17. Бленд Д. Теория линейной вязкоупругости. М. : Мир, 1965. 199 с.
18. Цытович Н.А. Механика мёрзлых грунтов. М., Высшая школа. С. 1983–228.
19. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Дмитриев А.С., Григорьева О.И. Геотехническое обоснование работоспособности трелевочных волоков и технологических коридоров на склонах оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колесным и полугусеничным движителем // Resources and Technology. 2023. Т.20. № 3. С. 15–31.
20. Дьяченко В.М., Должиков И.С., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Барышникова Е.В., Анисимов Е.Е. Теоретическое обоснование тягово-сцепных свойств гусеничного движителя лесной машины для условий многолетней мерзлоты // Resources and Technology. 2025. Т. 22. № 1. С. 1–41.
21. Дмитриев А.С., Куницкая О.А., Дьяченко В.М. Обоснование эффективности использования полугусеничных тракторов на лесозаготовительных и лесохозяйственных операциях // Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса. Мат-лы Междунар. науч. конф. учёных и студентов. Воронеж, 2024. С. 40–43.
22. Хитров Е.Г., Должиков И.С., Куницкая О.А., Друзьянова В.П., Болотин Д.В., Андронов А.В. Моделирование процесса сцепления движителя с почвогрунтом с учетом шага грунтозацепов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 6 (402). С. 147–159.
23. Дмитриев А.С., Должиков И.С., Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Дьяченко В.М., Швецов А.С. Теоретическое обоснование параметров движителя колесно-гусеничной лесной машины // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 163–170.
24. Кривошеев А.А., Куницкая О.А., Бурмистрова О.Н., Морковин В.А., Гурьев А.Ю., Андронов А.В. Теоретический анализ опорной проходимости колесного движителя лесной машины при работе на склоне // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14. № 4 (56). С. 187–207.
25. Дмитриев А.С., Должиков И.С., Куницкая О.А., Дьяченко В.М., Хитров Е.Г., Кривошеев А.А. Результаты вычислительного эксперимента по определению оптимальных параметров и показателей работы колесно-гусеничного движителя лесной машины // Resources and Technology. 2024. Т. 21. № 4. С. 1–43.

References

1. 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 conference. 2016. pp. 112–114.
2. Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kiselev D.S., Khakhina A.M., Rudov M.E. Environmental safety assessment of forest machinery // Natural resources and ecology of the Far Eastern region. Materials of the International Scientific and Practical Forum. 2013. pp. 134–138.
3. Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymsky A.A., Grigoreva O.I. Determination of precipitation during the movement of a logging machine on a two-layer base // Scientific notes of Petrozavodsk State University. 2014. No. 2 (139). pp. 87–91.
4. Khitrov E.G., Khakhina A.M., Dmitrieva M.N., Peskov V.B., Grigoreva O.I. A refined model for evaluating the traction properties of a wheeled propulsion system of a forest vehicle // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2016. No. 217. pp. 108–119.
5. Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Modeling of the impact of forest machinery propellers on the soils of logging areas // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3. No. 5–4 (16–4). pp. 320–323.
6. Karasev Yu.A., Markov V.A., Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Yudilevich A.M. Prospects for further research on improving tracked forest vehicles // Resources and Technology. 2023. No. 1, vol. 20. pp. 42–86.
7. Rudov S.E., Kunitzkaya 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 International Scientific and Technical Conference. Editor-in-chief N.S. Zakharov. 2020. pp. 323–326.
8. Kunitzkaya 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 conference with international participation dedicated to the 255th anniversary

- of the Land Management of Yakutia and the Year of Science and Technology. Yakutsk, 2021. pp. 308–313.
9. 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 International Scientific and Technical Conference "Minsk Scientific Readings 2020": in 3 volumes. Belarusian State Technological University, Representative Office of the Federal Agency for CIS Affairs, Compatriots Living Abroad, and International Humanitarian Cooperation (Rossotrudnichestvo) in the Republic of Belarus. Minsk, 2021. pp. 286–291.
 10. Grigoreva O.I. Features of natural reforestation in cryolithozone conditions // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2018. Vol. 6. No. 4 (40). pp. 25–29.
 11. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Lepilin D.V., Zhukova A.I. Modeling soil compaction in the lateral lanes of a skidding portage taking into account the variability of the route // Scientific Notes of Petrozavodsk State University. 2010.No. 6 (111). pp. 61–64.
 12. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Rudov S.E., Zhukova A.I. Model of the cyclic soil compaction process in strips adjacent to the skidding fiber // Bulletin of KrasGAU, 2010, No. 2 (41). pp. 8–14.
 13. 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.
 14. 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 magazine. 2019. Vol. 9. No. 1(33). pp. 116–112.
 15. 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 // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine. 2020. No. 2 (374). pp. 101–117.
 16. 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.
 17. Bland D. Theory of linear viscoelasticity. Moscow: Mir, 1965. 199s.
 18. Tsytovich N.A. Mechanics of frozen soils. Moscow, Higher School.1983–228 p.
 19. Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Dmitriev A.S., Grigoreva O.I. Geotechnical substantiation of the operability of skidding fibers and technological corridors on the slopes of thawing soils during the operation of forest machines with wheeled and semi-tracked propulsion // Resources and Technology. 2023. Vol. 20. No. 3. pp. 15–31.
 20. Dyachenko V.M., Dolzhikov I.S., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Baryshnikova E.V., Anisimov E.E. Theoretical justification of traction–coupling properties of a tracked propulsion system of a forest vehicle for permafrost conditions // Resources and Technology. 2025. Vol. 22. No. 1. pp. 1–41.
 21. Dmitriev A.S., Kunitskaya O.A., Dyachenko V.M. Substantiation of the effectiveness of using semi–tracked tractors in logging and forestry operations // Energy–saving and environmentally safe technologies of the timber industry. Proceedings of the International Scientific Conference of Scientists and Students. Voronezh, 2024. pp. 40–43.
 22. Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Druzyanova V.P., Bolotin D.V., Andronov A.V. Modeling the process of coupling the propulsor with the soil, taking into account the step of the ground hooks // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 2024. No. 6 (402). pp. 147–159.
 23. Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Khitrov E.G., Dyachenko V.M., Shvetsov A.S. Theoretical substantiation of the parameters of the propulsion of a wheeled-tracked forest vehicle // The system. Methods. Technologies. 2024. No. 1 (61). pp. 163–170.
 24. Krivosheev A.A., Kunitskaya O.A., Burmistrova O.N., Morkovin V.A., Guryev A.Yu., Andronov A.V. Theoretical analysis of the basic maneuverability of a wheeled propulsion system of a forest vehicle when working on a slope // Forestry journal. 2024. Vol. 14. № 4 (56). pp. 187–207.
 25. Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Dyachenko V.M., Khitrov E.G., Krivosheev A.A. Results of a computational experiment to determine the optimal parameters and performance indicators of a wheeled-tracked propulsion system of a forest vehicle // Resources and Technology. 2024. Vol. 21. No. 4. pp. 1–4.