

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6943

УДК 674.81

Статья

## **Геотехническое обоснование работоспособности трелёвочных волоков и технологических коридоров на склонах оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колёсным и полугусеничным двигателем**

**Каляшов Виталий Анатольевич**

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

**Шапиро Владимир Яковлевич**

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

**Григорьев Игорь Владиславович**

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

**Куницкая Ольга Анатольевна**

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

**Дмитриев Александр Сергеевич**

*инженер авторского надзора, АО «Гипростроймост-Санкт-Петербург» (Российская Федерация), dmitriev.nauka@mail.ru*

**Григорьева Ольга Ивановна**

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva\_o@list.ru*

*Получена: 20 марта 2023 / Принята: 29 августа 2023 / Опубликовано: 1 сентября 2023*

---

**Аннотация:** В Российской Федерации значительная часть территории лесного фонда расположена на вечной мерзлоте. Многие регионы России обладают

большими запасами спелых и перестойных эксплуатационных лесов, причём значительная часть этих запасов расположена в труднодоступных местах, не только по отношению к развитости дорожной сети, но и по рельефу местности. В настоящее время подавляющий объём заготовок древесины в России производится при помощи современных машинных комплексов, в основном включающих колёсные лесные машины различной компоновки и назначения. При этом проблема негативного воздействия колёсных лесных машин и трелёвочных систем на их базе не просто остаётся актуальной, а приобретает ещё большую остроту, поскольку экосистемы горных лесов, лесов на склонах сопок и т. д. относятся к наиболее ранимым, подверженным водной и ветровой эрозии. Для снижения негативного воздействия движителей лесных машин на почвогрунты достаточно часто используют машины на полугусеничном ходу, которые, благодаря существенно большему пятну контакта с поверхностью движения и большей силе тяги, в сложных условиях показывают лучшие эксплуатационные характеристики. В статье показано, что каждый склон со своими геометрическими параметрами и фактическими данными о мощности оттаивающего слоя почвогрунта, границе зоны мерзлоты и физико-механическими свойствами почвогрунта является уникальным геотехническим объектом. Многообразие параметров движения лесных машин (трелёвки) при прогнозах глубины колеи обуславливает необходимость классификация склонов по технологическим свойствам почвогрунтов и критерию работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров). Разработка такой классификации должна базироваться на актуальных гидрогеологических и геомеханических данных о состоянии почвогрунтов, слагающих массив склона. Представленные исследования расширяют мнения о технологических требованиях обеспечения работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров) на склонах оттаивающих почвогрунтов, что способствует более эффективному использованию лесозаготовительной техники в сложных сезонно-климатических условиях.

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

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6943

*Article*

## **Geotechnical substantiation of the operability of skidding drags and technological corridors on the slopes of thawing soils during the operation of forest machines with wheeled and semi-tracked propulsion**

**Vitalij Kalyashov**

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

**Vladimir Shapiro**

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

**Igor Grigorev**

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

**Ol'ga Kunickaya**

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

**Alexander Dmitriev**

*resident engineer, JSC «Giprostroy-most-Saint Petersburg» (Russian Federation), dmitriev.nauka@mail.ru*

**Olga Grigoreva**

*Ph. D. in agriculture, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva\_o@list.ru*

*Received: 20 March 2023 / Accepted: 29 August 2023 / Published: 1 September 2023*

---

**Abstract:** In the Russian Federation a significant part of the forest fund is located on permafrost. Many regions of Russia have large reserves of ripe and over-mature operational forests, and a significant part of these reserves is located in hard-to-reach places. Currently, the overwhelming volume of wood harvesting in Russia is performed by using modern machine complexes mainly including wheeled forestry machines of various configuration and purposes. At the same time the problem of the negative

impact of wheeled forest machines and skidding systems based on them becomes even more acute since the ecosystems of mountain forests and forests on the slopes of hills are among the most vulnerable ones due to water and wind erosion. To reduce the negative impact of forest machinery propellers on soils semi-tracked vehicles are often used because of their significantly larger contact surface and a greater traction force in difficult conditions. The article shows that each slope as a unique geotechnical object that features its own geometric parameters and actual data including the capacity of the thawing soil bearing surface and permafrost zone edge should be classified taking into account the variety of skidder movement parameters, the technological properties of soils and the criterion of the extraction road operability. The development of such a classification should be based on up-to-date hydrogeological and geomechanical data on the state of the soils composing the slope area. The presented studies expand the understanding of the technological requirements for ensuring the extraction road operability on the slopes with thawing soils, thus contributing to more efficient use of logging technology in difficult seasonal and climatic conditions.

**Keywords:** forests on slopes; logging operations; skidding; soils; forests on permafrost

---

## 1. Введение

Условия эксплуатации различных участков леса характеризуются многообразием параметров технического, технологического и геомеханического состояний. В пределах одной лесосеки можно выделить ряд участков, почвогрунты которых будут существенно отличаться, в частности, по технологическим свойствам — устойчивости, прочности и несущей способности, которые, наряду с другими факторами, зависят от сезонности осуществления трелёвочных работ [1—5].

Работоспособность трелёвочного волокна (технологического коридора) означает возможность эффективной эксплуатации лесной машины или трелёвочной системы в заданном режиме, что выдвигает требование соответствия технологических параметров трелёвки (веса груза, давления в шинах, уровня маневренности и др.) прочностным характеристикам почвогрунта [6—8]. В этом контексте следует рассматривать и вопросы определения оптимальной глубины  $h_k$  образованной колеи.

Из различных характеристик прочности почвогрунтов можно особо отметить такое их свойство, как несущая способность  $P_s$  (кПа), которая нашла ограниченное применение при изучении процессов статической нагрузки на почвогрунт лесных машин и трелёвочных систем [9—12]. Областью основного использования этого показателя являются фундаменты крупных оснований.

При ограниченных (в пределах пятна контакта) размерах взаимодействия колёсной пары или гусеницы лесной машины с краевой частью массива почвогрунта необходимо учитывать вероятностный характер показателя несущей способности  $P_s$  в силу неполной информации об исходных факторах, влияющих на прочность среды [13].

Рассматривая процесс взаимодействия лесной машины или трелёвочной системы на её базе с краевой частью массива почвогрунта, следует отметить, что наиболее информативным показателем сопротивления почвогрунта статическим разрушающим нагрузкам является прочность на одноосное сжатие  $R_c$  (кПа).

Обоснование этого вывода вытекает из того обстоятельства, что величина  $R_c$  отражает как способность почвогрунта сопротивляться вертикальным сжимающим нагрузкам, так и то, что само определение этой величины происходит при неограниченном боковом расширении, вплоть до момента предельного сопротивления сдвигу. Для условий действия статической нагрузки на склонах, когда трелёвочный волок (технологический коридор) расположен на наклонной плоскости, учёт механизма сдвига почвогрунта представляется важным.

Отметим, что показатель  $R_c$  характеризует прочность при одноосном сжатии также в процессе развития деформаций сдвига не только при разрушении почвогрунтов, но и других сплошных сред, в частности массива коры [4].

## 2. Материалы и методы

Из анализа огибающей кругов Мора в рамках обоснования паспорта прочности Кулона для определения величины  $R_c$  в работе [15] получено соотношение

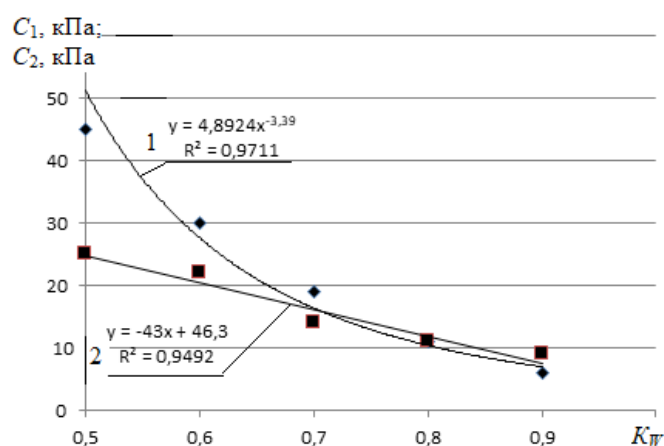
$$R_c = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (1)$$

где  $C$  — величина сцепления грунта, кПа,  $\varphi$  — угол внутреннего трения, °.

Использование показателя прочности  $R_c$ , зависящего от двух характеристик  $C$  и  $\varphi$ , имеет особую значимость для оценки работоспособности трелёвочного волока (технологического коридора) на склонах оттаивающих почвогрунтов, поскольку близкое расположение водонепроницаемой границы вечной мерзлоты и обусловленный ею резкий рост влажности ( $W$ , %) почвогрунта снижают показатели его прочности [16].

Так, на верхних участках склона влажность  $W$  почвогрунта минимальная и стремится к нижнему пределу пластичности ( $W_p$ ) или величине на границе раскатывания, тогда как максимальная влажность наблюдается на нижних участках, у основания склона и стремится к верхнему пределу пластичности или величине на границе текучести ( $W_T$ ). Введём для дальнейшего анализа безразмерный показатель влажности почвогрунта в виде коэффициента  $K_W = \frac{W}{W_T}$ .

Обработка опытных данных [16] для двух видов оттаивающих грунтов: 1 — суглинка и 2 — песка пылеватого в диапазоне изменения  $K_W$  от 0,5 до 0,9 при показателе  $W_T = 40\%$  позволила получить (рисунок 1) графические зависимости величин сцепления соответственно  $C_1$ , кПа (линия 1 — суглинок) и  $C_2$ , кПа (линия 2 — песок) от коэффициента  $K_W$ .

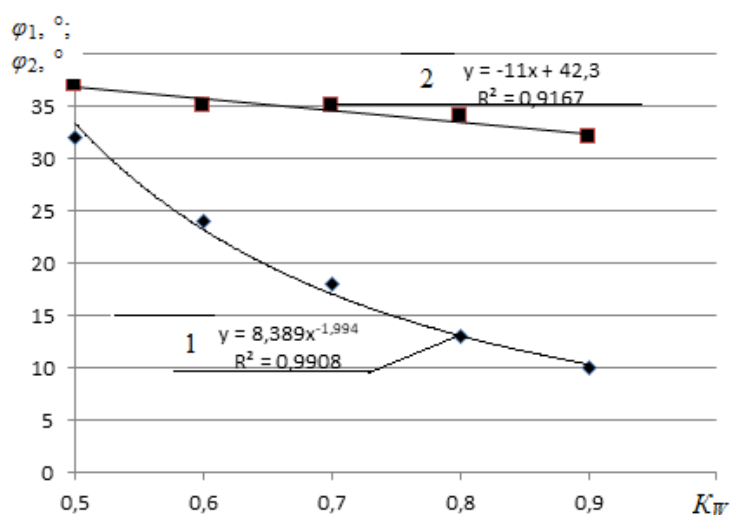


**Рисунок 1.** Зависимости величин сцепления грунтов от относительной влажности: 1 —  $C_1$ , кПа; 2 —  $C_2$ , кПа

**Figure 1.** Dependences of soil adhesion values on relative humidity: 1 —  $C_1$ , kPa; 2 —  $C_2$ , kPa

Из данных рисунка 1 следует, что характер снижения величины  $C$  суглинка с ростом влажности грунта существенно отличается от аналогичной зависимости для песка и это отличие тем значительнее, чем ниже показатель  $W$ . При  $K_W \geq 0,7$  ( $W \geq 28\%$ ) рост влажности приводит к соответствующему снижению величины сцепления для обоих грунтов как в качественном, так и количественном отношениях.

Абсолютно иные результаты (рисунок 2) получены при аналогичном исследовании поведения углов внутреннего трения  $\varphi_1, ^\circ$  (линия 1 — суглинок) и  $\varphi_2, ^\circ$  (линия 2 — песок) с ростом относительной влажности  $K_W$  (ось абсцисс).



**Рисунок 2.** Зависимость углов внутреннего трения грунтов от относительной влажности

**Figure 2.** Dependence of soil internal friction angles on relative humidity

Кратное (более чем в 3 раза) снижение угла  $\varphi_1$  для суглинка при увеличении влажности  $W$  с 20 до 36 % оказывает существенное влияние на уменьшение прочности грунта, в то время как для песка линейное снижение  $\varphi_2$  в этом диапазоне изменения  $W$  не превосходит 15—16 %.

Допустим, что трелёвочный волок (технологический коридор) расположен на склоне протяжённостью  $L_c = 50$  м с углом наклона  $\alpha$  к линии горизонта и массив содержит участок оттаивающего почвогрунта высотой  $H_{OT}$ .

Пусть лесная машина удалена на расстояние  $L$  от основания склона и величина  $K_L = L/L_c, \%$  будет характеризовать меру относительного удаления контакта взаимодействия. Тогда безразмерный параметр  $K_W$  связан с параметрами склона соотношением [17]

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin \alpha}{H_{OT}} \quad (2)$$

Зависимость (2) позволяет в ходе дальнейшего исследования через коэффициент  $K_W$  учесть влияние параметров склона  $L$ ,  $\alpha$  и  $H_{OT}$  на показатели прочности почвогрунтов.

Детальный анализ проблем прочности почвогрунтов, особенно повышенной влажности, требует учёта такого явления, как дилатансия [8].

Принимая во внимание, что давление на почвогрунт происходит в ограниченном объёме, дилатансия будет способствовать росту в нём средних напряжений, что, в свою очередь, приводит к увеличению сопротивления сдвигу и повышению несущей способности почвогрунта.

Определение угла дилатансии  $\psi$ , на который увеличивается суммарный угол внутреннего трения  $\varphi$ , особых проблем при инструментальных исследованиях не вызывает. Основными методами являются однополостной срез, перекашивание, трёхосное сжатие и кручение.

Для определения угла  $\psi$  в работе [18] предложена формула

$$\sin\psi = \frac{\sin\varphi - \sin\varphi_{кр}}{1 - \sin\varphi \sin\varphi_{кр}}, \quad (3)$$

где  $\sin\varphi_{кр}$  — это синус такого значения угла внутреннего трения  $\varphi = \varphi_{кр}$ , который соответствует остаточному значению сопротивления сдвигу и возникновению плоскости потенциала пластичности.

Оценим критическое значение угла  $\varphi$  с помощью полученных на рисунке 1 корреляционных зависимостей  $\varphi(K_W)$  при  $K_W = 1$ , т. е. при достижении влажности  $W$  значения предела пластичности  $W_T$ . Таким образом, для суглинка принимаем  $\varphi_{1,кр} = 8,4^\circ$ , для песка —  $\varphi_{2,кр} = 31,3^\circ$ . Как видим, для песка полученный критический показатель угла внутреннего трения в 3,7 раза больше, чем для суглинка.

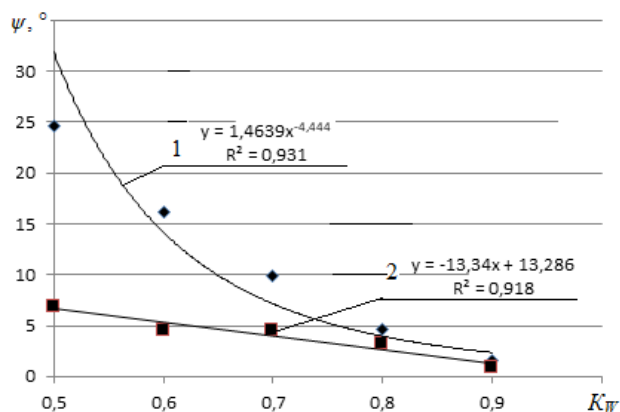
Эффект дилатансии используют при строительстве сооружений и определении прочности фундаментов сооружений.

Оценим с использованием математических моделей механики разрушения грунтов с внутренним трением [19], [20], насколько этот эффект является значимым при определении прочности почвогрунта и работоспособности трелёвочного волока (технологического коридора) на склоне оттаивающего почвогрунта при возможном маневрировании лесной машины.

На рисунке 3 по оси ординат отложены значения углов дилатансии  $\psi$ , ° для суглинка (линия 1) и песка (линия 2), по оси абсцисс — коэффициент  $K_W$ .

Сравним данные рисунков 2 и 3. Диапазон изменения угла  $\psi_2$  для песка весьма узкий и не выходит за пределы  $7^\circ$ , тогда как зависимость  $\psi_1(K_W)$  для суглинка подчиняется степенному закону с высоким отрицательным показателем степени, превышающим уровень, равный  $-4,0$ . При этом для суглинка в сухом состоянии ( $K_W < 0,6$ ) наблюдаются весьма существенные значения угла дилатансии  $\psi_1 > 15^\circ$ .





**Рисунок 3.** Зависимость углов дилатансии  $\psi_1$  и  $\psi_2$  от коэффициента  $K_W$ : 1 —  $\psi_1$ ; 2 —  $\psi_2$

**Figure 3.** Dependence of the dilatancy angles  $\psi_1$  and  $\psi_2$  on the coefficient  $K_W$ : 1 —  $\psi_1$ ; 2 —  $\psi_2$

### 3. Результаты

Исследуем влияние угла дилатансии на изменение показателя прочности почвогрунта на одноосное сжатие  $R_c$ . Результаты представлены на рисунке 4: а) для суглинка — зависимости  $R_c(K_W)$  при учёте только угла внутреннего трения  $\varphi^\circ$  (линия 1) и то же самое, но с учётом угла дилатансии  $\psi^\circ$  (линия 2); б) аналогичные зависимости для песка. Ощутимый (кратный в 2—3 раза) вклад угла дилатансии на повышение прочности грунта имеет место для сухих суглинков, тогда как для влажного состояния грунта можно ограничиться только каноническими значениями угла внутреннего трения  $\varphi^\circ$ . Для песков влиянием угла дилатансии на величину  $R_c$  можно пренебречь даже для сухого состояния грунта (относительная погрешность составляет 8—12 %). Таким образом, для грунтов, обладающих свойством существенного снижения угла внутреннего трения  $\varphi^\circ$  с ростом влажности  $W$ , при значениях  $W \leq 25\%$  учёт угла дилатансии  $\psi^\circ$  при оценке прочности оттаивающего почвогрунта представляется обоснованным и необходимым. В том случае, если наблюдается незначительное влияние показателя влажности  $W$  на изменение угла  $\varphi^\circ$ , эффектом упрочнения почвогрунта за счёт дилатансии можно пренебречь.

Перейдём к оценке работоспособности трелёвочного волокна (технологического коридора) по критерию глубины образованной колеи, нормативные значения которой не должны выходить за пределы  $h_k = 0,1$  м.

Для определения глубины ( $h_k, м$ ) образованной колеи воспользуемся соотношениями, установленными в работе [19], которые учитывают следующие параметры:

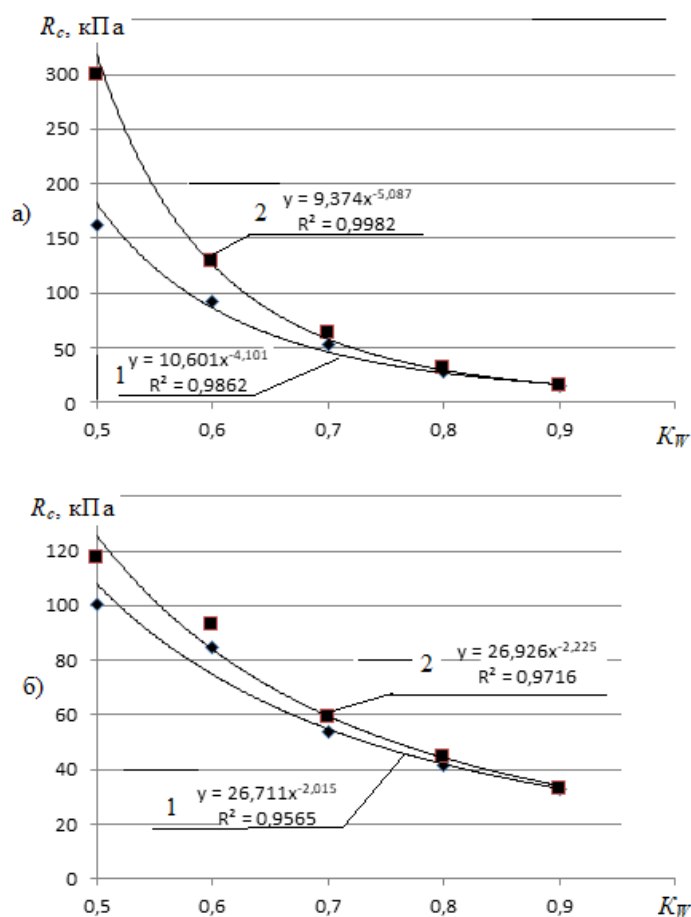
- технические характеристики трелёвки: вес груза  $Q$ , давление на почвогрунт  $\sigma_0$ , радиус колеса  $R$  и поворот движителя на угол  $\theta$ ;

■ физико-механические свойства почвогрунта: величину предельных напряжений сдвига  $\tau$  из паспорта его прочности, модуль общей деформации  $E$ , коэффициенты Пуассона  $\nu$  и бокового распора  $\gamma = \nu/(1-\nu)$ .

В итоге расчёт  $h_k$  производим с помощью системы формул:

$$h_k = a \left\{ \sigma_0 \frac{(1-\nu)(1+\sin 2\theta)}{2\tau} \right\}^{1/n}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{3\varphi \cos \alpha (1-\nu^2)R}{4E}}, \quad \tau = C + \sigma_0 \operatorname{tg} \phi, \quad (4)$$

где  $a$  — радиус контактной площадки,  $n = k - \frac{\gamma}{2}$  — коэффициент затухания напряжений в среде с внутренним трением [20], зависящий от формы штампа. Для штампа сферической формы  $k = 3$ , цилиндрической — 2, для плоского штампа — 1.



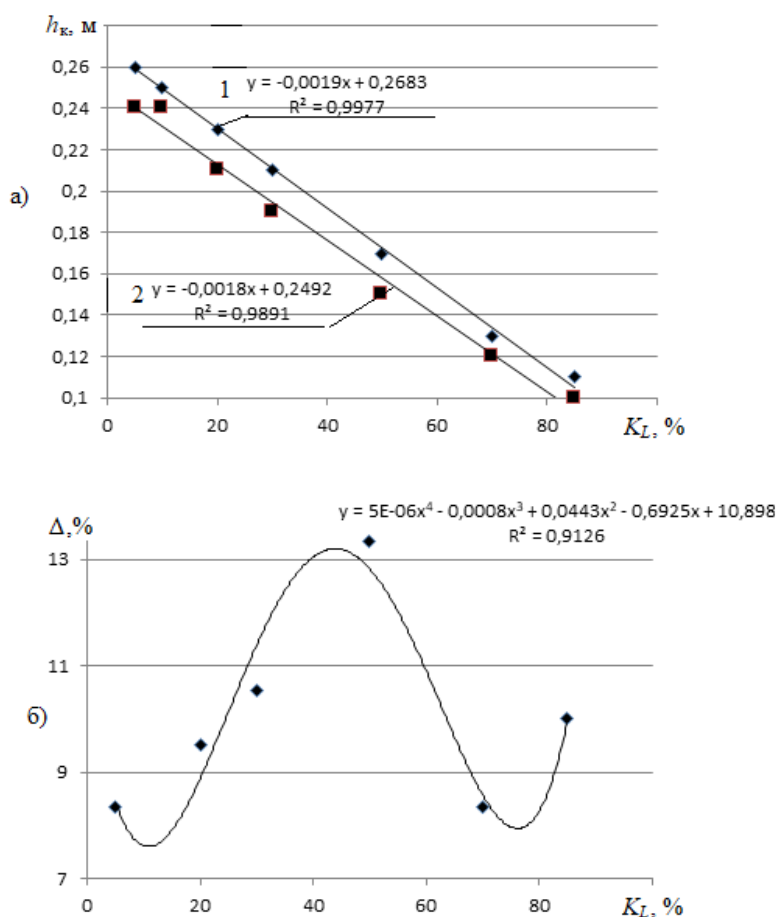
**Рисунок 4.** Влияние угла дилатансии на показатели прочности грунтов на одноосное сжатие: а — суглинок, б — песок; 1 —  $R_c(K_w)$  при учёте только угла внутреннего трения  $\varphi$ , 2 —  $R_c(K_w)$  с учётом угла дилатансии  $\psi$

**Figure 4.** The dilatancy angle effect on the soil strength at uniaxial compression: (a) loam, (b) sand; 1 —  $R_c(K_w)$  taking into account only the angle of internal friction  $\varphi$ , 2 —  $R_c(K_w)$  taking into account the angle of dilatancy  $\psi$

Исходные параметры:  $R = 0,63$  м,  $Q = 19$  т,  $\sigma_o = 56$  кПа,  $k = 2$ ,  $\nu = 0,26$ ,  $\gamma = 0,27$ ,  $E = 1$  МПа,  $W_T = 40\%$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $L_c = 50$  м,  $K_L = 0,5$  ( $L = 25$  м),  $H_{OT} = 10$  м,  $K_W = 0,64$  ( $W = 25,6\%$ ). Для таких условий установлены характеристики паспорта прочности почвогрунтов:  $C_1 = 22,21$  кПа,  $\varphi_1 = 20,43^\circ$ ;  $C_2 = 17,05$  кПа,  $\varphi_2 = 35,26^\circ$ ;  $\psi_1 = 12,36^\circ$ ,  $\psi_2 = 4,73^\circ$ . В итоге получены следующие расчётные значения глубины колеи:

- для суглинка: без учёта дилатансии  $h_{k_1}^{\psi} = 0,17$  м, с учётом дилатансии и увеличения прочности грунта  $h_{k_1}^{\psi} = 0,15$  м (отличие  $\Delta_1$  более 13 %);
- для песка: без учёта дилатансии  $h_{k_2}^{\psi} = 0,15$  м, с учётом дилатансии и увеличения прочности грунта  $h_{k_2}^{\psi} = 0,14$  м (отличие  $\Delta_2$  около 7 %).

На рисунке 5а для суглинка представлены зависимости изменения глубины колеи  $h_k$ , м по мере удаления  $K_L$ , % лесной машины от основания склона: линия 1 — без учёта дилатансии, линия 2 — с учётом этого эффекта, на рисунке 5б — график функции зависимости погрешности  $\Delta$ , % от  $K_L$ , %.



**Рисунок 5.** Снижение  $h_k$  по мере удаления лесной машины от основания склона: линия 1 — без учёта дилатансии, линия 2 — с учётом дилатансии

**Figure 5.** Decrease in  $h_k$  as the forest machine moves away from the slope base: line 1 — without taking into account dilatancy, line 2 — taking into account dilatancy

Как видим, функция  $\Delta(K_L)$  имеет выраженный экстремум в срединной части склона ( $K_L = 0,35-0,55$ ), т. е. при таком местоположении лесной машины (трелёвочной системы) учёт дилатансии представляется наиболее существенным и увеличение прочности почвогрунта приводит к 12—13 %-му снижению глубины колеи.

У основания склона (при максимальной влажности  $W$  почвогрунта) и на его вершине (влажность  $W$  почвогрунта минимальна) угол дилатансии  $\psi$  в дополнении к углу внутреннего трения  $\varphi$  уточняет прогнозную величину  $h_k$  на 8—9 % в направлении её снижения.

Максимальные значения глубины колеи  $h_k$  наблюдаются при следующих условиях: давление на почвогрунт  $\sigma_o$  достигает 50—80 кПа,  $K_L$  не более 0,1 (10 %), мощность слоя оттаивающего почвогрунта  $H_{OT} > 20$  м, модуль общей деформации  $E < 700$  кПа, угол наклона  $\alpha$  не более  $10^\circ$  (поверхность склона близка к границе с зоной мерзлоты). Отмеченные условия работы лесной машины или трелёвочной системы на её базе будем считать экстремальными.

В этом случае влажность  $W$  превышает 35 % и значения  $h_k \rightarrow 0,30-0,35$  м, что значительно (в 2—3 раза) превышает верхнюю границу диапазона нормативных значений  $h_k = 0,10-0,15$  м, когда лесная машина или трелёвочная система функционирует наиболее эффективно, а трелёвочный волок (технологический коридор) можно считать работоспособным. Как показали расчёты, снижение давления в шинах до  $\sigma_o = 27$  кПа в экстремальных условиях обеспечивает существенное (на 40—50 %) уменьшение  $h_k$  до уровня 0,23—0,25 м, но считать трелёвочный волок (технологический коридор) работоспособным не представляется возможным.

В этом случае целесообразно от колёсных лесных машин и форвардеров (ЛМ-К) переходить к использованию техники с полугусеничным ходом (ЛМ-ПГХ), в частности, МТЗ-80, МТЗ-82 — величину давления на почвогрунт можно снизить в 2,5—8 раз (до 8—10 кПа), а грузоподъёмность можно увеличить вдвое [21].

Рассмотрим два склона одинаковой протяжённости  $L_c = 50$  м с отличающимися следующими параметрами: склон 1:  $H_{OT} = 20$  м,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $E = 1000$  кПа и склон 2:  $H_{OT} = 10$  м,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $E = 700$  кПа.

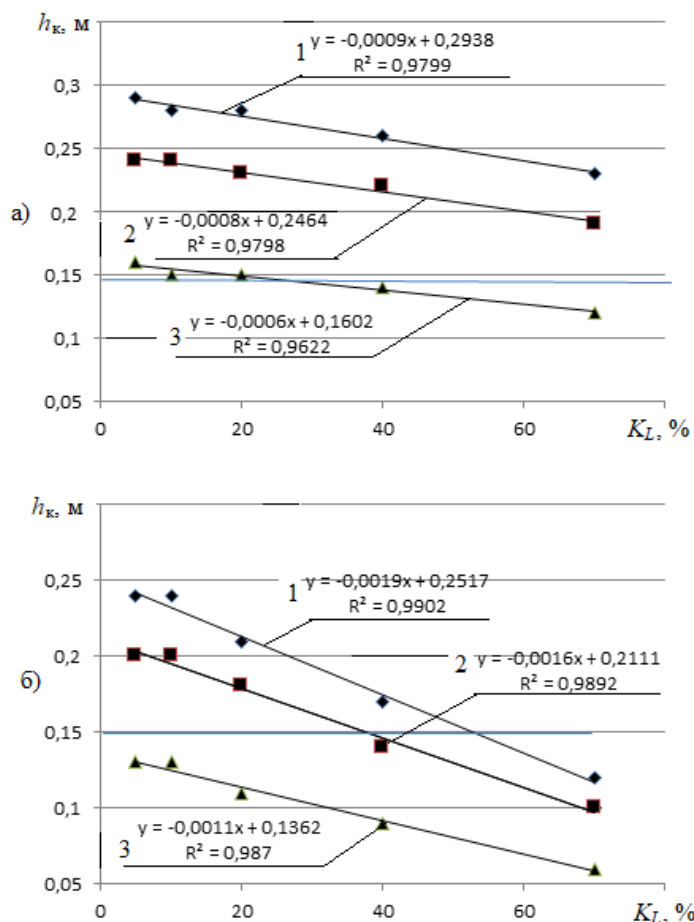
В таблице 1 для обоих склонов приведены данные  $h_k$ , м (в числителе — для склона 1, в знаменателе — для склона 2), позволяющие выполнить сравнительный анализ работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров) по критерию глубины колеи для двух типов машин — ЛМ-К и ЛМ-ПГХ при изменении их местоположения на поверхности склона ( $K_L = 5-70$  %).

Как следует из анализа полученных табличных данных, колёсные машины обеспечивают нормативную работоспособность трелёвочного волок (технологического коридора) только на втором склоне в его верхней части ( $K_L > 50$  %). Машины с ПГХ практически полностью соответствуют требованиям работоспособности трелёвочного волок при лесозаготовках на обоих склонах.

**Таблица 1.** Оценка работоспособности трелёвочного волока по глубине колеи

**Table 1.** Assessment of the skidding road performance by the depth of the track

$K_L, \%$	$W, \%$	Давление шин или гусениц на грунт $\sigma_o$ , кПа		
		ЛМ-К		ЛМ-ПГХ
		27	56	8
5	35,6/34,8	0,24/0,20	0,29/0,24	0,16/0,13
10	35,2/34,0	0,24/0,20	0,28/0,24	0,15/0,13
20	34,8/32,0	0,23/0,18	0,28/0,21	0,15/0,11
40	33,2/27,6	0,22/0,14	0,26/0,17	0,14/0,09
70	31,2/21,6	0,19/0,10	0,23/0,12	0,12/0,06



**Рисунок 6.** Влияние коэффициента  $K_L$  на глубину колеи  $h_k$ : а — для склона 1, б — для склона 2; 1 —  $\sigma_o = 56$  кПа, 2 —  $\sigma_o = 27$  кПа, 3 —  $\sigma_o = 8$  кПа

**Figure 6.** Influence of the  $K^L$  coefficient on the track depth  $h_k$ : (a) for slope 1, (b) for slope 2; 1 —  $\sigma_o = 56$  kPa, 2 —  $\sigma_o = 27$  kPa, 3 —  $\sigma_o = 8$  kPa

Эти выводы наглядно иллюстрируют данные рисунка 6: а) для склона 1 и б) для склона 2, где отражены результаты влияния величины  $K_L$ , % на глубину колеи  $h_k$ , м. Линии 1 и 2 соответствуют значениям давления на почвогрунт  $\sigma_o = 56$  кПа и 27 кПа для колёсных машин, а линия 3 — для машин с ПГХ при давлении на почвогрунт  $\sigma_o = 8$  кПа.

Из анализа рисунка 6 видно, что параметры первого склона полностью исключают возможность применения колёсной техники, тогда как условия движения лесной машины (трелёвки) на втором склоне позволяют её применение в срединной части склона при ограничении давления в шинах величиной 30 кПа. Для машин с ПГХ каких-либо ограничений не существует при работе на обоих склонах и любых их участках.

Обращает на себя внимание линейный характер снижения  $h_k$  по мере роста  $K_L$ , причём угол наклона прямых на рисунке 6б (склон 2), характеризующий скорость (динамику) этого снижения, практически вдвое превышает аналогичный показатель для склона 1.

Следовательно, каждый склон со своими геометрическими параметрами и фактическими данными о мощности оттаивающего слоя почвогрунта, границе зоны мерзлоты и физико-механических свойствах почвогрунта является в определённом смысле уникальным геотехническим объектом.

#### 4. Обсуждение и заключение

Многообразие параметров движения лесных машин (трелёвки) при прогнозах глубины колеи обуславливает необходимость классификации склонов по технологическим свойствам почвогрунтов и критерию работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров). Разработка такой классификации должна базироваться на актуальных гидрогеологических и геомеханических данных о состоянии почвогрунтов, слагающих массив склона.

Таким образом, выполненные исследования расширяют представления о технологических требованиях обеспечения работоспособности трелёвочных волоков (технологических коридоров) на склонах оттаивающих почвогрунтов, что способствует более эффективному использованию лесозаготовительной техники в сложных сезонно-климатических условиях.

*Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.*

## Список литературы

1. Распределение проходов по длине волока и расчёт рейсовых нагрузок трелёвочного трактора при движении по грунтам с низкой несущей способностью на примере хлыстовой технологии заготовки леса / М. А. Пискунов, Р. В. Воронов, В. Н. Васильев, А. М. Воронова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 77. С. 281—291.
2. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А. Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 2 (123). С. 114—117.
3. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А. Задача размещения волоков и погрузочных пунктов на лесосеке и вопросы применения оптимальных схем на практике // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2009. № 9 (103). С. 58—62.
4. Воронов Р. В., Воронова А. М., Пискунов М. А. Задача покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом и её приложение для оптимального проектирования схем волоков на лесосеках // Информатика и системы управления. 2012. № 1 (31). С. 56—64.
5. Исследование связи конусного индекса и модуля деформации различных типов грунтов / Е. Г. Хитров, А. М. Хахина, В. А. Лухминский, Д. П. Казаков // Resources and Technology. 2017. Т. 14, № 4. С. 1—16.
6. Хитров Е. Г., Фролов И. И. Подбор допустимого давления движителя колёсных лесных машин в зависимости от грунтовых условий // Сборник статей по материалам научно-технической конференции Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2018 года / Отв. ред. В. А. Соколова. СПб., 2019. С. 90—100.
7. Методика расчёта производительности форвардера в зависимости от почвенно-грунтовых условий / Е. В. Котенев, Е. Г. Хитров, Д. А. Ильюшенко, Л. А. Маслобоев // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVII Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Ю. М. Авдеев. Вологда, 2019. С. 196—199.
8. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines / E. Khitrov, A. Andronov, D. Iliushenko, E. Kotenev // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Soils; forest ecosystems. Sophia, 2019. С. 649—656.
9. Хитров Е. Г. Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 4. С. 76—93.
10. Хитров Е. Г., Котенев Е. В. Сравнение показателей взаимодействия с грунтом и проходимости колёсных и колёсно-гусеничных движителей // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 4. С. 1—24.
11. Агейкин Я. С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
12. Хитров Е. Г., Божбов В. Е., Ильюшенко Д. А. Расчёт несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колёсных движителей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122—126.
13. Оценка несущей способности мёрзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелёвочной системой / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 80—86.
14. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Гулько А. Е. Анализ методов расчёта параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке

- древесины // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8 (121). С. 92—96.
15. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1989. 270 с.
  16. Калабина М. В., Царапов М. Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. М., 2017. С. 542—546.
  17. Исследование процесса образования колеи и её устойчивость при работе лесных машин и трелёвочных систем на склонах массива оттаивающего грунта / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 2 (42). С. 121—132.
  18. Мирный А. Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы её количественной оценки // Инженерная геология. 2019. Т. 14, № 2. С. 34—43.
  19. Вариационный метод расчёта параметров взаимодействия трелёвочной системы с массивом мёрзлых и оттаивающих грунтов / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68—77.
  20. Шапиро В. Я., Григорьев И. В. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. № 2. С. 94—100.
  21. Добрецов Р. Ю., Дмитриев А. С., Григорьев И. В. Проблемы и перспективы использования в лесном комплексе машин с полугусеничным движителем // Вестник АГАТУ. 2022. № 4 (8). С. 95—105.

## References

1. Piskunov M. A., Voronov R. V., Vasiliev V. N., Voronova A. M. Distribution of passages along the length of the portage and calculation of the trip loads of a skidding tractor when moving on soils with low bearing capacity on the example of whiplash technology of logging. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 77, pp. 281—291. (In Russ.)
2. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A. Modeling of the fiber scheme by covering a hypernet with a weighted root tree. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2012, no. 2 (123), pp. 114—117. (In Russ.)
3. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A. The task of placing haulage and loading points on the cutting area and the issues of applying optimal schemes in practice. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2009, no. 9 (103), pp. 58—62. (In Russ.)
4. Voronov R. V., Voronova A. M., Piskunov M. A. The task of covering a hypernet with a weighted root tree and its application for optimal design of schemes of haulage in logging areas. *Informatics and control systems*, 2012, no. 1 (31), pp. 56—64. (In Russ.)
5. Khitrov E. G., Khakhina A. M., Luhminsky V. A., Kazakov D. P. Investigation of the relationship of the cone index and the modulus of deformation of various types of soils. *Resources and Technology*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 1—16. (In Russ.)
6. Khitrov E. G., Frolov I. I. Selection of the permissible pressure of the mover of wheeled forest machines depending on ground conditions. *Collection of articles based on the materials of the scientific and technical conference of the Institute of Technological Machines and Transport of Forests based on the results of research works in 2018*. Ed. by V. A. Sokolova. Saint Petersburg, 2019, pp. 90—100. (In Russ.)



7. Kotenev E. V., Khitrov E. G., Ilyushenko D. A., Masloboev L. A. Methodology for calculating forwarder productivity depending on soil and soil conditions. *Actual problems of forest complex development. Materials of the XVII International Scientific and Technical Conference*. Responsible editor Yu. M. Avdeev. Vologda, 2019, pp. 196—199. (In Russ.)
8. Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Soils; forest ecosystems*. Sophia, 2019, pp. 649—656.
9. Khitrov E. G. Analysis of the components of the depth of the track formed under the influence of the propulsion of the forest machine on the soil. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 76—93. (In Russ.)
10. Khitrov E. G., Kotenev E. V. Comparison of indicators of interaction with the ground and the patency of wheeled and wheeled-tracked propellers. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 1—24. (In Russ.)
11. Ageikin Ya. S. All-terrain wheeled and combined propellers. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 184 p. (In Russ.)
12. Khitrov E. G., Bozhbov V. E., Ilyushenko D. A. Calculation of the bearing capacity of forest soils under the influence of wheel movers. *The system. Methods. Technologies*, 2014, no. 4 (24), pp. 122—126. (In Russ.)
13. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Assessment of the bearing capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with the skidding system. *The system. Methods. Technologies*, 2019, no. 2 (42), pp. 80—86. (In Russ.)
14. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Gulko A. E. Analysis of methods for calculating parameters and substantiation of a mathematical model of bark destruction during group debarking of wood. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 8 (121), pp. 92—96. (In Russ.)
15. Bulychev N. S. *Mechanics of underground structures in examples and tasks: A textbook for universities*. Moscow, Nedra, 1989. 270 p. (In Russ.)
16. 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*. Moscow, 2017, pp. 542—546. (In Russ.)
17. 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 machines and skidding systems on the slopes of the thawing soil massif. *Forestry journal*, 2021, vol. 11, no. 2 (42), pp. 121—132. (In Russ.)
18. Mirny A. Yu. Studies of dilatancy in dispersed soils and methods of its quantitative assessment. *Engineering geology*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 34—43. (In Russ.)
19. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Variational method for calculating the parameters of the interaction of a skidding system with an array of frozen and thawing soils. *The system. Methods. Technologies*, 2019, no. 1 (41), pp. 68—77. (In Russ.)
20. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V. Deformation and cyclic compaction of soil between ground hooks of large-sized forest tires. *Technique and technology*, 2006, no. 2, pp. 94—100. (In Russ.)
21. Dobretsov R. Yu., Dmitriev A. S., Grigorev I. V. Problems and prospects of using machines with a half-track propulsion in the forest complex. *Bulletin of AGATU*, 2022, no. 4 (8), pp. 95—105. (In Russ.)