

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6683

Статья

Классификация склонов оттаивающих почвогрунтов по геотехническим условиям их взаимодействия с движителями лесных машин

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@inboxl.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

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

Новиков Марат Семёнович

аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), novikov-ms@yakutskenergo.ru

Григорьева Ольга Ивановна

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

Получена: 5 января 2023 / Принята: 21 февраля 2023 / Опубликовано: 26 февраля 2023

Аннотация: Постепенное истощение запасов спелых и перестойных лесов в доступных и удобных для освоения местностях приводит к необходимости освоения менее доступных лесных массивов. Большая часть лесного фонда Российской Федерации находится в зоне вечной мерзлоты. Леса криолитозоны,

как и леса на склонах гор и сопок, считаются одними из наиболее ранимых в экологическом плане. Значительная часть лесов криолитозоны находится на неудобных (по условиям рельефа) местностях — склонах гор и сопок, а также в условиях вечной мерзлоты, что относит их к возможно самым уязвимым в экологическом плане. В то же время необходимо эффективное освоение таких лесов. Исходя из особой сложности планирования работ в рассматриваемых условиях, как с точки зрения эксплуатационной, так и экологической эффективности, необходима научно обоснованная методическая поддержка принятия решений по выбору машин и оборудования и схеме освоения конкретной лесосеки. В статье представлено обоснование классификации прочности почвогрунтов и их соответствия геотехническим условиям лесозаготовок на склонах оттаивающих почвогрунтов, что позволяет оценить работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) и его эффективность при использовании различных лесных машин и трелёвочных систем.

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

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6683

Article

Classification of slopes with thawing soils according to the geotechnical conditions of their interaction with the forest machine movers

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

Marat Novikov

Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), novikov-ms@yakutskenergo.ru

Olga Grigoreva

Ph. D. student, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru

Received: 5 January 2023 / Accepted: 21 February 2023 / Published: 26 February 2023

Abstract: Gradual depletion of stocks of ripe and overgrown forests in accessible forests necessitates the development of less accessible woodlands. Most of the forest fund in the Russian Federation is located in permafrost zone. The forests of the cryolithic zone, as well as the forests on the slopes of mountains and hills, are considered the most vulnerable ones in ecological terms. A significant part of the forests in the cryolithic zone is located on inconvenient terrain that is on the slopes of mountains and hills. But effective forest exploitation of such forests is important. Based

on the particular complexity of work planning in the conditions under consideration, both from the point of view of operational and environmental efficiency, scientifically based methodological support for decision-making process is needed including the choice of machinery and equipment and the scheme of a specific cutting area exploitation. The article substantiates the classification of soil strength and its compliance with geotechnical conditions of logging on the slopes with thawing soils. The classification allows us to assess the operability of the skidding track (technological corridor) and its effectiveness when using various forest machines and skidding systems.

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

1. Введение

Эффективное транспортное освоение лесного фонда — лесных массивов, отдельных лесосек было и остаётся одной из наиболее актуальных проблем лесного комплекса Российской Федерации [1—4]. При планировании операций лесозаготовительного производства необходимо учитывать не только эффекты от работ, связанных с заготовкой и транспортировкой древесины, но и последующие временные и материальные затраты, касающиеся лесовосстановления [5—8]. Весьма значительное влияние на стоимость и эффективность лесовосстановительных работ оказывают параметры и показатели работы лесных машин и, особенно, трелёвочных систем на их базе, используемых на лесосечных работах [9], [10]. Необходимо учитывать, что неоптимально принятые решения при планировании лесосечных работ могут привести к кратному росту затрат на лесовосстановление, которые, соответственно, существенно снизят прибыль при заготовке древесины [11—13].

Взаимодействие лесной машины или трелёвочной системы с массивом оттаивающего грунта при лесозаготовительных работах на склонах гор и сопок в непосредственной близости от водонепроницаемой границы с зоной мерзлоты является сложным геотехническим процессом, характеризующимся многообразием случайных исходных данных и параметров [14]. К последним следует отнести, в первую очередь, геомеханическое состояние краевой части массива почвогрунта — его устойчивость и технологические свойства, под которыми будем понимать его прочностные свойства, с учётом наличия мёрзлых, оттаивающих и оттаявших участков, слагающих массив.

Параметры склона — его протяжённость, угол наклона плоскости к линии горизонта, местоположение зоны мерзлоты, температура и другие факторы влияют на прочность почвогрунта и, как следствие, работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) в процессе воздействия на него лесной машины или трелёвочной системы.

2. Материалы и методы

Рассматривая указанный процесс взаимодействия, следует отметить, что одним из показателей сопротивления почвогрунта статическим разрушающим нагрузкам является величина его прочности при одноосном сжатии R_c (кПа), поскольку величина R_c характеризует способность почвогрунта сопротивляться вертикальным сжимающим нагрузкам и её определение происходит при неограниченном боковом расширении, вплоть до момента предельного сопротивления сдвигу. Для условий взаимодействия на склонах, когда трелёвочный волок (технологический коридор) расположен на наклонной плоскости, учёт механизма сдвига почвогрунта является необходимым.

Показатель R_c является универсальной характеристикой прочности при сдвиге не только в процессе разрушения почвогрунтов, но и других сплошных сред, например, краевой части массива коры [15].

Основываясь на анализе огибающей кругов Мора в процессе формирования паспорта прочности Кулона, определение величины R_c оценивают в следующем виде [16]:

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

где C — величина сцепления грунта, кПа, φ — угол внутреннего трения, °.

Как следует из соотношения (1), величина R_c является функцией двух переменных прочности почвогрунта C и φ , которые зависят от изменения мощности H_{OT} слоя массива оттаивающего почвогрунта на различных участках склона и его влажности (W , %).

Следуя результатам исследования [17], отметим, что, приближаясь к вершине склона, влажность W почвогрунта достигает минимальных значений и стремится к нижнему пределу пластичности, или величине на границе раскатывания (W_p). Максимальные значения W установлены у основания склона, приближаясь к верхнему пределу пластичности, или величине на границе текучести (W_T). Введём показатель относительной влажности почвогрунта $K_W = \frac{W}{W_T}$.

Опытные данные [17] для четырёх видов оттаивающих грунтов — супеси лёгкой, песка пылеватого, суглинка и супеси тяжёлой при изменении показателя K_W в широком диапазоне от 0,5 до 0,9 показали, что наибольшее снижение прочностных характеристик C и φ с ростом K_W отмечается для суглинка и супеси тяжёлой. Величины сцепления для них снижаются с 45 до 5—6 кПа (в 7,5—9 раз), углы внутреннего трения — с 32 до 10° (в 3,2 раза). Для супеси лёгкой и песка аналогичные снижения составляют: для C — с 15—25 до 8—9 кПа (в 1,8—2,8 раза) и для φ — с 37 до 32—33° (в 1,1—1,2 раза). Основываясь на соотношении (1), можно сделать вывод о том, что наибольшие снижения показателя прочности R_c с ростом влажности W на различных участках склона будут у суглинка и супеси тяжёлой.

Остановимся на выборе массива оттаивающего почвогрунта, сложенного, в основном, суглинком. Статистическая обработка данных [17] с коэффициентом детерминации не ниже 0,965 позволила получить зависимости C , кПа и φ от K_W :

$$C = 4,8924 K_W^{-3,39}, \quad \varphi = 8,389 K_W^{-1,994}. \quad (2)$$

Пусть процесс взаимодействия лесной машины (трелёвочной системы на её базе) с краевой частью массива, содержащего слой оттаивающего почвогрунта мощностью H_{OT} , осуществляется на склоне протяжённостью $L_c = 50$ м, с углом наклона α поверхности к линии горизонта и место контакта удалено на расстояние L от основания склона. Тогда безразмерный коэффициент $K_L = L/L_c$, % будет характеризовать меру относительного удаления контакта взаимодействия от основания склона.

Как установлено в публикации [18], безразмерный параметр K_W связан с параметрами склона соотношением

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin \alpha}{H_{OT}}, \quad (3)$$

что позволяет с помощью коэффициента относительной влажности K_W учитывать влияние параметров склона L , α и H_{OT} на показатель прочности почвогрунта.

На рисунке 1 представлена зависимость R_c от K_W . Анализ гиперболической кривой $R_c(K_W)$ показывает, что при абсциссе $K_W = 0,70—0,75$ наблюдается сопряжение ниспадающей и асимптотической ветвей полученной гиперболы, что означает существование предела насыщения почвогрунта влагой, после которого его прочность снижается слабо.

В механике грунтов отмечают влияние эффекта дилатансии на изменение прочности краевой части массива в процессе его статического нагружения [19]. Поскольку давление на грунт происходит в ограниченном объёме, дилатансия вызывает в массиве рост средних напряжений, что обуславливает увеличение сопротивления сдвигу и повышение несущей способности грунта.

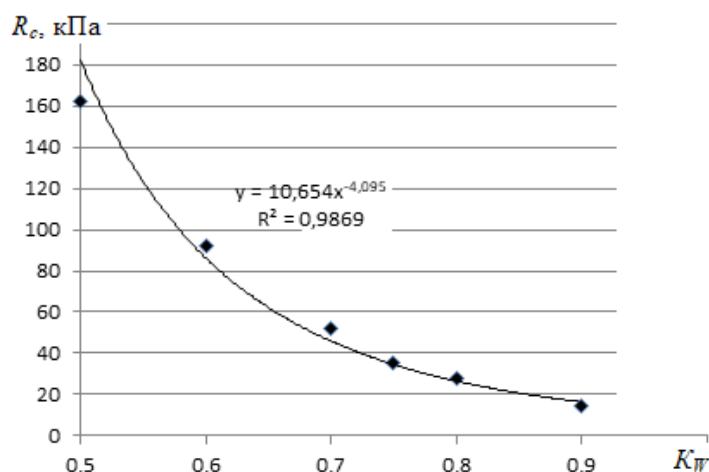


Рисунок 1. Зависимость R_c от K_W

Figure 1. Dependence of R_c on K_W

Угол дилатансии ψ способствует увеличению суммарного угла внутреннего трения φ и для их связи в работе [19] предложена формула

$$\sin \psi = \frac{\sin \varphi - \sin \varphi_{кр}}{1 - \sin \varphi \sin \varphi_{кр}}, \quad (4)$$

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

Оценить показатель $\varphi_{кр}$ для суглинка можно с помощью соотношения (2) при $K_W = 1$, т. е. по достижении показателя влажности W значения предела пластичности W_T . Таким образом, для суглинка принимаем $\varphi_{кр} = 8,389^\circ$.

На рисунке 2, основываясь на соотношениях (2)—(4), представлена зависимость угла дилатансии ψ , $^\circ$ от коэффициента K_W .

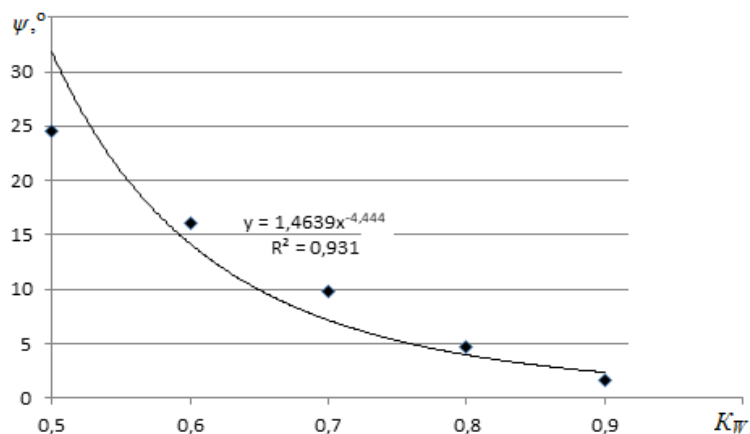


Рисунок 2. Зависимость угла дилатансии ψ от коэффициента K_{π}

Figure 2. The dependence of the dilatancy angle ψ on the coefficient K_{π}

Как видим, в диапазоне $K_{\pi} < 0,7$ ($W < 28\%$ при $W_T = 40\%$) наблюдается более чем трёхкратное снижение угла ψ , после чего имеет место дальнейшее асимптотическое снижение.

Оценим влияние угла дилатансии на изменение показателя прочности почвогрунта на одноосное сжатие (рисунок 3), на котором отложены: по оси ординат — R_c , кПа, по оси абсцисс — K_{π} .

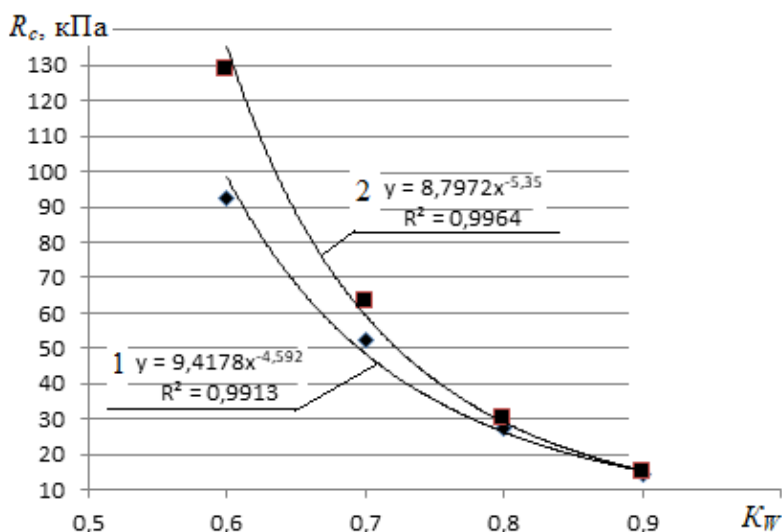


Рисунок 3. Зависимость R_c от K_{π} : 1 — без учёта угла ψ ; 2 — с учётом угла ψ

Figure 3. Dependence of R_c on K_{π} : 1 — without taking into account the angle ψ ; 2 — taking into account the angle ψ

Существенное повышение прочности грунта (на 40—45 %) за счёт учёта эффекта дилатансии имеет место в узком диапазоне значений $K_{\pi} = 0,60—0,65$, т. е. суглинков

с влажностью $W \approx 25\%$, при большей влажности можно ограничиться только значениями угла внутреннего трения φ .

Обобщая полученные результаты для других видов грунтов, можно заключить, что грунты, у которых имеет место существенное снижение угла внутреннего трения φ с ростом влажности W , учёт угла дилатансии ψ при оценке прочности почвогрунтов умеренной влажности (W не более 25 %) представляется целесообразным.

3. Результаты

Если обратиться к данным рисунка 3 в контексте оценки работоспособности трелёвочного волока (технологического коридора) на склонах оттаивающих почвогрунтов, влажность которых составляет $W > 25\%$ ($K_w \geq 0,63$), видно, что диапазон изменения величины R_c составляет 14—90 кПа. Давление на почвогрунт q , которое оказывают через шины колёсные лесные машины (ЛМ-К), составляет 27—84 кПа. Применение лесных машин с полугусеничным ходом (ЛМ-ПГХ) позволяет снизить величину q до 8—10 кПа. Таким образом, можно заключить, что диапазоны изменения параметров внешнего давления q и прочности почвогрунта R_c практически совпадают. Этот вывод позволяет подойти к проблеме классификация склонов оттаивающих почвогрунтов по геотехническим условиям их взаимодействия с лесной машиной или трелёвочной системой на основе оценки допустимых вариаций параметра R_c .

Применим метод статистических испытаний [20] к вариационному определению параметров μ_i прочности почвогрунта: $\mu_1 = C$, $\mu_2 = \varphi$ и $\mu_3 = R_c$. Обозначим математические ожидания этих параметров соответственно $M(C)$, $M(\varphi)$ и $M(R_c)$. Программа вырабатывает 20 случайных чисел μ_i ($i = 1 \dots 20$), нормально распределённых в интервале $(-1, 1)$ с нулевым математическим ожиданием, которые подставляются в систему формул общего вида:

$$C_i = M(C) * (1 + \eta \mu_i), \varphi_i = M(\varphi) * (1 + \eta \mu_i), R_{ci} = M(R_c) * (1 + \eta \mu_i), \quad (5)$$

где η — коэффициент вариации наиболее изменчивого параметра.

Статистическая обработка выборок значений C_i , φ_i и R_{ci} позволяет определить коэффициенты их вариаций — соответственно η_i .

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициентов вариаций параметров прочности суглинка η_i (линии 1, 2, 3 соответственно) от коэффициента вариации η . Линейная зависимость 3, характеризующая изменчивость предела прочности почвогрунта на одноосное сжатие R_c , позволяет, задавшись предельным значением величины $\eta = 30\%$ (третий класс точности инженерных расчётов), получить значение $\eta_3 = 22\%$. Поскольку умножение математического ожидания на коэффициент вариации определяет «одну сигму σ » — среднеквадратическое отклонение, то полный $2\sigma = 44\%$ -й размах одной шкалы изменения R_c приводит к следующей системе классификации (таблица 1): шесть категорий почвогрунтов — от очень крепких до очень слабых, по аналогии с классификацией почвенно-грунтовых условий.

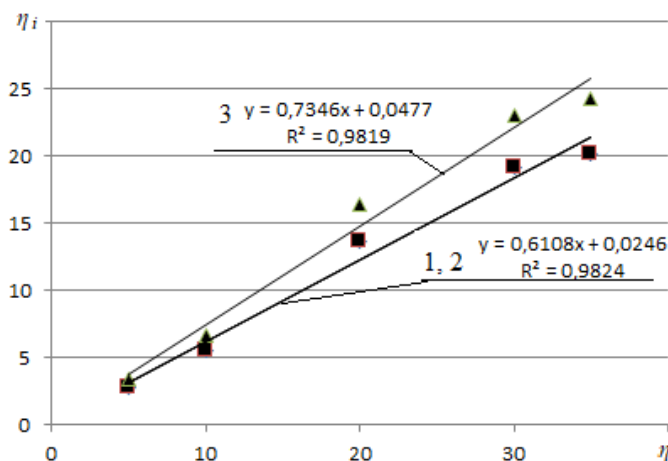


Рисунок 4. Взаимосвязь между коэффициентами вариаций параметров прочности почвогрунта

Figure 4. Relationship between coefficients of variations of soil strength parameters

Таблица 1. Классификация почвогрунтов по их прочности на одноосное сжатие

Table 1. Classification of soils by their uniaxial compressive strength

Категория	Характеристика почвогрунта	Диапазон R_c , кПа
I	Очень крепкий	> 90
II	Крепкий	63—90
III	Средний	43—63
IV	Весьма средний	30—43
V	Слабый	21—30
VI	Очень слабый	< 21

Необходимо отметить, что данные таблицы 1 следует отнести к однократному воздействию нагрузки на почвогрунт. При циклическом взаимодействии шины (или гусеницы) с краевой частью массива механика разрушения учитывает остаточные деформации [21]. Основываясь на соотношении (3) и данных рисунка 1, установлено влияние на показатель прочности R_c , кПа, следующих параметров склона — удаление K_L , %, контакта взаимодействия от основания склона, угла его наклона α , °, и мощности H_{OT} , м (рисунок 5).

Обратные функции полученных корреляционных зависимостей представлены на рисунке 6, где по оси абсцисс отложены значения R_c , кПа, а на единой оси ординат — функции: 1 — относительного удаления K_L , %, 2 — угла наклона α , °; 3 — мощности оттаивающего слоя H_{OT} , м. Основываясь на данных рисунка 6 и таблицы 1, установлено соответствие параметров склона шкале категорий прочности оттаивающего почвогрунта, что позволяет обосновать классификацию геотехнических условий работ (таблица 2).

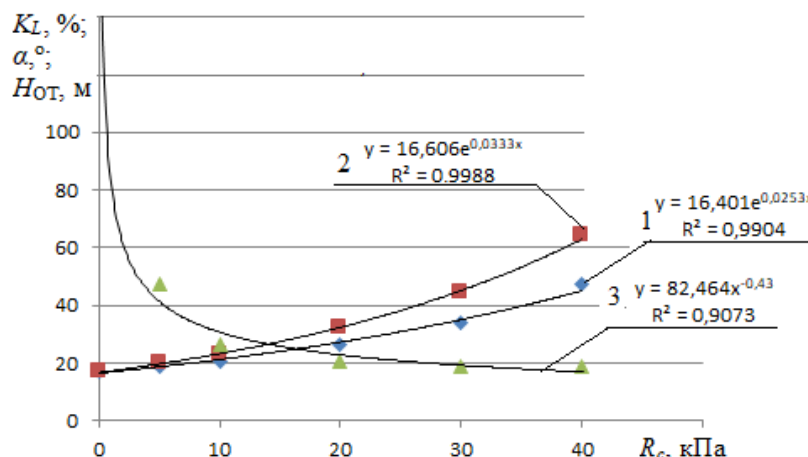


Рисунок 5. Зависимости прочности почвогрунта от параметров склона

Figure 5. Dependences of soil strength on slope parameters

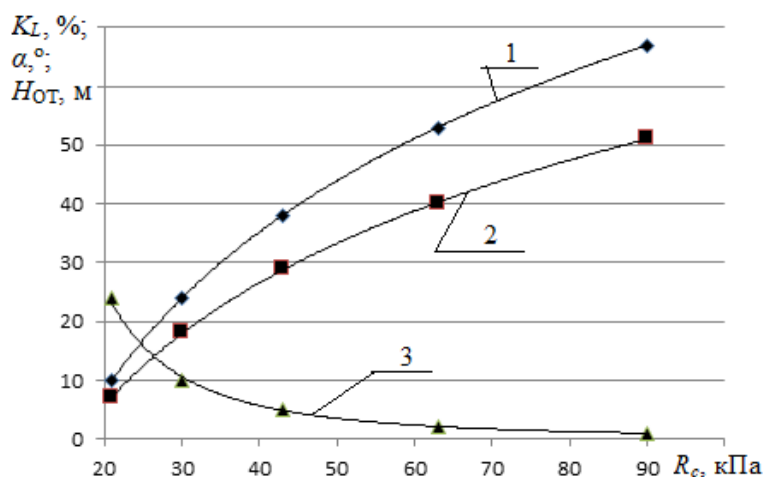


Рисунок 6. Обратные функции зависимостей параметров склона от прочности почвогрунта

Figure 6. Inverse functions of dependence of slope parameters on soil strength

Как следует из анализа данных таблицы 2, сочетание параметров геотехнических условий работы лесных машин, когда лесная машина (трелёвочная система на её базе) удалена от основания склона не более чем на 10 % его общей длины, при этом склон достаточно пологий ($\alpha < 7^\circ$) и трелёвочный волок (технологический коридор) близко расположен к мощному ($H_{OT} > 24$ м) слою оттаивающего почвогрунта, равносильно тому, что почвогрунт следует отнести к категории VI, классифицировать его как очень слабый, а сами условия работ также относятся к категории VI — как наиболее сложные.

Таблица 2. Классификация геотехнических условий при работе на склонах оттаивающих почвогрунтов

Table 2. Classification of geotechnical conditions when operating on the slopes with thawing soils

Категория условий	Диапазон параметров склона		
	K_L , %	α , °	$H_{от}$, м
I	> 67	> 51	< 1
II	53—67	40—51	1—2
III	38—53	29—40	2—5
IV	24—38	18—29	5—10
V	10—24	7—18	10—24
VI	< 10	< 7	> 24

И наоборот, удаление машины на величину $K_L > 67$ % от основания крутого ($\alpha > 51$ °) склона, когда трелёвочный волок (технологический коридор) удалён от маломощного ($H_{от} < 1$ м) слоя оттаивающего почвогрунта, следует рассматривать как работу на очень крепких почвогрунтах в наиболее благоприятных условиях I категории сложности.

Геотехнические условия, относящиеся к категории VI, практически исключают возможность применения колёсных лесных машин даже при минимальных значениях давления шин на почвогрунт, равных 27 кПа, которые можно ограничено рекомендовать для условий (почвогрунтов) II категории. В этом случае целесообразно переходить на лесные машины с гусеничным или полугусеничным ходом. Для геотехнических условий I—III категорий, при которых технологическое состояние прочности позволяет отнести почвогрунты к средним и крепким, снимаются какие-либо ограничения на применение колёсных лесных машин с давлением на почвогрунт от 30 до 90 кПа.

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, разработанная классификация прочности почвогрунтов и их соответствия геотехническим условиям лесозаготовок на склонах оттаивающих почвогрунтов позволяет оценить работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) и его эффективность при использовании различных лесных машин и трелёвочных систем.

Работа выполнена в рамках деятельности 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. *Швецова В. В.* Современные программные комплексы для повышения эффективности сухопутного транспорта леса // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 136—139.
2. *Мохирев А. П., Горяева Е. В., Исламова М. Т.* Прогнозирование периода эксплуатации сезонных автомобильных дорог зимнего действия // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф., посвящённой 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 50—54.
3. *Медведев С. О., Мохирев А. П.* Отдельные аспекты развития транспортной инфраструктуры в лесной отрасли // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф., посвящённой 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 46—49.
4. *Лышко А. С., Медведев С. О., Мохирев А. П.* Обоснование транспортно-логистических маршрутов на территории Арктики и крайнего севера Красноярского края // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2021. С. 79—82.
5. *Швецова В. В.* Перспективные направления совершенствования организации лесозаготовительного производства // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 99—103.
6. *Швецова В. В.* Графическое представление эффективности комплексов лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Седьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2021. С. 201—203.
7. *Швецова В. В.* Оценка экологической безопасности систем машин лесозаготовительного производства // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 423.
8. *Швецова В. В.* Эффективность работы систем машин лесозаготовительного производства // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 17—21.
9. *Швецова В. В.* Нестандартные виды первичного транспорта леса // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2021. С. 317—320.
10. *Швецова В. В., Вернер Н. Н.* Современные тенденции технического развития лесозаготовительного производства в России // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 40-2. С. 40—42.
11. *Рунова Е. М., Власова С. А.* Некоторые особенности компенсационного лесовосстановления в Иркутской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 58. С. 46—50.
12. *Рунова Е. М., Савченкова В. А.* Анализ характера лесовосстановления вырубок на примере Усть-Илимского района // Естественные и инженерные науки — развитию регионов: Материалы межрегион. научно-техн. конф. Братск, 2003. С. 196—197.
13. *Рунова Е. М., Власова С. А.* Исследование лесовосстановительных процессов в Иркутской области в связи с требованиями компенсационного лесовосстановления // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 58. С. 43—46.

14. 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.
15. 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.
16. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1989. 270 с.
17. 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.
18. 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.
19. Мирный А. Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы её количественной оценки // Инженерная геология. 2019. Т. 14, № 2. С. 34—43.
20. 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.
21. Шапиро В. Я. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. № 2. С. 94—100.

References

1. Shvetsova V. V. Modern software systems for improving the efficiency of land transport of forests. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development. Materials of the All-Russian Scientific and practical conference.* Ed. Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 136—139. (In Russ.)
2. Mohirev A. P., Goryaeva E. V., Islamova M. T. Forecasting the period of operation of seasonal winter roads. *Current issues of construction: a look into the future. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical conference dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Institute of Civil Engineering.* Krasnoyarsk, 2022, pp. 50—54. (In Russ.)
3. Medvedev S. O., Mohirev A. P. Certain aspects of the development of transport infrastructure in the forest industry. *Actual issues of construction: a look into the future. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical conference dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Institute of Civil Engineering.* Krasnoyarsk, 2022, pp. 46—49. (In Russ.)
4. Lyshko A. S., Medvedev S. O., Mohirev A. P. Substantiation of transport and logistics routes in the Arctic and the far north of the Krasnoyarsk Territory. *Innovations in the chemical-forestry complex: trends and prospects of development. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference.* Krasnoyarsk, 2021, pp. 79—82. (In Russ.)
5. Shvetsova V. V. Promising directions for improving the organization of logging production. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development.*

- Materials of the All-Russian Scientific and practical conference*. Ed. Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 99—103. (In Russ.)
6. Shvetsova V. V. Graphical representation of the effectiveness of forest machinery complexes. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Seventh All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2021, pp. 201—203. (In Russ.)
 7. Shvetsova V. V. Assessment of ecological safety of logging production machinery systems. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, p. 423. (In Russ.)
 8. Shvetsova V. V. Efficiency of work of systems of machines of logging production. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 57, pp. 17—21. (In Russ.)
 9. Shvetsova V. V. Non-standard types of primary forest transport. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2021, pp. 317—320. (In Russ.)
 10. Shvetsova V. V., Werner N. N. Modern trends in the technical development of logging production in Russia. *Trends in the development of science and education*, 2018, no. 40-2, pp. 40—42. (In Russ.)
 11. Runova E. M., Vlasova S. A. Some features of compensatory reforestation in the Irkutsk region. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 58, pp. 46—50. (In Russ.)
 12. Runova E. M., Savchenkova V. A. Analysis of the nature of reforestation of cuttings on the example of Ust-Ilimsky district. *Natural and engineering sciences — development of regions. Materials of the interregional scientific and technical conference*. Bratsk, 2003, pp. 196—197. (In Russ.)
 13. Runova E. M., Vlasova S. A. Research of reforestation processes in the Irkutsk region in connection with the requirements of compensatory reforestation. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 58, pp. 43—46. (In Russ.)
 14. 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.)
 15. 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.)
 16. Bulychev N. S. *Mechanics of underground structures in examples and tasks: A textbook for universities*. Moscow, Nedra, 1989. 270 p. (In Russ.)
 17. Kalabina M. V., Tsarapov M. N. Strength properties of thawing soils. *In the collection: 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.)
 18. 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.)
 19. 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.)
 20. 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.)

21. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V. Deformation and cyclic compaction of the soil between the ground hooks of large-sized forest tires. *Technique and technology*, 2006, no. 2, pp. 94—100. (In Russ.)

© Каляшов В. А., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Новиков М. С., Григорьева О. И., 2023