СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 540:631.4 DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-68-77

Вариационный метод расчета параметров взаимодействия трелевочной системы с массивом мерзлых и оттаивающих почвогрунтов

С.Е. Рудов [1a], В.Я. Шапиро[2b], И.В. Григорьев[3c], О.А. Куницкая[3d], О.И. Григорьева[2e]

[1]Военная академия связи им. С.М. Буденного, Тихорецкий пр. 3, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им.С.М. Кирова, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия
[3]Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Сергеляхское шоссе 3, Якутск, Республика Саха, Россия
[a]89213093250@mail.ru,[b] shapiro54vlad@mail.ru, [c] silver73@inbox.ru, [d]ola.ola07@mail.ru, [e]grigoreva_o@list.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-9900-0929, [b]https://orcid.org/0000-0002-6344-1239,
[c]https://orcid.org/0000-0002-5574-1725, [d]https://orcid.org/0000-0001-8542-9380,
[e]https://orcid.org/0000-0001-5937-0813
Статья поступила 30.12.2018, принята 28.01.2019

Заготовка древесины в лесах криолитозоны становится все более актуальной для Российской Федерации, что связано с истощением доступных запасов спелых эксплуатационных лесов в Южной и Центральной Сибири, Бурятии и Хабаровском крае, при одновременном развитии деревообрабатывающих предприятий в Дальневосточном федеральном округе. Эксплуатация современных трелевочных систем в условиях мерзлых почвогрунтов характеризуется высокой изменчивостью физико-механических свойств последних даже в ограниченных пределах отдельной лесосеки. Одной из основных причин такого положения является существенная зависимость несущей способности почвогрунта от факторов температуры и влажности. Тенденции последних лет, связанные с повышением значений температуры в межсезонье, сокращением периода устойчивых отрицательных температур и традиционно высокими показателями температуры в летний период работ обусловили увеличение глубины зоны оттаивания почвогрунта, повышение влажности на больших глубинах и, как следствие, увеличение глубины колеи при трелевке лесоматериалов в процессе многократных проходов трелевочной системы. Эти обстоятельства в сочетании с необходимостью минимизации техногенной нагрузки на окружающую среду выдвигают в разряд наиболее актуальныхпроблему оптимизации числа проходов трелевочной системы по одному и тому же волоку. Особые условия эксплуатации трелевочных систем имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах. Предложенный в статье вариационный подход к определению параметров процесса образования колеи при использовании различных трелевочных систем позволяет классифицировать оттаивающие почвогрунты на отдельных участках трассы по критерию их несущей способности сопротивляться разрушающему действию статических нагрузок. Полученные результаты создают предпосылки для повышения надежности прогноза проектных показателей и условий эффективной эксплуатации современных форвардеров при работе в лесах криолитозоны.

Ключевые слова: мерзлые почвогрунты; лесозаготовки; лесные машины; трелевочные системы; уплотнение и деформация почвогрунтов.

Variational method for calculating the parameters of the interaction of the logging system with an array of frozen and thawing soils

S.E. Rudov[1a], V.Ya. Shapiro[2b], I.V. Grigorjev[3c], O.A. Kunitskaya[3d], O.I. Grigorjeva[2e]

[1]Military Academy of Communication under name of S.M. Budenny; 3, Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, Russia
[2]St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia
[3]Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia
[a]89213093250@mail.ru,[b] shapiro54vlad@mail.ru, [c] silver73@inbox.ru, [d]ola.ola07@mail.ru, [e]grigoreva_o@list.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-9900-0929, [b]https://orcid.org/0000-0002-6344-1239,
[c]https://orcid.org/0000-0002-5574-1725, [d]https://orcid.org/0000-0001-8542-9380,
[e]https://orcid.org/0000-0001-5937-0813
Received 30.12.18, accepted 28.01.2019

Wood harvesting in cryolithozone forests is becoming increasingly relevant for the Russian Federation, which is associated with the depletion of the available reserves of ripe production forests in Southern and Central Siberia, Buryatia and the Khabarovsk Territory, with the simultaneous development of woodworking enterprises in the Far Eastern Federal District. The operation of modern skidding systems in frozen soil conditions is characterized by high variability of the physical and mechanical properties of the latter, even within the limited limits of a separate cutting area. One of the main reasons for this is the substantial dependence of the bearing capacity of the soil on temperature and humidity factors. The trends of recent years associated with an increase in temperature values in the off-season, a reduction in the period of stable negative temperatures and traditionally high temperature indicators in the summer period of work have led to an increase in the depth of the soil thawing zone, an increase in humidity at great depths and, as a consequence, an increase in the depth of the track when logging timber the process of multiple passes of the logging system. These circumstances, combined with the need to minimize the technogenic load on the environment, push into the discharge the most pressing problem of optimizing the number of passes of the logging system along the same fiber. Special conditions for the operation of logging systems occur in the production of logging operations on frozen and thawing soils. The variational approach proposed in the article for determining the parameters of the gauge formation process using different skidding systems makes it possible to classify the thawing soil on separate sections of the route by the criterion of their bearing capacity to resist the destructive effect of static loads. The obtained results create prerequisites for improving the reliability of forecasting design parameters and conditions for the efficient operation of modern forwarders when working in cryolithozone forests.

Keywords: frozen soils; logging; forest machines; skidding systems; soil compaction; soil deformation.

Введение

Результаты исследований [1] свидетельствуют о том, что даже однократный проход трелевочной системы при невысоких (не более 47 кПа) давлениях на почвогрунт приводит к отдельным разрывам сплошного массива, двукратный проход разрушает уже до 30%, а трехкратный —до 80% объема верхнего плодородного слоя почвогрунта.

Особые условия эксплуатации трелевочных систем имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах.

В первом случае в массиве почвогрунта в достаточно большом объеме присутствует лед, оказывающий существенное влияние на повышение несущей способности почвогрунта под действием начальной вертикальной нагрузки (q_o, *кПа*) трелевочной системы.

Во втором случае при оттаивании мерзлого почвогрунта происходит перенасыщение его водой, в связи с чем ослабевают природные связи между твердыми частицами, и физико-механические свойства почвогрунта утрачивают исходные значения. Причем концентрация влаги на границе с зоной мерзлоты приводит к некоторому снижению значений угла внутреннего трения φ и существенно, а в ряде случаев— кратно, снижает величину сцепления почвогрунта *С* [2], что снижает его несущую способность, в первую очередь, способность сопротивляться сдвигу, и приводит к образованию более глубокой колеи. В этом, на наш взгляд, заключается принципиальное отличие оттаивающего почвогрунта от талого.

Требования по ограничению грузоподъемности форвардера и снижению усилий сопротивления его движению обусловливают максимально допустимую глубину колеи ($h_к$) после первого прохода в пределах $h_к \leq 0{,}10$ м.

Если в мерзлых почвогрунтах это ограничение в большинстве случаев выполняется, то в оттаивающих почвогрунтах наблюдается существенное его превышение с достижением значений $h_к$=0,25–0,3 м, а в некоторых случаях —до 0,4–0,5 м и более, до достижения величины клиренса форвардера.

Цель работы: разработать вариационный подход к определению параметров процесса образования колеи при использовании различных трелевочных систем, позволяющий классифицировать оттаивающие почвогрунты на отдельных участках трассы по критерию их несущей способности сопротивляться разрушающему действию статических нагрузок.

*Материалы и методы исследования.*Использованы справочные данные о физико-механических свойствах мерзлотных грунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Использованы методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования. Трелевочная система образует колею в непосредственной зоне контакта колеса с почвогрунтом. Чем больше размер этой зоны, тем большие усилия передаются к почвогрунту для реализации необходимой тяги.

Горизонтальное усилие подачи можно использовать для того, чтобы преодолеть усилие сопротивления движению и реализовать необходимую тягу.

Таким образом, в качестве оперативного критерия оценки несущей способности почвогрунта и эффективности движения по нему форвардера можно использовать, при прочих равных условиях, величину $h_к$. Очевидно, что эта величина является функцией многих переменных и параметров и может быть определена в ходе установления закономерностей разрушения массива почвогрунта под действием статических нагрузок.

Максимальная тяга и обусловленная ей сила поверхностного трения оказывают влияние на величину сопротивления почвогрунта сдвигу *τ*, которая зависит от действующей нормальной (вертикальной) нагрузки *q*, величин *С* и φ и, в соответствии с обобщенным уравнением Кулона– Мора:

$$T = C + q\,\mathrm{tg}\varphi. \qquad (1)$$

Будем считать, что глубина зоны оттаивания равна H (*м*). За ее пределами мерзлый почвогрунт представляет собой весьма твердое водонепроницаемое основание. В зависимости от природно-климатических условий произрастания лесов, величина H не превышает 1 м для высоких широт (64–67°с.ш.) и может увеличиваться по мере снижения широты до 2 м и более. Для изучения процесса образования колеи можно ограничить $H \leq 1$ м.

Очевидно, что физико-механические почвогрунты в пределах и за пределами глубины H существенно отличаются друг от друга. Интегральной характеристикой этого отличия может служить величина модуля общей деформации (E, *МПа*).

В работе [3] для трех категорий грунтов в достаточно широком диапазоне изменений их физико-механических свойств получены корреляционные соотношения между параметрами C, φ, H и E:

$$C=10{,}774E^{0{,}7737};\quad \varphi=13{,}669E^{0{,}1818};\quad H=0{,}4714E^{-0{,}479},\quad (2)$$

причем величина модуляE для слабых грунтов (I категория) принимается E=0,4 МПа, для средних грунтов (II категория) E=1 Мпа, и для крепких грунтов III категории E=3 МПа.

Для мерзлых грунтов показатели E существенно отличаются от этих значений в большую сторону [4].

Как следует из (1), величина предельного сопротивления почвогрунта сдвигу зависит от нормального давления, т.е. от внешней нагрузки на почвогрунт, которую создает трелевочная система.

В табл.1 приведены характеристики некоторых форвардеров с указанием достигаемых начальных значений q_o под колесными парами, которые будем принимать за соответствующие штампы.

Как видим, использование трелевочных систем на базе 8–10-колесных форвардеров с использованием гусениц при нагрузке P=19–20 т создает давление q_o=35–37 кПа, что в 2 и более раз меньше действующих давлений q_o=68–80 кПа при использовании трелевочных систем на базе 4–6-колесных форвардеров без применения гусениц, причем применение последних в 6-колесной системе снижает давление практически на 33%, с 40 до 27 кПа.

Таблица 1

Характеристики трелевочных систем и давление их на грунт

Трелевочная система	Вес P, *т*	q_o, кПа	
		Штамп 1 / число колесных пар	Штамп 2 / число колесных пар
I.4-колесная	15	68 / 1	80 / 1
II. 6-колесная	16	72 / 1	40+40; 27 / 3
III.8-колесная	19	35 / 2	58 / 2
IV.10-колесная	20	35 / 2	37 / 3

Оценим величину сопротивления грунта на сдвиг τ в зависимости от начального давления q_o с учетом влажности W.

Поскольку величина τ является одним из критериев разрушения массива, а в силу соотношения (1) и данных исследований [2] является величиной переменной, то, по мере увеличения глубины колеи и ее приближения к границе с мерзлым грунтом, представляет интерес дать обобщенную количественную оценку влияния W на величину τ.

С этой целью были обработаны опытные данные [2] по влиянию W на параметры C и φ для двух видов мерзлых грунтов (супеси и суглинка), после чего они были представлены в безразмерном виде, где за базу отсчета (масштабную единицу) приняты данные при минимальной влажности W=15%.

Результаты расчетов представлены на рис.1, где: на оси абсцисс – относительная влажность $\overline{W}$, сцепления $\overline{C}$ (кривая 1) и угла $\overline{\varphi}$ (кривая 2) для всей совокупности данных как внутри оттаивающего массива так и на его границе с мерзлым грунтом.

Как видим, поведение графиков безразмерных величин $\overline{C}(\overline{W})$ и $\overline{\varphi}(\overline{W})$ совпадает, что дает возможность производить адекватные расчеты в абсолютных единицах.

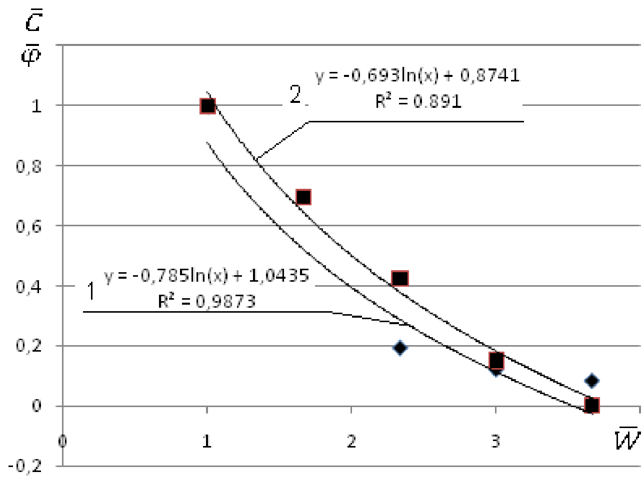

Рис. 1. Изменения относительных значений сцепления и угла внутреннего трения с ростом относительной влажности грунта: 1 - $\overline{C}(\overline{W})$; 2 - $\overline{\varphi}(\overline{W})$

Переход к абсолютным значениям W, C и φ с учетом начальных давлений q_o позволил получить графические зависимости снижения предела прочности τ с ростом влажности W (рис. 2), которые с высокой достоверностью описываются экспоненциальными зависимостями вида:

$$T=\kappa_1 e^{(-\kappa_2 W)}. \quad (3)$$

С высокой достоверностью (R^2 превышает 0,95) для коэффициентов k_i, входящих в (3), получены соотношения:

$$\kappa_1=2{,}2q_o+30{,}64,\quad \kappa_2\approx 0{,}075, \quad (4)$$

что позволяет производить расчет величины τ как функции двух переменных —q_o и W:

$$\tau = (2{,}2q_o+30{,}64)e^{-0{,}075W}. \quad (5)$$

Под действием нагрузки $P(m)$ на поверхности почвогрунта образуется контактная площадка радиусом a ($м$), с площадью контакта $s = \pi a^2$ и глубиной контактного сближения h_o.

Основываясь на положениях [5], параметры a и h_o определим как:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P(1-\nu^2)R}{4E}}; \qquad h_o=a^2/R, \quad (6)$$

где R—радиус колеса, $м$;ν—коэффициент Пуассона.

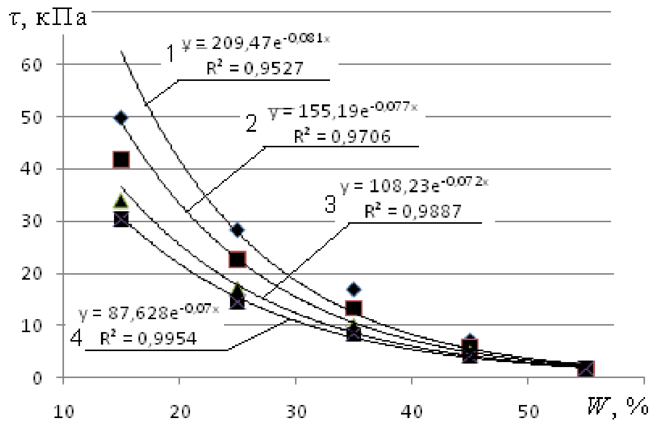

Рис. 2. Зависимость τ от W при:1 — q_o=80 кПа;2 — q_o=58 кПа; 3 — q_o=37 кПа; 4 — q_o= 27 кПа

Процесс деформирования почвогрунта от действия внешнего давления q_o под нагрузкой P происходит в пространственной декартовой системе координат $Oxyz$, где на произвольной элементарной площадке массива действует тензор напряжений, компоненты которого определим как:

$$\sigma_z = -q_0\psi_z(r,z) = -q_0\frac{z}{\sqrt{u}})^3\frac{a^2u}{u^2+a^2z^2};$$

$$\sigma_x=\alpha\sigma_z=\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_z; \qquad \sigma_y=q_0\psi_y(r,z),$$

где α—коэффициент бокового распора, а функции двух переменных $\psi_z(r,z)$, $\psi_y(r,z)$ и $\psi_{yz}(r,z)$ называют функциями координат, равными:

$$\psi_y(r,z) = \frac{1-2\nu}{3}\frac{a^2}{r^2+z^2}\left[1-(\frac{z}{\sqrt{u}})^3\right]+(\frac{z}{\sqrt{u}})^3\frac{a^2u}{u^2+a^2u^2}+$$

$$+\frac{z}{\sqrt{u}}\left[\frac{(1-\nu)u}{a^2+u}+(1+\nu)arctg(\frac{a}{\sqrt{u}})-2\right]$$

$$\tau_{yz} = -q_0\psi_{yz}(r,z) = -q_0\frac{a\ \sqrt{u}z^2(r^2+z^2)}{(u\ +a^2)(u^2+a^2z^2)},$$

$$r=\sqrt{x^2+y^2} \quad (7)$$

Входящий в (7) параметр u—положительный корень квадратного уравнения $\frac{r^2}{a^2+u}+\frac{z^2}{u}=1$.

В главных осях главныенапряжения принимаются из условия:

$$\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3, \quad (8)$$

касательные напряжения при этом отсутствуют.

Выполним на основе соотношений (7) в зоне почвогрунта непосредственно под первым штампом расчеты по определению компонент тензора напряжений σ_x, σ_y, σ_z при следующих исходных данных: P =19 т, q_o=58 кПа, E=1 МПа, W=35%, ν=0,35.

Для этих данных соотношения (2) – (6) дают: a=0,175 м, h_o=0,068 м, H=0,47 м, C=10,774 кПа, φ=13,67°, τ=24,88 кПа, $\sigma_p\tau/2$=12,44 кПа.

Расчеты компонент тензора напряжений показали, что главное напряжение σ_1 является знакопеременным, причем в зоне массива почвогрунта вблизи поверхности контакта со штампом ($z = h_p \le 0{,}128$ м) развиваются положительные (растягивающие) напряжения, значительно превышающие величину предела прочности на разрыв σ_p. Выполнение критерия разрушения в этой зоне приведет к образованию трещин разрыва.

За пределами зоны разрыва уровень растягивающих напряжений недостаточный для разрушения почвогрунта, однако отрицательные (сжимающие) напряжения σ_2 и σ_3 приводят к возникновению максимальных касательных напряжений:

$$\tau_c=0{,}5(\sigma_2-\sigma_3), \quad (9)$$

которые могут превысить величину предела прочности на сдвиг τ, тем самым определив глубину зоны h_c, которую можно считать наиболее вероятной глубиной колеи $h_к$ от действия первого штампа.

Дифференцированный подход при выявлении механизма разрушения сплошной среды, в частности при окорке балансов, развит в работе [6].

В момент маневрирования форвардера и его отклонения от заданного направления движения на угол θ деформирование почвогрунта происходит под действием тензора напряжения с компонентами:

$$\sigma_y=\sigma_1;\ \sigma_z=0{,}5(\sigma_2+\sigma_3)+0{,}5(\sigma_2-\sigma_3)\cos2\theta;$$
$$\sigma_x=0{,}5(\sigma_2+\sigma_3)-0{,}5(\sigma_2-\sigma_3)\cos2\theta;\ \tau_{zx}=0{,}5(\sigma_2-\sigma_3)\sin2\theta \quad (10)$$

Из соотношений (10) следует, в частности, что при θ = 0 компоненты тензора напряжений являются главными, т.е. имеем:

$$\sigma_y=\sigma_1, \quad \sigma_z=\sigma_2, \quad \sigma_x=\sigma_3, \quad \tau_{zx}=0. \quad (11)$$

Таким образом, критерием разрушения массива почвогрунта является выполнение условий:

в зоне разрушения разрывом: $\sigma_y>\sigma_p$;
в зоне разрушения сдвигом: $\tau_\Sigma=\tau_c+\tau_{zx}>\tau$, (12)

где τ_Σ—суммарные касательные напряжения.

Наряду с модулем общей деформации E упругопластические свойства почвогрунтов характеризуются и коэффициентом Пуассона v, причем, по данным [7], влажность W оказывает влияние на v. Так, для мерзлых и оттаивающих грунтов (песков, супесей, суглинка и глины) эта связь хорошо описывается экспоненциальной зависимостью и в диапазоне изменения W от 15 до 35% (R^2=0,9729):

$$N=0{,}0887e^{0{,}0442W}. \tag{13}$$

При значениях W>35% коэффициент Пуассона ограничен сверху величиной предела v =0,5, а зависимость v (W) принимает вид:

$$N=0{,}2234\ln W–0{,}4463. \tag{14}$$

Таким образом, при высокой влажности $v\rightarrow0{,}5$, т.е. коэффициент бокового распора $\alpha=v/(1–v)$, который связывает компоненты вертикальных σ_z и горизонтальных σ_x сжимающих напряжений, стремится к 1. Это значит, что массив почвогрунта находится в состоянии квазинесжимаемой жидкости и только в поверхностной зоне испытывает максимальные растягивающие напряжения, приводящие к разрыву.

Как показали расчеты, максимально возможные значения величины h_p не превышают 0,12 м и существенно зависят от величины модуля общей деформации E, при этом влажность W и начальная нагрузка P оказывают слабое влияние на h_p (относительные изменения не превышают 8–10% при изменении P с 12 до 19 т и W с 15 до 35%).

Расчеты по определению зоны разрушения сдвигом и оценке возможной глубины колеи свидетельствуют о существовании определенной зависимости $h_к$ от веса трелевочной системы, начального давления на почвогрунт, угла поворота рамы, влажности и модуля общей деформации.

В частности, на рис.3 представлены графики функций $h_к$ (оси ординат, *м*) от угла θ (ось абсцисс, °) при W=35% и трех видах нагрузки P, которые позволяют сделать вывод об отрицательном влиянии маневров форвардера на процесс образования колеи. Так, даже при небольшой массе трелевочной системы P=12 т поворот рамы на угол в 15° приводит к увеличению глубины колеи почти в 2 раза, с 0,09 до 0,18м.

При движении форвардера в заданном направлении маневры с углом поворота θ до 10° являются вполне естественными, однако в ряде случаях углы поворота достигают 15–20° и более. Максимальное технически возможное значение поворота рамы θ достигает 42–44°. Как показывают результаты исследований, учет фактора влияния угла поворота при прокладке трасс движения, особенно по переувлажненным почвогрунтам, является необходимым.

Данные (рис. 3) показывают, что при высокой влажности отсутствие маневрирования форвардера позволяет выдержать ограничение $h_к \leq 0{,}1$ м только при небольших нагрузках до 12–15 т. При любой нагрузке P маневры во влажных почвогрунтах даже с небольшими поворотами рамы (угол θ =10–15°) приводят к существенному увеличению глубины колеи.

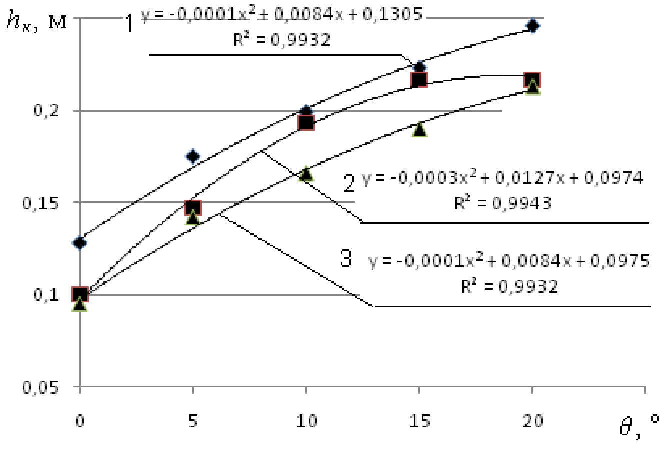

Рис. 3. Зависимость зоны разрушения сдвигом от угла поворота при нагрузке: 1 —P=19 т; 2 —P=15 т; 3 —P=12 т

Исследования влияния влажности на процесс образования колеи показали следующие тенденции.

При движении форвардера по относительно влажным почвогрунтам (W = 25–30%) возможно выдержать ограничение $h_к \leq 0{,}1$ м даже при P = 19 т.

С ростом W до 40–45% глубина колеи достигает значений 0,25 м при низких нагрузках (P =12 т) и небольших углах поворота рамы (θ =5–10°).

В итогена основании полученных соотношений (5)–(10) получена формула для определения глубины колеи после действия первого штампа:

$$h_k=a\sqrt{q_o\frac{(1-\alpha)(1+\sin 2\ \ )}{2\tau}}, \tag{15}$$

где предел прочности на сдвиг τ определяется в соответствии с (5), а радиус контактной площадки a—в соответствии с (6).

Формула (15) показывает, что глубина колеи является функцией многих переменных и параметров, определяющих физико-механические свойства оттаивающего почвогрунта с учетом его влажности и технических характеристик трелевочной системы.

Расчеты по формуле (15) свидетельствуют о том, что в допустимом диапазоне изменения технологических и природно-климатических параметров взаимодействия форвардера с мерзлыми и оттаивающими почвогрунтами величина h_k изменяется от 0 до 0,5 м и более.

В связи с этим определенный интерес вызывает необходимость решения задачи классификации почвогрунтов в пределах трассы движения форвардера по фактору величины h_k как критерия сопротивления массива разрушающему действию статических нагрузок.

На первом этапе установим доверительные интервалы изменения h_k, при которых на основе t-критерия Стьюдента можно сделать вывод об отличии средних значений двух разных выборок (проверка нулевой гипотезы).

Схема статистических испытаний [8]состоит в том, что с помощью датчика случайных чисел вырабатываются $n = n_1 n_2$ случайных чисел ξ_i, распределенных в диапазоне от –1 до 1 по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием.

Далее задается математическое ожидание некоторой глубины колеи M_1 (h_k), и вырабатываются n_1 значений $M_i = M_1(1+\xi_i)$. Опыт повторяют n_1 раз, обрабатывают полученную выборку с определением среднеквадратического отклонения $\sigma_1(h_k)$ и коэффициента вариации $\eta_1 = \sigma_1(h_k)/M_1(h_k)$.

Метод статических испытаний и его применение в различных отраслях знаний подробно изложены в работах [9; 10].

Задаются шагом изменения глубины колеи ΔM, и для полученного математического ожидания $M_2(h_k)$ = = $M_1(h_k)$ +ΔM эксперимент повторяют n_2=n_1 раз с определением соответствующих значений $\sigma_2(h_k)$ и η_2.

Далее вычисляют эмпирический двухвыборочный $t_э$-критерий, который сравнивают с теоретическим t_m-критерием, при этом определяют минимальное значение ΔM, которое при заданных числе степеней свободы $k = n_1+n_2$– –2=18 и уровне значимости β=0,05 позволяет судить о существенных отличиях двух средних $M_1(h_k)$ и $M_2(h_k)$.

В конечном счете находят зависимость среднего коэффициента вариации $\eta_{ср}=(\eta_1+\eta_2)/2$ от исходной величины $M_1(h_k)$.

В табл.2 представлен фрагмент результатов расчетов, позволяющий сравнить полученные значения$t_э$ с табличным критерием t_m=2,1.

Таблица 2

Результаты расчетов по проверке нулевой гипотезы

M_1, 10^{-2}м	M_2, 10^{-2}м	y_1, 10^{-2}м	y_2, 10^{-2}м	$з_1$,%	$з_2$,%	$з_{ср}$, %	$t_э$
8,5	9,7	1,35	1,16	16	12	14	2,13
11,5	13,4	1,84	2,07	16	15	15,5	2,17
15,3	16,9	1,89	1,45	12	9	10,5	2,12
22,1	23,9	1,66	2,13	8	9	8,5	2,11

Основываясь на данных табл. 2, на рис. 4 представим убывающую статистическую зависимость $\eta_{ср}$(ось ординат, %) с ростом M_1 (ось абсцисс, 10^{-2}*м*).

Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что по мере углубления колеи вариация значений h_k снижается.

Этот означает, что диапазон колебаний величины h_k даже в сложных природно-климатических и технологических условиях является ограниченным, что позволяет классифицировать условия трелевки с целью стабилизации их проектных показателей.

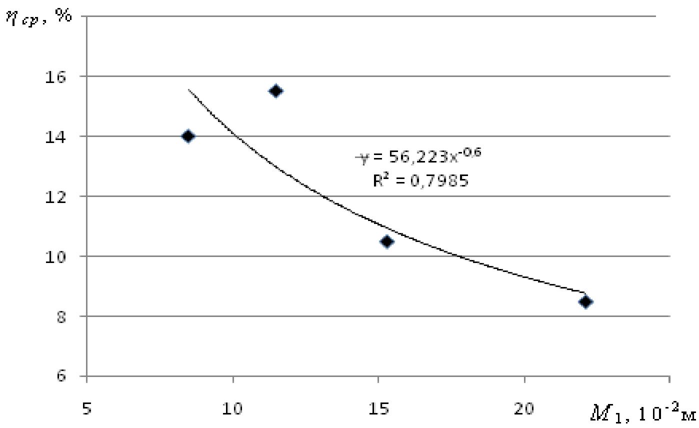

Рис. 4. Зависимость коэффициента вариацииглубины колеи от ее математического ожидания

Примем на экспертном уровне, что стабильные условия трелевки (I категория) соответствуют коэффициенту вариации η ≤ 10 % наиболее изменчивого параметра.

Для II категории (переходной от стабильных до нестабильных условий) η может достичь 20%.

Нестабильные условия работ (III категория) наблюдаются при их вариации в диапазоне 20% η ≤ 30%.

За пределами III категории статистические данные являются не представительными, и модель описывает происходящие процессынеадекватно.

Сформулируем вариационную задачу по определению влияния изменчивости физико-механических свойств оттаивающего почвогрунта на границе с мерзлотой, в первую очередь параметров E и W, на вариации значений h_k и относительного уплотнения грунта $\bar{\rho}$, от действия статической нагрузки транспортной системы.

С этой целью случайные нормально распределенные числа ξ_i подставляются в соотношения вида:

$$E_i=M(E)\cdot(1+\xi_i\eta); \quad W_i=M(W)\cdot(1+\xi_i\eta), \qquad (16)$$

где $M(E)$ — математические ожидания значений соответствующих параметровE и W.

Далее, при фиксированных значениях других параметров веса P, начального давления q_o, коэффициента Пуассона v, угла поворота рамы θ и других — с помощью соотношений (5)– (10) определяются случайные значения h_{ki}.

Для данной глубины, приняв $z = h_{ki}$, определяются с помощью (7) величины вертикальных напряжений σ_{zi}, отнесение которых к случайным значениям модулей деформации E_i дает выборку значений величин относительной общей деформации ε_i и относительного уплотнения грунта $\bar{\rho}_i=1+\varepsilon_i$.

Таким образом, формируются статистические выборки четырех случайных параметров —E, W, h_k, и $\bar{\rho}$, обработка которых позволила выявить зависимость их коэффициентов вариации (%) (на рис. 5 на оси ординат соответственно η(E), η(W), η(h_k) и η($\bar{\rho}$))от коэффициента вариации исходных условий η (ось абсцисс, %).

Данные (рис. 5) получены при следующих исходных данных:

$$P=15 \text{ т}, q_o=80 \text{кПа}, v=0{,}35, \theta=10^o, \quad M(W)=35\%, M(E)=1000 \text{ кПа}. \tag{17}$$

Полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы:

1. Поскольку η(h_k)η (погрешность расчетов не превышает 10–13%), в качестве показателя изменчивости условий производства работ можно обоснованно принять показатели вариации глубины колеи. В пользу этого критерия выступают также его наглядность и оперативность определения в натурных условиях.

2. Для трех принятых категорий изменчивости условий жесткое ограничение нормативной глубины колеи ($h_k \le 0{,}1$ м) целесообразно заменить на более достоверные допустимые интервалы: для I категории — 0,09 м$h_k \le 0{,}11$ м; для II категории —0,08 *м*$h_k \le 0{,}12$ м и для III категории —0,07 *м*$h_k \le 0{,}13$ м.

3. Наиболее стабильным показателем результата взаимодействия трелевочной системы с массивом почвогрунта является величина его относительного уплотнения, коэффициент вариации которого после воздействия 1-го штампа для всех трех категорий изменчивости условий не выходит за пределы 5%.

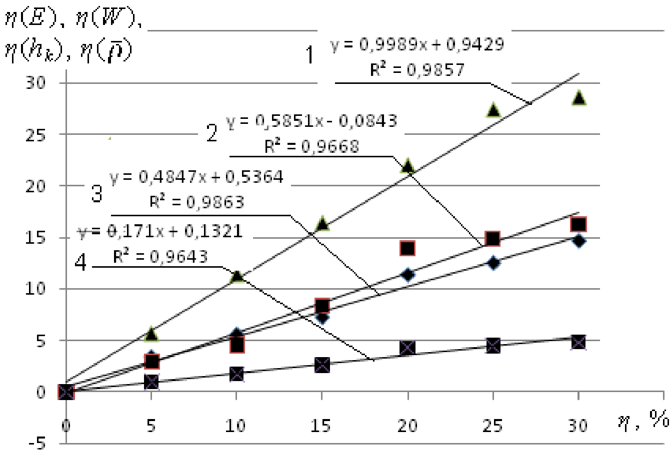

Рис. 5. Влияние вариаций условий производства работ на вариации модуля деформации, влажности, глубины колеи и относительного уплотнения грунта

Анализ данных (рис. 5) показывает, что графики 1 и 2 зависимостей η (*E*) и η(*W*) от η статистически совпадают, т.е. *E* и *W*равнозначны как факторы влияния, однако оперативно контролировать и учитывать вариацию *W* существенно проще, чем вариацию *E*.

На рис.6 представлены зависимости (ось ординат, *%*) величины η (h_k) от η (ось абсцисс, *%*) для трех состояний ожидаемой влажности почвогрунта: 1 —*M* (*W*)=15%; 2 —*M* (*W*)=25%; 3 —*M* (*W*)=35%. Остальные параметры принимаются постоянными и соответствуют условиям (17).

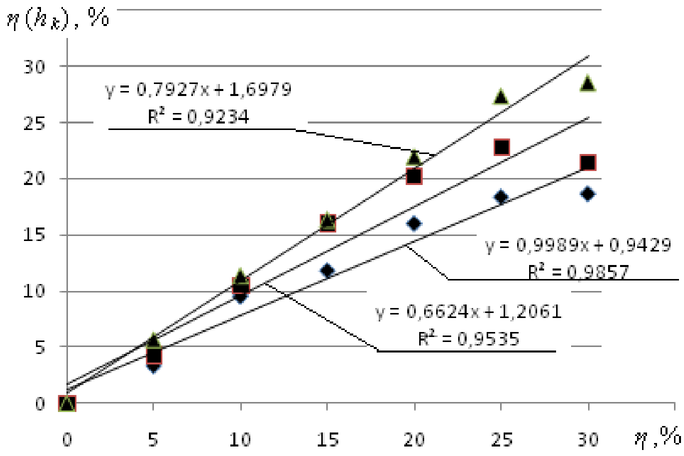

Рис. 6. Зависимость вариации глубины колеи от вариации условий работ для трех состояний ожидаемой влажности грунта: 1 —*M* (*W*) =15%; 2 —*M* (*W*) =25%; 3 —*M* (*W*) =35%

Как видим, в стабильных условиях (η до 10%) фактор *W* имеет ограниченное влияние.

Так, для сухих (*W*=15%), относительно влажных (*W* =25%) и влажных (*W*=35%) почвогрунтов вариации глубины колеи отличаются друг от друга не более чем на 9 %.

В более изменчивых условиях, при изменениях η до 20 %, указанные отличия превышают 20%, и фактор влажности *W* необходимо учитывать.

В нестабильных условиях работ (η достигает 30 % и более) отличия в изменчивости глубины колеи достигают 40 % и более. Фактор влажности является доминирующим.

В реальных условиях эксплуатации, во время производственного цикла форвардер часто проходит по трем-четырем разным типам почвогрунтов, физико-механические свойства которых могут существенно отличаться.

Актуальным является вопрос классификации и установления соответствующих категорий почвогрунтов по критерию их способности сопротивляться разрушающему действию статической нагрузки трелевочной системы. Эту способность оттаивающего почвогрунта назовем технологическим свойством сопротивления статическим нагрузкам.

Для ответа на поставленный вопрос сформулируем и решим следующую задачу.

Пусть вариации технологических и природно-климатических условий в пределах каждой категории почвогрунтов достаточно стабильны, и показатель η не превосходит 10%.

Разработку классификации почвогрунтов начнем применительно к условиям эксплуатации трелевочных систем I и II (табл.1), содержащих колесные пары с высокими статическими давлениями — 68 и 72 кПа под 1-м штампом и 80 кПа —под 2-м штампом.

Зафиксируем вес системы *P*=15 т и угол поворота рамы θ =10^o.

Результаты статистического моделирования процесса образования колеи и определения величины относительного уплотнения при одном проходе этих систем, изменении *E* от 400 до 3000 кПа и *W* от 15 до 35% сведены в табл. 3 (в числители дроби —показатели от действия 1-го штампа, в знаменателе —от 2-го).

Таблица 3

Результаты статистического моделирования образования колеи и относительного уплотнения грунта при использовании I трелевочной системы

$M(W)$, %	$M(E)$, кПа	$M(h_k)10^{-2}$, м	$y(h_k)10^{-2}$, м	з(h_k), %	$M(\bar{\rho})$
15	3000	3,95/4,0	0,4/0,4	10,6/11,3	1,021/1,023
20	2000	6,4/6,75	0,64/0,76	10,93/11,28	1,028/1,032
25	1000	12,07/12,9	1,46/1,68	12,1/13,0	1,045/1,06
30	700	17,7/17,9	2,3/2,52	13,12/14,0	1,053/1,06
35	400	28,7/31,0	4,0/4,5	13,99/14,64	1,064/1,072

Основываясь на данных табл. 3, представим на рис. 7 зависимость усредненного после одного прохода форвардера коэффициента вариации η (h_k) глубины колеи (ось ординат,10^{-2} м) от математического ожидания *M* (h_k) глубины колеи (ось абсцисс, 10^{-2} м).

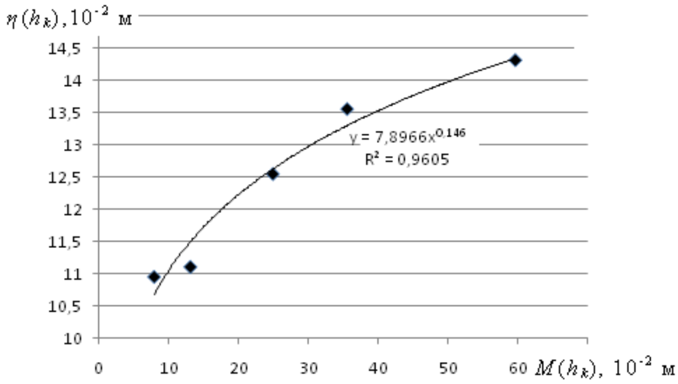

Рис. 7. Зависимость коэффициента вариации глубины колеи от ее математического ожидания после одного прохода I трелевочной системы

Полученная с достаточно высокой точностью (R^2 превысил 0,96) корреляционная зависимость η(h_k) от *M* (h_k) позволила определить границы категорий прочности почвогрунтов вдоль трассы трелевочного волока, в пределах которых технологические свойства можно считать стабильными, не требующими корректировки таких параметров, как вес пачки, давление на почвогрунт, скорость движения форвардера, число его проходов по одному и тому же участку.

Установленные категории образуют своеобразную шкалу (табл. 4), обоснованием которой послужило требование, чтобы в пределах каждой категории размах вариации критерия был постоянным.

Данные табл.4 однозначно свидетельствуют о том, что эффективная эксплуатация исследуемых трелевочных систем целесообразна на участках I-II категории почвогрунтов без существенной корректировки нагрузки и давлений в сторону снижения.

При прохождении участков с более низкой несущей способностью почвогрунтов указанная корректировка необходима.

Таблица 4

Классификация почвогрунтов по критерию их несущей способности

№	Несущая способность	Пределы изменения $h_к$,10^{-2}м	Размах, 10^{-2}м
I	Чрезвычайно высокая	Неболее 10	
IIа IIб	Весьма высокая Высокая	От 10 до 12 От 12 до 14	2 2
III	Весьма средняя	От 14 до 18	4
IVа IVб	Умеренно средняя Средняя	От18 до 24 От 24 до 30	6 6
V	Низкая	От 30 до 40	10
VI	Весьма низкая	От 40 до 52	12
VII	Чрезвычайно низкая	Более 52	

Как показали расчеты (рис. 8), относительное увеличение веса *P* (кривая 1) и начального давления q_o (кривая 2) в ψ раз (ось абсцисс) приводит к нелинейному относительному увеличению глубины колеи в ψ_h раз (ось ординат).

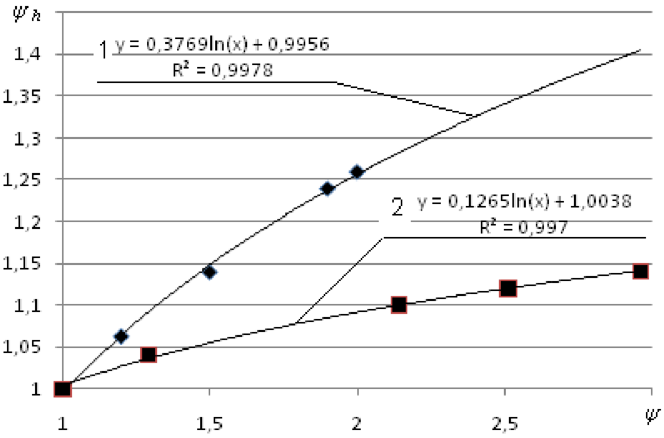

Рис. 8. Влияние относительного увеличения веса и начального давления системы на относительное увеличение глубины колеи

Полученные логарифмические зависимости свидетельствуют, во-первых, о том, что снижение веса трелевочной системы и особенно давления на почвогрунт как факторы повышения эффективности трелевки являются ограниченными.

Во-вторых, снижение величины *P* по своему факторному значению существенно превышает значимость фактора снижения давления.

Совокупное влияние этих факторов (одновременное снижение веса системы и давления на почву) повышает эффективность эксплуатации форвардера до 40 –50%. На почвогрунтах V–VII категорий прочности такие мероприятия имеют особое значение.

Этот результат наглядно иллюстрируют данные (рис. 9), где на осях отложены показатели относительного изменения глубины колеи Δ*h* (ось аппликат) в зависимости от *P* (ось абсцисс, *m*) и q_o (ось ординат, *кПа*).

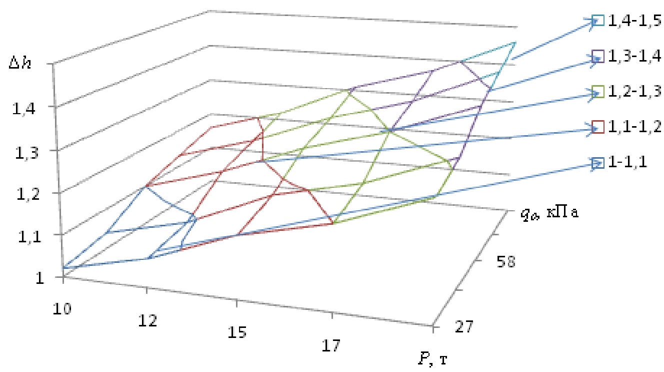

Рис. 9. Зависимость относительного изменения глубины колеи от веса пачки и давления на почвогрунт

Трелевочные системы с использованием гусениц могут быть эффективно использованы для почвогрунтов I–IV категорий прочности при нагрузках до 20 т, однако при прохождении участков почвогрунтов с низкой несущей способностью V–VII категорий указанную нагрузку необходимо снижать до 12–13 т.

Логично завершить выполненные исследования приведением расчетных графиков (рис.10) зависимости математического ожидания $M(\bar{\rho})$ (ось ординат) относительного уплотнения почвогрунта в границе колеи после одного прохода форвардеров I (кривая 1) и IV (кривая 2) от величины $M(h_k)$ (ось абсцисс, 10^{-2} м).

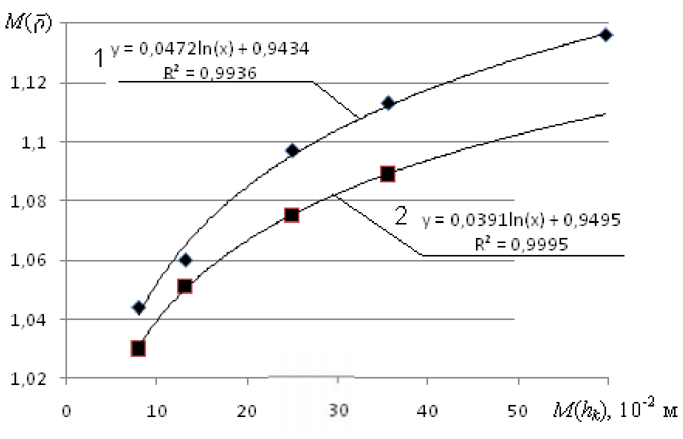

Рис. 10. Зависимость $M(\bar{\rho})$ от $M(h_k)$:1 —почвогрунт I категории; 2 —почвогрунт IV категории

При определении величины деформаций ε_i от действия 1-го и 2-го штампов учитывались общие деформации без учета возможного упругого восстановления массива почвогрунта [11].

Высокая достоверность логарифмической аппроксимации свидетельствует, во-первых, об асимптотическом характере полученных зависимостей, что соответствует результатам исследований [12], и, во-вторых, для прочных почвогрунтов I и II категорий степень их уплотнения, в среднем, в 2 раза ниже уплотнения массивов слабых почвогрунтов III–V категорий.

Таким образом, предложенный вариационный подход к определению параметров процесса образования колеи при использовании различных трелевочных систем позволяет классифицировать оттаивающие почвогрунты на отдельных участках трассы по критерию их несущей способности сопротивляться разрушающему действию статических нагрузок.

При данной классификации необходимо учитывать параметры современных трелевочных машин [13], а также закономерности влияния физико-механических свойств мерзлого почвогрунта и параметров его влажности и температуры на размеры контактного взаимодействия с трелевочной системой, позволяющие определять начальные условия для расчета напряженно-деформированного состояния мерзлого почвогрунта в процесседеформации, уплотнения и разрушения его краевой части [14–16].

Полученные результаты создают предпосылки для повышения надежности прогноза проектных показателей и условий эффективной эксплуатации современных форвардеров при работе в лесах криолитозоны.

Литература

1. Котляренко В.И. Основные направления повышения проходимости колесных машин. М.: МГИУ, 2008. 285 с.

2. Царапов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2007. № 6. С. 31-34.

3. Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильюшенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122-126.

4. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на крайнем Севере. Л.: Госстройиздат, 1963. 492 с.

5. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 544с.

6. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Гумерова О.М. Моделирование процесса разрушения коры при окорке резанием // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2010. № 193. С. 211-221.

7. Цытович Н.А. Принципы механики мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР. 1952. 168 с.

8. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Вариационный метод расчета и стабилизации параметров роторной окорки // Справочник. Инженерный журн. с прил. 2009. № 7 (148). С. 47-51.

9. Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности пифов // Экономическое развитие и практика: материалы междунар. науч. конф. М., 2007. С. 79-81.

10. Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Моделирование портфельных инвестиций в условиях негативных сценарием развития фондового рынка // Финансы и кредит. 2015. № 5 (303). С. 39-51.

11. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов В.А. Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках // Вестн. Крас. гос. аг. ун-та. 2008. № 1. С. 163-175.

12. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Лепилин Д.В., Жукова А.И. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения // Учен. зап. Петрозав. гос. ун-та. 2010. № 6 (111). С. 61-64.

13. Хахина А.М., Григорьев И.В., Газизов А.М., Куницкая О.А. Статистический анализ параметров колесных трелевочных машин // Хвойные бореальной зоны. 2018. № 2. С. 189-197.

14. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем // Системы Методы Технологии. 2018. № 3 (39). С. 73-78.

15. Григорьев И.В., Рудов С.Е. Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering: материалы науч.-практической конф. с междунар. участием. СПб., 2018. С. 67-71.

16. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рудов С.Е. Особенности взаимодействия лесных машин с мерзлотными почвогрунтами // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы IV Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием. М., 2018. С. 187-188.

References

1. Kotlyarenko V.I. Main directions of improving the patency of wheeled vehicles. M.: MGIU, 2008. 285 p.

2. Carapov M.N. The formation of strength characteristics of soils in the process of thawing // Moscow University Bulletin. Series 7. Geology. 2007. № 6. P. 31-34.

3. Hitrov E.G., Bozhbov V.E., Il'yushenko D.A. Calculation of bearing capacity of forest soil under the influence of wheeled propulsion // Systems Methods Technologies. 2014. № 4 (24). P. 122-126.

4. Velli Yu.Ya., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F. Buildings and structures in the far North. L.: Gosstrojizdat, 1963. 492 p.

5. Morozov E.M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. Izd. 2-e. M.: LIBROKOM, 2010. 544 p.

6. Gazizov A.M., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Gumerova O.M. Modeling of the process of bark destruction at debarking by cutting // Izvestia SPbLTA. 2010. № 193. P. 211-221.

7. Cytovich N.A. Principles of mechanics of frozen soils. M.: Izd-vo AN SSSR. 1952. 168 p.

8. Gazizov A.M., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V. Variational method of calculation and stabilization of rotor debarking parameters // Handbook. An Engineering Journal. 2009. № 7 (148). P. 47-51.

9. Shapiro V.Ya., Shapiro N.A. Using Markov chains to predict the effectiveness of mutual funds // Ekonomicheskoe razvitie i praktika: materialy mezhdunar. nauch. konf. M., 2007. P. 79-81.

10. Shapiro V.YA., Shapiro N.A. Modeling of portfolio investments under negative scenario of stock market development // Finance and Credit. 2015. № 5 (303). P. 39-51.

11. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Ivanov V.A. Study of mechanical processes of cyclic compaction of soils under dynamic loads // The Bulletin of KrasGAU. 2008. № 1. P. 163-175.

12. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Lepilin D.V., Zhukova A.I. Modeling of soil compaction in the lateral bands of the skidding wave taking into account the variability of the route // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2010. № 6 (111). P. 61-64.

13. Hahina A.M., Grigor'ev I.V., Gazizov A.M., Kunickaya O.A. Statistical analysis of the parameters of wheeled skidding machines // Conifers of the boreal area. 2018. № 2. P. 189-197.

14. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Mathematical modeling of the process of compaction of the soil under the influence of forest machines and skidding systems // Systems Methods Technologies. 2018. № 3 (39). P. 73-78.

15. Grigor'ev I.V., Rudov S.E. Features of operation of wheeled forest machines in difficult soil-soil and relief conditions // Forest Engineering: materialy nauch.-prakticheskoj konf. s mezhdunar. uchastiem. SPb., 2018. P. 67-71.

16. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Rudov S.E. Features of the interaction of forest machines with frozen soils // Povyshenie ehffektivnosti lesnogo kompleksa: materialy IV Vseros. nauch.-prakticheskoj konf. s mezhdunar. uchastiem. M., 2018. P. 187-188.