

## ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ С ОТТАИВАЮЩИМ ПОЧВОГРУНТОМ

С.Е. Рудов<sup>1</sup>, В.Я. Шапиро<sup>2</sup>, И.В. Григорьев<sup>3</sup>, О.А. Куницкая<sup>3</sup>, О.И. Григорьева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, г. Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий проспект, д. 3

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский переулок, д. 5

<sup>3</sup>Якутская государственная сельскохозяйственная академия, 677007, г. Якутск, ш. Сергеляхское, 3 км, д. 3

shapiro54vlad@mail.ru

Проведение лесозаготовительных работ в районах Крайнего Севера характеризуется крайне сложными климатическими условиями. Эксплуатация трелевочных систем применительно к мерзлым почвогрунтам обуславливает необходимость учета его как многокомпонентной сложной среды. Необходимость минимизации техногенной нагрузки на окружающую среду выдвигает проблему оптимизации числа проходов трелевочной системы по одному и тому же волоку в разряд наиболее актуальных. Процесс образования колеи движителем лесной машины обладает рядом особенностей во время выполнения лесосечных работ в условиях мерзлых и оттаивающих грунтов, т. е. в бывших мерзлых грунтах, находящихся при положительной температуре. При оттаивании мерзлого грунта происходит перенасыщение его водой, в связи с чем существенно ослабевают природные связи между твердыми частицами и физико-механические свойства утрачивают исходные значения. При этом на границе оттаивания силы сцепления грунта снижаются. Интенсивность этого снижения зависит от исходной влажности грунта. В статье рассмотрено взаимодействие движителя колесного форвардера с оттаивающим почвогрунтом с позиций механики контактного разрушения, исходя из цикличности воздействия трелевочной системы на мерзлый и оттаивающий грунты, когда перед вторым проходом форвардера, по окончании определенного периода времени, необходимо учитывать новое состояние почвогрунта, существенно отличное от того состояния, в ходе которого происходила реализация первого прохода. Научные положения и результаты выполненных исследований создают предпосылки для адекватной оценки параметров этих процессов.

**Ключевые слова:** мерзлые почвогрунты, лесозаготовки, трелевочные системы, уплотнение и деформация почвогрунтов

**Ссылка для цитирования:** Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим почвогрунтом // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 1. С. 52–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-52-61

При обосновании эффективных условий эксплуатации современных трелевочных систем, в частности, на базе колесных форвардеров, на первый план выходят вопросы оценки их проходимости и производительности, а также экологической безопасности, исходя из конкретных природно-производственных условий [1–3]. В последние два десятилетия вопросам совместимости лесных машин с почвогрунтами лесосек, прогнозированию их проходимости посвящено большое количество теоретических [4, 5], конструкторских [6–9], экспериментальных [10] исследований и разработок.

Отдельно надо выделить испытания заболоченных почвогрунтов методом конусного индекса [11, 12], которые позволили существенно развить направления исследований, связанные с лесными машинами и почвогрунтами лесосек.

Но работ, посвященных изучению взаимодействия лесных машин с мерзлыми почвогрунтами практически нет ни в отечественной, ни в зарубежной литературе.

### Цель работы

Цель работы — рассмотреть взаимодействие колесного форвардера с оттаивающим почвогрунтом.

### Материалы и методы

В работе [13] установлен ряд наиболее существенных ограничений по параметрам: а) грузоподъемности машины; б) касательной силы тяги машины, т. е. сопротивление перемещения машины не должно превышать максимальное тяговое усилие форвардера; в) сцепления движителя с грунтом, т. е. касательная сила тяги не должна превышать силу сцепления движителя с поверхностью почвогрунта. Приводятся рекомендации по ограничению веса трелевочной машины с грузом, исходя из допустимой глубины колеи после первого прохода машины. Так, например, считается, что максимально допустимая глубина колеи после первого прохода форвардера не должна превышать 0,10 м.

Погружение колеса в почвогрунт вызывает сопротивление движению, т. е. предопределяет силу, препятствующую движению колеса вперед. Горизонтальное усилие подачи можно использовать для того, чтобы преодолеть сопротивление движению и выработать необходимую тягу. Максимальная тяга, как особого рода сила поверхностного трения, зависит от величины предела сопротивления грунта на сдвиг  $\tau$ .

Трелевочная система образует колею и в ее непосредственной близости — определенную зону контакта колеса с грунтом. Чем больше размер этой зоны, тем большие усилия передаются на почву для реализации необходимой тяги. Указанные процессы и явления обладают рядом особенностей во время выполнения лесосечных работ в условиях мерзлых и оттаивающих грунтов, т. е. в бывших мерзлых грунтах, находящихся при положительной температуре.

При оттаивании мерзлого грунта происходит перенасыщение его водой, в связи с чем существенно ослабевают природные связи между твердыми частицами и физико-механические свойства утрачивают исходные значения. При этом на границе оттаивания силы сцепления грунта снижаются. Интенсивность этого снижения зависит от исходной влажности грунта.

Будем считать, что глубина зоны оттаивания —  $H$  (м). За ее пределами мерзлый грунт представляет собой весьма твердое основание, поскольку упругопластические и прочностные характеристики мерзлого грунта кратно, а в ряде случаев на порядок превосходят аналогичные характеристики для талых или оттаивающих грунтов.

Слой оттаивающего грунта характеризуется повышенной влажностью. По данным [14] с увеличением общей влажности грунта  $W_0$  происходит снижение величины сцепления  $C$  (кПа) и угла внутреннего трения  $\phi$  (град), что при конкретном вертикальном давлении  $q$  на грунт, создаваемым форвардером, в соответствии с законом Кулона — Мора ( $\tau = qtg(\phi) + C$ ) окажет соответствующее влияние на предельное значение  $\tau$ .

### Результаты и обсуждение

Для ряда грунтов указанные закономерности изменения прочности по мере увеличения влажности сведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены характеристики некоторых форвардеров с указанием достигаемых начальных значений  $q$  под колесными парами (штампами).

Как видим, использование восьми- — десятиколесных трелевочных систем при нагрузке  $P = 19-20$  т создает давление на грунт равным  $q = 35$  кПа, что практически в 2 раза меньше значений соответствующего давления при использовании четырех- — шестиколесных систем. При эксплуатации на слабонесущих грунтах применение гусениц позволяет снизить величину  $q$  до 27 кПа, однако подобные устройства приводят к дополнительным материальным и трудовым затратам.

Основываясь на данных табл. 1 и 2, на рис. 1 приведены графики зависимости  $\tau$  от  $W_0$  для оттаивающей супеси при трех значениях вертикального давления  $q$ .

Т а б л и ц а 1  
Характеристики слоев оттаивающего грунта и на границе оттаивания

Characteristics of thawing soil layers and at the boundary of thawing

Грунт	Общая влажность грунта $W_0$ , %	Оттаивающий грунт		На границе оттаивания	
		$C$	$\phi$	$C$	$\phi$
Песок	8	10	34	2	30
	17	8	32	1	28
	32	4	23	0	17
Супесь	15	21	19	16	17
	17	14	17	8	15
	23	7	16	5	11
Суглинок	15	20	24	16	22
	20	17	21	12	18
	28	8	17	4	12
Глина	20	30	15	22	16
	29	20	13	14	12
	44	11	12	6	10

Т а б л и ц а 2  
Характеристики трелевочных систем и давление их на грунт  
Characteristics of skidders and their pressure on the ground

Трелевочная система	Вес $P$ , т	Вертикальное давление $q$ , кПа	
		штамп 1 / число колесных пар	штамп 2 / число колесных пар
Четырехколесная	15	68 / 1	80 / 1
Шестиколесная	16	72 / 1	27 / 2
Восьмиколесная	19	35 / 2	58 / 2
Десятиколесная	20	35 / 2	37 / 3

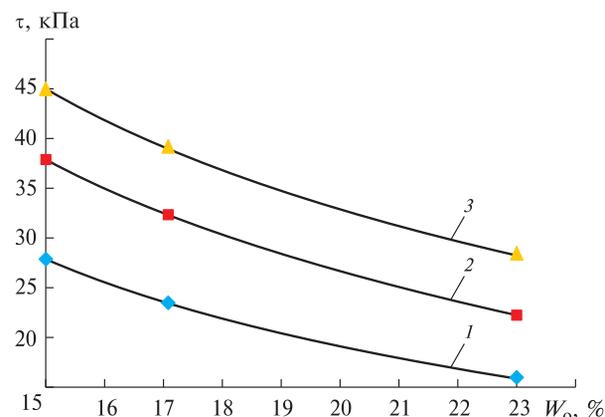


Рис. 1. Зависимость величины предела сопротивления на сдвиг от влажности грунта при значении вертикального давления: 1 —  $q = 27$  кПа; 2 —  $q = 8$  кПа; 3 —  $q = 80$  кПа  
Fig. 1. Dependence of the magnitude of the shear resistance limit on the soil moisture at the value of the vertical pressure: 1 —  $q = 27$  kPa; 2 —  $q = 8$  kPa; 3 —  $q = 80$  kPa

Как следует из анализа данных рис. 1, по мере снижения внешнего давления на грунт растет степень зависимости величины  $\tau$  от влажности (увеличивается абсолютное значение показателя степени в соответствующей степенной функции).

Рассмотрим схему взаимодействия форвардера с оттаивающим почвогрунтом с позиций механики контактного разрушения и будем считать воздействие колеса радиусом  $R$  (м) как действие круглого штампа (индентора).

Под действием суммарной нагрузки  $P$  на поверхности почвогрунта образуется контактная площадка радиусом  $a$  (м), с площадью контакта  $s = \pi a^2$  и глубиной контактного сближения (потенциальная глубина первичной колеи в случае выполнения критерия разрушения), равной  $h = h_0$ .

Основываясь на положениях [15], параметры  $a$  и  $h_0$  определим как

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P(1-\nu^2)R}{4E}}; h_0 = \frac{a^2}{R}, \quad (1)$$

где  $E$  — модуль общей деформации, кПа,  
 $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Таким образом, параметры  $a$  и  $h_0$  зависят от суммарного веса трелевочной системы, характерного размера колеса и упругопластических свойств почвогрунта, в первую очередь величины  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .

Предварительные оценки возможных значений  $a$  и  $h_0$  заполняют диапазон  $a = 0,093-0,195$  м и  $h_0 = 0,019-0,084$  м при изменении  $E$  от 900 до 5000 кПа,  $\nu$  от 0,15 до 0,45,  $P$  от 15 до 20 т при постоянном  $R = 0,45$  м.

Диапазон изменения величины  $h_0$  свидетельствует о том, что этот параметр ограничен сверху значением 0,1 м, что удовлетворяет условиям эффективного использования форвардеров. Однако процесс разрушения оттаивающего почвогрунта может выйти за границы величины  $h_0$  и практически достичь контакта с мерзлым грунтом.

В результате исследований [13] установлена корреляционная связь между величиной  $E$  (МПа) и глубиной  $H$  (м) твердого основания в виде степенной функции  $H = 0,4714E^{-0,479}$ .

При изменении  $E$  от 0,9 до 5 МПа величина  $H$  изменяется от 0,22 до 0,5 м, т. е. можно заключить, что зона оттаивающего почвогрунта глубиной, равной  $h = h_1 = H - h_0 = 0,13-0,48$  м, представляет особый интерес с позиций процесса разрушения и возможного углубления колеи.

При этом необходимо отметить, что давление на оттаивающий почвогрунт, содержащий достаточное количество воды, в пределах зоны  $h_0$  усилит процесс фильтрации воды и рост влажности в пределах зоны  $h_1$ , что обусловит дополнительное снижение как предела прочности почвогрунта на сдвиг  $\tau$ , так и величину модуля деформации  $E$ , тем самым предопределив возможное дополнительное углубление колеи вплоть до границы с мерзлым грунтом, т. е. обеспечит выполнение условия  $h = H$ .

В осесимметричной постановке при переходе от декартовых  $x, y, z$  координат к цилиндрическим координатам  $h, r$ , где  $h$  — вертикальная,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  — радиальная (горизонтальная) координаты, вертикальное давление  $q_h$  можно определить как [15]

$$q_h = q \left( \frac{h}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{ua^2}{u^2 + a^2h^2}, \quad (2)$$

где  $u$  — положительный корень квадратного уравнения:

$$\frac{r^2}{(a^2 + u)} + \frac{h^2}{u} = 1. \quad (3)$$

Если оценивать процесс деформации почвогрунта строго под штампом ( $r = 0$ ), то величины вертикального и горизонтального давлений — соответственно  $q_h$  и  $\tau_h$  на текущей глубине  $h$  можно определить из соотношений

$$q_h = \frac{q}{1 + (h/\alpha)^2}; \tau_h = \alpha q_h, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — коэффициент бокового распора, равный  $\alpha = \frac{\nu}{1-\nu}$ .

Тогда глубина  $h_\tau$ , на которой выполняется критерий разрушения  $\tau_h \geq \tau$ , определяется из соотношения

$$h_\tau = a \sqrt{\frac{\alpha q}{\tau} - 1}, \quad (5)$$

т. е.  $h_\tau$  зависит от начального давления на почвогрунт, упругопластических и прочностных свойств почвогрунта, его влажности и радиуса колеса форвардера. Величина  $\Delta h = h_\tau - h_0$  определяет, таким образом, глубину возможного дополнительного увеличения колеи.

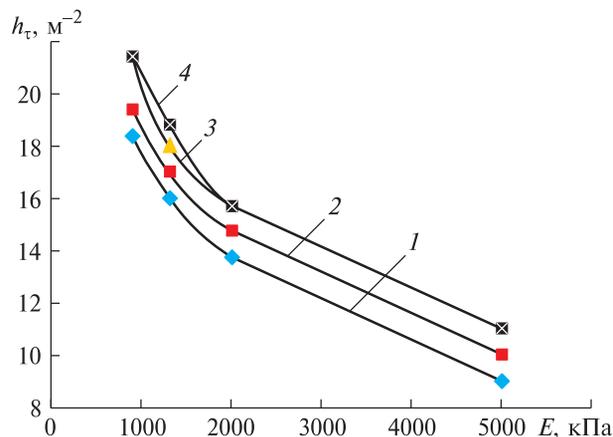


Рис. 2. Зависимость глубины колеи от модуля деформации с учетом начального давления на почвогрунт: 1 —  $q = 27$  кПа; 2 —  $q = 35$  кПа; 3 —  $q = 58$  кПа; 4 —  $q = 80$  кПа

Fig. 2. The dependence of the depth of the gauge on the strain modulus, taking into account the initial pressure on the soil: 1 —  $q = 27$  kPa; 2 —  $q = 35$  kPa; 3 —  $q = 58$  kPa; 4 —  $q = 80$  kPa

На рис. 2 представлены зависимости  $h_t$  от  $E$  для четырех возможных значений начального давления на грунт при фиксированных  $W_o = 35\%$ ,  $v = 0,35$  и  $R = 0,45$  м.

Как видно, расчетная глубина колеи в почвогрунтах с такими высокими показателями влажности только при низких давлениях не выходит за пределы 0,1 м в достаточно прочных грунтах с высокими значениями модуля деформации  $E$  ( $E > 4$  МПа).

Однако при таких оценках не учтены факторы повышения влажности и, соответственно, снижения прочности в пределах глубины  $\Delta h$  за счет фильтрационных процессов, что обусловит более жесткие требования по ограничению внешнего давления на почвогрунт.

Рассмотрим модель Дарси линейной фильтрации жидкости под действием вертикального давления  $q$  вертикально вниз в направлении  $h$

$$v_h = -\frac{k \partial q}{\gamma \partial h}, \quad (6)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации, м/сек,  
 $\gamma$  — удельный вес жидкости.

В качестве частной производной  $\frac{\partial q}{\partial h}$  примем отношение перепада давления (величина отрицательная) на участке  $h_0$  к размеру самого участка.

Тогда за 1 единицу времени (сек) объем жидкости  $V_{ж}$  в пределах площади пятна контакта  $s$  переместится вниз за пределы  $h_0$  и составит

$$V_{ж} = -\frac{\pi k \partial q}{\gamma \partial h} \alpha^2 \frac{1}{1 + h_0 / \alpha}. \quad (7)$$

Отнеся объем  $V_{ж}$  к общему объему воды  $V_o$  в зоне грунта глубиной  $h_1$  ( $V_o = \pi W_o \gamma \alpha^2 h_1$ ), получим величину  $\lambda$  (%) дополнительного объема жидкости, поступающей в почвогрунт из зоны контактного сближения глубиной  $h_0$  в зону притока воды глубиной  $h_1$ .

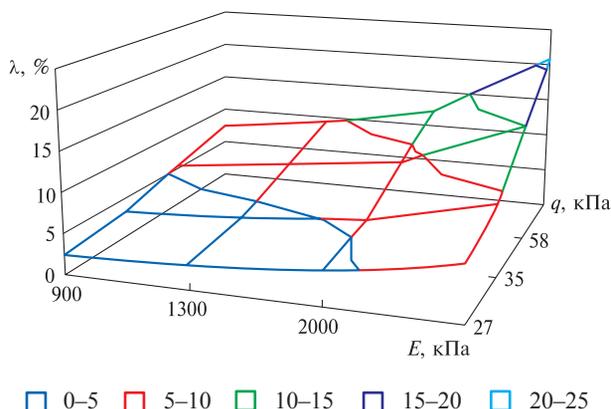
Значения коэффициента фильтрации в соответствии с ГОСТ 25100–2011 «Грунты. Классификация» принимаем по данным табл. 3.

Как показывают расчеты параметры  $q$  и  $E$  существенно влияют на показатель  $\lambda$ .

Т а б л и ц а 3

**Коэффициент фильтрации грунтов**  
 Soil filtration coefficient

Наименование грунта	Коэффициент фильтрации, м/с
Песок:	
пылеватый	$(0,6-6)10^{-5}$
мелкозернистый	$(1,2-3)10^{-4}$
среднезернистый	$(2,5-6)10^{-4}$
крупнозернистый	$(4-8,5)10^{-4}$
Супесь	$(0,1-1,2)10^{-5}$
Суглинок	$(0,05-0,5)10^{-5}$
Глина	$<10^{-5}$



**Рис. 3.** Влияние модуля деформации и начального давления на процесс приращения жидкости за пределами зоны контакта

**Fig. 3.** Effect of strain modulus and initial pressure on the process of fluid increment outside the contact zone

На рис. 3 представлен график двумерной функции  $\lambda(E, q)$  зависимости  $\lambda$  от  $E$  и  $q$ . Расчеты выполнены для супеси с минимальным значением параметра скорости фильтрации  $k = 10^{-6}$  м/с и фиксированными  $W_o = 35\%$ ,  $v = 0,35$  и  $R = 0,45$  м.

Из анализа данных рис. 3 можно заключить, что в основном диапазоне изменения параметров  $E$  и  $q$  (в 60–70 % случаях) величина  $\lambda$  не превышает 10 %, что не окажет существенного влияния на увеличение влажности почвогрунта и характер протекания процесса его деформирования под действием штампов.

Однако с ростом  $E$  до 2000 кПа и более и давлением  $q$ , превышающим 58 кПа, объемный прирост жидкости существенно превышает 10 %, достигая диапазона значений 15–20 %, что приводит к росту общей влажности  $W_o$  на 5–10 %. Это обусловит снижение показателя прочности грунта на сдвиг и увеличит вероятность дополнительного углубления колеи.

Если пренебречь процентной долей воды, находящейся в парообразном состоянии (тысячные доли процентов от общего объема), то схематично можно сказать, что вода в жидкой фазе содержится в почвогрунте в двух основных состояниях: связанном и свободном.

Связанная высокоплотная (до 1200–1400 кг/м<sup>3</sup>) вода, занимающая до 40 % и более от общего объема, под действием статических нагрузок практически не уплотняется. Градиент ее перемещения — в направлении действия нагрузки, и обеспечить перемещение этой воды достаточно трудно, поскольку до 95 % связанная вода остается в исходном состоянии. Уместно отметить, что такая вода переходит в лед при достаточно низких температурах замерзания воды  $T_b \approx -4...-6$  °С.

Свободная вода состоит из гравитационной и капиллярной составляющих.

Капиллярная вода замерзает при температурах, близких к значениям температуры замерзания связанной воды, процесс перехода гравитационной воды в лед происходит уже при любых отрицательных значениях  $T \leq 0$  °С.

Таким образом, с позиций механики деформирования оттаивающего почвогрунта определенной влажности, можно выделить два основных состояния присутствующей в нем воды:

1 — свободная гравитационная вода (плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$ ), легко перемещается под действием внешнего давления в основном в направлении основного усилия, переходит в лед при достижении любых отрицательных температур;

2 — связанная высокоплотная (плотностью до  $1400 \text{ кг/м}^3$ ) с низкой (до  $-6$  °С) температурой замерзания вода, включает связанную и свободную капиллярную воды, оказывает сильное сопротивление внешнему давлению.

Пусть начальное распределение в единице объема почвогрунта свободной и связанной воды определяется соответствующими компонентами вектора  $\vec{v}_0 = (\omega_1 + \omega_2)$ , причем  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ .

Матрица Маркова переходных состояний применительно к поставленной задаче давления на почвогрунт представляет собой квадратную размерностью  $2 \times 2$  матрицу вероятностей  $P_c$ , на главной диагонали которой расположены вероятности  $p_{11}, p_{22}$ , отражающие факт количественного (в процентах) сохранения исходного состояния воды.

Другие элементы матрицы, а именно вероятности  $p_{ij}$ , описывают вероятности переходов воды из  $i$ -го состояния в  $j$ -е и наоборот.

Тогда согласно теории Маркова и особенностей ее прикладных аспектов, развитых в работах [16, 17], умножение вектора  $\vec{v}_0$  на матрицу  $P_c$  определяет вектор  $\vec{v}_1$  — распределение состояний воды после первого цикла воздействия (прохода первой колесной пары форвардера).

Пусть начальное состояние воды характеризуется вектором  $\vec{v}_0$

$$\vec{v}_0 = (0,6; 0,4). \quad (8)$$

В матрице переходных состояний  $P_c$  в качестве  $p_{11}$  принимаем  $p_{11} = 1 - \lambda / 100$ , а  $p_{22} = 0,95$ , т. е. матрица переходных состояний примет вид

$$P_c = \begin{pmatrix} 1 - \lambda / 100 & \lambda / 100 \\ 0,05 & 0,95 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Тогда умножение вектора (8) на матрицу (9) дает вектор состояния воды после первого цикла воздействия на почвогрунт.

Как показали расчеты, при использовании форвардеров с низким давлением внешнего воздействия ( $q$  до  $39 \text{ кПа}$ ) вектор  $\vec{v}_0 = (0,6; 0,4)$  при

изменении модуля деформации  $E$  от  $900$  до  $5000 \text{ кПа}$  и постоянстве остальных условий, приводит к вектору состояний  $\vec{v}_1 = (0,58; 0,42)$ , т. е. относительное изменение не превосходит  $5\%$ .

Это означает, что процесс фильтрации является весьма слабым и показатель влажности  $W_0$  увеличивается менее чем на  $2,5\%$ . Процессами фильтрации воды при оценке характера деформирования почвогрунта можно пренебречь.

Аналогичные закономерности установлены при исследовании процессов разрушения коры при роторной окорке балансов, а также прессовании и обезживании различных пород древесины [18, 19].

При использовании форвардеров с высоким давлением внешнего воздействия на грунт (до  $80 \text{ кПа}$ ) количественными изменениями компонент  $(\omega_1, \omega_2)$  пренебрегать нельзя.

На рис. 4 отложены значения компонент  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в зависимости от  $E$ .

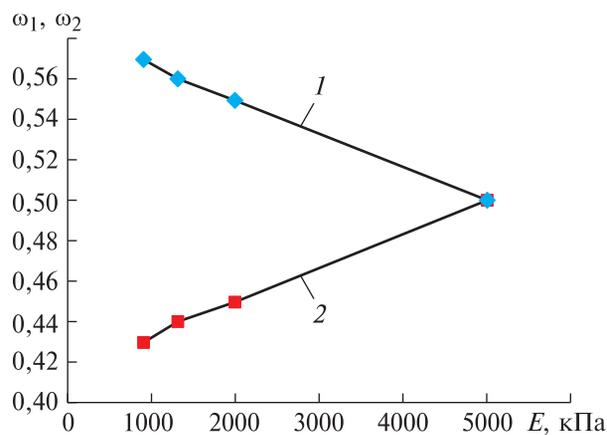


Рис. 4. Зависимость компонент вектора состояний от модуля деформации: 1 —  $\omega_1$ ; 2 —  $\omega_2$

Fig. 4. Dependence of the components of the state vector on the strain modulus: 1 —  $\omega_1$ ; 2 —  $\omega_2$

Как видно, чем выше значения модуля деформации  $E$ , тем интенсивнее происходит процесс фильтрации и перехода свободной воды в связанное состояние. Это, с одной стороны, обуславливает повышение влажности в нижележащем слое почвогрунта и снижение его прочностных свойств, что приведет к дополнительному углублению колеи на величину  $\Delta h$ , а с другой — увеличивает вероятность сохранения воды в жидком состоянии за счет более низких температур замерзания связанной воды.

В табл. 4 представлены результаты расчетов по предложенной методике для насыщенного влагой грунта  $W_0 = 35\%$ .

На основании данных табл. 4 произведены оценки показателя фильтрации воды  $\lambda$  (%) и значений абсолютных приростов показателей:

- влажности  $\Delta W$  (%);
- горизонтального давления  $\Delta \tau_h$  (кПа);

Т а б л и ц а 4

Показатели возможного углубления колеи за счет учета  
фильтрации жидкости в оттаивающем грунтеIndicators of possible deepening of the gauge due to the inclusion  
of fluid filtration in the thawing soil

$q$	27			58			80		
$E$	900	2000	5000	900	2000	5000	900	2000	5000
$\lambda$	2,5	4,1	6,9	5,4	8,8	14,8	7,6	12,3	20,9
$\Delta W$	0,9	1,4	2,4	1,9	3,1	5,2	2,7	4,3	7,3
$\Delta \tau_h$	0,46	0,73	1,54	1,98	4,23	7,16	4,86	8,12	14,51
$\Delta \tau$	-0,21	-0,31	-0,52	-0,55	-0,86	-1,35	-0,89	-1,36	-2,11
$\Delta h$	1,1	1,4	1,8	2,0	2,8	3,2	2,9	3,3	4,0

- предела прочности на сдвиг  $\Delta \tau$  (кПа);
- глубины колеи  $\Delta h$  (м<sup>-2</sup>).

Указанные приращения достигнуты за счет учета процесса фильтрации жидкости под действием давлений  $q$  (кПа) в различных грунтах, характеризующихся модулем деформации  $E$  (кПа).

Сравнительный анализ данных табл. 4 и рис. 2 показывает, что использование форвардеров с низким давлением (до 37 кПа) в оттаивающих почвогрунтах в широком диапазоне изменения  $E$  с учетом всех факторов процесса фильтрации и снижения прочности почвогрунта добавляет не более 1–2 см к прогнозным значениям глубины колеи.

При использовании форвардеров с высоким давлением (до 80 кПа) этот показатель увеличивается практически вдвое — до 4 см, что при прогнозе первичной колеи в 18–20 см приводит к более сложным условиям эксплуатации трелевочной системы и снижению ее эффективности.

Рассмотрим закономерности деформирования оттаивающего почвогрунта при условии возможного снижения влажности до показателей  $W_0 = 10\text{--}20\%$ , т. е. до сухого состояния почвогрунта, учитывая, что коэффициент Пуассона  $\nu$ , использованный в предложенной модели в соотношениях (1) и (4), зависит от влажности в широком диапазоне изменения температуры почвогрунта и колеблется в пределах 0,2–0,5 [20], т. е. коэффициент бокового распора  $\alpha$ , связывающий величины вертикального и горизонтального давлений, изменяется от 0,25 до 1.

По данным [21] зависимость коэффициента Пуассона от влажности для песков, супесей, суглинка и глины хорошо описывается экспоненциальной зависимостью (рис. 5) в диапазоне изменения влажности от 15 до 35%. При стремлении  $W_0$  к 50% коэффициент Пуассона ограничен сверху и имеет место  $\nu \rightarrow 0,5$ .

Оценим влияние исходной общей влажности  $W_0$  на глубину колеи.

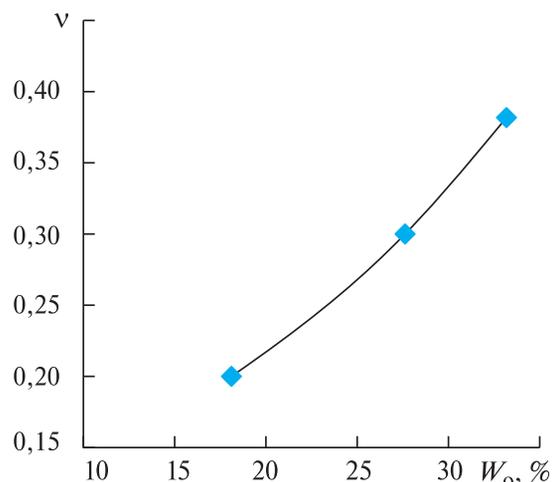


Рис. 5. Зависимость коэффициента Пуассона от общей влажности грунта

Fig. 5. Dependence of Poisson's ratio on the total soil moisture

На рис. 6 представлены результаты расчетов глубины колеи для различных значений модуля деформации  $E$  при относительно сухом состоянии почвогрунта  $10 \leq W_0 \leq 20\%$  (а) и умеренно влажном состоянии  $20 < W_0 \leq 30\%$  (б).

Анализ кривых позволяет заключить, что они практически эквидистантны, т. е. отстоят друг от друга на постоянную величину, равную 0,5–1,5 см для сухого состояния почвогрунта и 5–7 см для уверенно влажного состояния, причем отличия в глубине тем меньше, чем выше значения модуля  $E$ .

Для сухого состояния почвогрунта во всем диапазоне изменений  $q$  и  $E$  глубина колеи не выходит за пределы 10 см.

При умеренно влажном почвогрунте применение форвардеров с давлением  $q = 80$  кПа во всем диапазоне изменения  $E$  не обеспечивает заданного ограничения по глубине колеи. При низком давлении ограничение выполняется только для относительно устойчивых грунтов с  $E \geq 2000$  кПа.

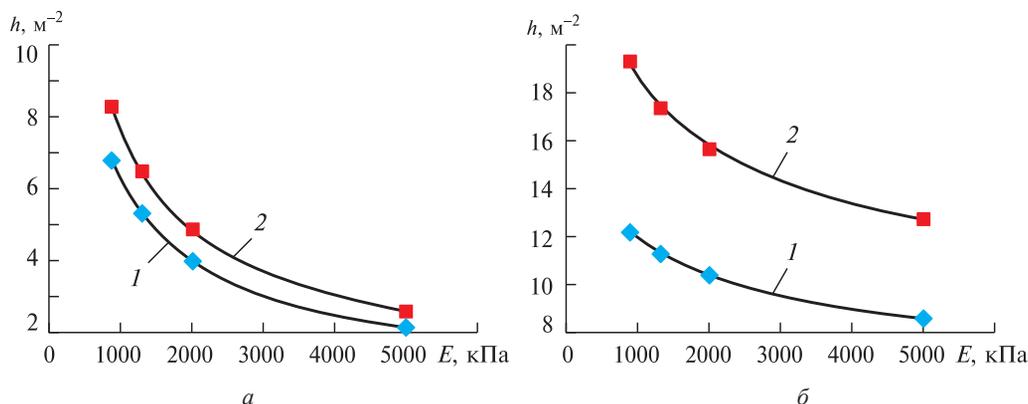


Рис. 6. Зависимость глубины колеи от модуля деформации с учетом влажности и внешнего давления на почвогрунт: а)  $10 \leq W_0 \leq 20\%$ ; б)  $20 < W_0 \leq 30\%$ ; 1 —  $q = 27 \text{ кПа}$ ; 2 —  $q = 80 \text{ кПа}$

Fig. 6. The dependence of the depth of the gauge on the strain modulus, taking into account the initial pressure on the soil: а)  $10 \leq W_0 \leq 20\%$ ; б)  $20 < W_0 \leq 30\%$ ; 1 —  $q = 27 \text{ kPa}$ ; 2 —  $q = 80 \text{ kPa}$

## Выводы

Этот результат показывает, что характеристика влажности оттаивающего почвогрунта и модуль деформации  $E$  являются основными характеристиками физико-механических свойств, опосредованно влияющими на значения предела прочности на сдвиг и коэффициент Пуассона почвогрунта и определяющими, в конечном счете, характер и результаты развития процесса формирования колеи под действием трелевочной системы.

Особенностью эксплуатации форвардеров в условиях мерзлых и оттаивающих почвогрунтов является циклический характер температурного режима, когда в определенный период суток, например ночью, температура может опуститься до  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  или, в дневное время, подняться до  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  и более.

Указанная особенность будет проявляться в том, что свободная вода в течение суток может переходить из жидкого состояния в лед и наоборот, тогда влажность и модуль деформации грунта будут варьироваться.

Уместно отметить, что деформационные свойства воды и льда существенно различаются. Так величина  $E$  для свободной воды составляет  $2030 \text{ МПа}$ , для высокоплотной связанной  $E \approx 2840 \text{ МПа}$ , для льда  $E = 9000 \text{ МПа}$ .

В этом случае интерес вызывает оценка фильтрационных свойств оттаивающих почвогрунтов с учетом циклического характера смены состояния воды.

В работе [22] на примере суглинка в лабораторных условиях выполнены исследования коэффициента фильтрации.

В течение достаточно короткого периода времени (нескольких часов) с помощью термоэлектрического холодильника грунт охладили до  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  при внешнем давлении  $q = 100 \text{ кПа}$ , а затем за такой же период времени при том же давлении произвели размораживание грунта.

Оказалось, что коэффициент фильтрации грунта увеличился в двадцать раз, однако по окончании двух суток снизился до исходного значения.

Характерно, что при отсутствии внешнего давления водопроницаемость образцов после их оттаивания увеличилась на 2–3 порядка. Установлено, что чем выше водопроницаемость исходного состояния грунта, тем больше изменяется этот показатель при его циклическом замораживании и оттаивании.

Эти выводы приобретают особую актуальность при рассмотрении вопросов циклического воздействия трелевочной системы на мерзлый и оттаивающий грунт, когда перед вторым проходом форвардера (3–4 цикла) по окончании определенного периода времени необходимо учитывать новое состояние почвогрунта, существенно отличное от того состояния, при котором происходила реализация первого прохода (1–2 цикла).

Научные положения и результаты выполненных исследований создают предпосылки для адекватной оценки параметров этих процессов.

## Список литературы

- [1] Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 235 с.
- [2] Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоадаптивные технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 175 с.
- [3] Григорьев И.В., Чураков А.А. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колесного трактора // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень, Тюменский индустриальный университет, 19 апреля 2018 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. С. 84–88.

- [4] Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Yu., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain // *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, t. 41, no. 2, pp. 22–27.
- [5] Manukovsky A.Y., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Lapshina M.L., Makarova Yu.A., Chetverikova I.V., Yakovlev K.A., Afonichev D.N., Kunitskaya O.A. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling // *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, t. 41, no. 2, pp. 35–41.
- [6] Григорьев И.В., Чураков А.А., Григорьева О.И. Перспективная конструкция гусеничного форвардера // *Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Международной научно-технической конференции*, 2017. С. 140–144.
- [7] Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В. Оценка энергоэффективности шасси гусеничных лесных машин // *Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Международной научно-технической конференции*. Тюмень, Тюменский индустриальный университет, 20 апреля 2017 г. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. С. 145–149.
- [8] Григорьев И.В., Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Система машин и технология работ для малообъемных лесозаготовок // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*, 2017. С. 51–53.
- [9] Григорьев И.В., Куницкая О.А. Перспективные направления опытно-конструкторских работ в лесном машиностроении // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Петрозаводск, Петрозаводский государственный университет, 30 мая 2017 г. Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2017. С. 53–56.
- [10] Lisov V.Yu., Grigorev I.V. Determination coefficient filtration of forest soil // *European Science and Technology: Materials of the IV International research and practice conference*, Munich, April 10–11, 2013. Munich, Germany: Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg, 2013, v. 1, pp. 268–274.
- [11] Хитров Е.Г., Дмитриева М.Н., Лухминский В.А., Хахина А.М., Григорьев И.В., Иванов В.А. Теоретический расчет конусного индекса заболоченного грунта // *Системы. Методы. Технологии*, 2017. № 4 (36). С. 152–156.
- [12] Дмитриева М.Н., Григорьев И.В., Лухминский В.А., Казаков Д.П., Хахина А.М. Экспериментальные исследования конусного индекса и физико-механических свойств заболоченного грунта // *Лесотехнический журнал*, 2017. Т. 7. № 4 (28). С. 167–174.
- [13] Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Хахина А.М. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 146 с.
- [14] Роман Л.Т., Царапов М.Н. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. 188 с.
- [15] Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: ЛКИ, 2010. 224 с.
- [16] Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности ПИФов // *Материалы Международной научной конференции «Экономическое развитие: теория и практика»*. Санкт-Петербург, СПбГУ, 5–6 апреля 2007 / ред. И.П. Бойко. СПб.: СПбГУ, 2007. С. 79–81.
- [17] Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Моделирование портфельных инвестиций в условиях негативных сценариев развития фондового рынка // *Финансы и кредит*, 2008. № 15 (303). С. 39–51.
- [18] Пигильдин Н.Ф. Окорка лесоматериалов (теория, технология, оборудование). М.: Лесная пром-сть, 1982. 192 с.
- [19] Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*, 2012. № 4. С. 110–115.
- [20] Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на крайнем Севере. Л.: Госстройиздат, 1963. 492 с.
- [21] Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
- [22] Жиленков В.Н. Усовершенствованная методика определения фильтрационных свойств грунтов, подвергшихся промораживанию и оттаиванию // *Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева*, 1999. Т. 235. С. 46–51.

## Сведения об авторах

**Рудов Сергей Евгеньевич** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры № 3 ФГБОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», 89213093250@mail.ru

**Шапиро Владимир Яковлевич** — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Высшая математика» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», shapiro54vlad@mail.ru

**Григорьев Игорь Владиславович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», silver73@inbox.ru

**Куницкая Ольга Анатольевна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», ola.ola07@mail.ru

**Григорьева Ольга Ивановна** — канд. с.-х. наук, доцент кафедры «Лесоводство» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», grigoreva\_o@list.ru

Поступила в редакцию 16.10.2018.

Принята к публикации 26.12.2018.

## INTERACTION FEATURES OF SKIDDING SYSTEM WITH THAWING SOIL

S.E. Rudov<sup>1</sup>, V.Y. Shapiro<sup>2</sup>, I.V. Grigorev<sup>3</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>3</sup>, O.I. Grigoreva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Military Academy of communication named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, 3, K-64, Tikhoretsky prospect, 194064, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg state forest engineering University named after S.M. Kirov, 5, Institutskiy pereulok, 194021, St.-Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Yakutsk state agricultural Academy, 3, 3 km, sh. Sergelyakhskoe, 677007, Yakutsk, Russia

shapiro54vlad@mail.ru

Logging operations in the Far North are characterized by extremely difficult climatic conditions. Operation of skidding systems in relation to frozen soils makes it necessary to take it into account as a multicomponent complex environment. The need to minimize the anthropogenic load on the environment raises the problem of optimizing the number of passes of the skidding system for the same skidding track in the category of the most relevant. The process of formation of ruts by the mover of the forest machine has a number of features during the performance of logging operations in the conditions of frozen and thawing soils, i.e. in the former frozen soils at positive temperature. When thawing frozen soil is oversaturated with water, in connection with which, significantly weaken the natural connections between the solid particles and physical and mechanical properties lose their original values. At the same time, at the boundary of thawing, the forces of soil adhesion are reduced. The intensity of this reduction depends on the initial soil moisture. The article considers the interaction of the wheel forwarder mover with thawing soil from the standpoint of the mechanics of contact destruction, based on the cyclicity of the impact of the skidding system on the frozen and thawing soils, when before the second pass of the forwarder, at the end of a certain period of time, it is necessary to take into account the new state of the soil, significantly different from the state in which the implementation of the first pass. Scientific provisions and the results of the research create prerequisites for an adequate assessment of the parameters of these processes.

**Keywords:** frozen soils, logging, skidding systems, compaction and deformation of soils

**Suggested citation:** Rudov S.E., Shapiro V.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. *Osobennosti vzaimodeystviya trelevochnoy sistemy s ottaivayushchim pochvogruntom* [Interaction features of skidding system with thawing soil]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 52–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-52-61

### References

- [1] Grigor'ev I.V. *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh trelevochnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reduction of the negative impact on the soil of wheeled skidders by justifying the modes of their movement and technological equipment]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2006, 235 p.
- [2] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. *Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyakh Severo-Zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii* [Mediating technology of cutting area development in the North-West region of the Russian Federation]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2008, 175 p.
- [3] Grigor'ev I.V., Churakov A.A. *Sovershenstvovanie konstruksii aktivnogo polupritsepa forvardera na baze sel'skokhozyaystvennogo kolesnogo traktora* [Improving the design of an active semi-trailer forwarder based on an agricultural wheeled tractor] *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Tyumen', Tyumenskiy industrial'nyy universitet, 19 aprelya 2018 g. Otv. red. N.S. Zakharov [Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference. Tyumen, Tyumen Industrial University, April 19, 2018. Ed. N.S. Zakharov]. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2018, pp. 84–88.
- [4] Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Yu., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, t. 41, no. 2, pp. 22–27.
- [5] Manukovsky A.Y., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Lapshina M.L., Makarova Yu.A., Chetverikova I.V., Yakovlev K.A., Afonichev D.N., Kunitskaya O.A. Increasing the rate of physical simulation of the financial community. *Journal of Mechanical Engineering Research and Development*, 2018, t. 41, no. 2, pp. 35–41.
- [6] Grigor'ev I.V., Churakov A.A., Grigor'eva O.I. *Perspektivnaya konstruksiya gusenichnogo forvardera* [Perspective design of a tracked forwarder] *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Transport and transport-technological systems: materials of the international scientific and technical conference], 2017, pp. 140–144.
- [7] Dobretsov R.Yu., Grigor'ev I.V. *Otsenka energoeffektivnosti shassi gusenichnykh lesnykh mashin* [Assessment of chassis energy of tracked forest machines] *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy materialy: mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Tyumen', Tyumenskiy industrial'nyy universitet, 20 aprelya 2017 g. [Transport and transport-technological systems materials: international scientific-technical conference. Tyumen, Tyumen Industrial University, April 20, 2017] Tyumen: Tyumen Industrial University, 2017, pp. 145–149.
- [8] Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nguen F.Z. *Sistema mashin i tekhnologiya rabot dlya maloob'emnykh lesozagotovok* [System of machines and technology of works for low-volume logging] *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: Materialy tret'ey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Increasing the efficiency of the forestry complex: Materials of the third All-Russian scientific-practical conference with international participation], 2017, pp. 51–53.

- [9] Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A. *Perspektivnye napravleniya opytно-konstruktorskikh работ v lesnom mashinostroenii* [Prospective areas of development work in forestry engineering] *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: Materialy tret'ey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Petrozavodsk, Petrozavodskiy gosudarstvennyy universitet, 30 maya 2017 g. [Increasing the efficiency of the forestry complex: Materials of the third All-Russian scientific-practical conference with international participation. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, May 30, 2017]. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2017, pp. 53–56.
- [10] Lisov V.Yu., Grigorev I.V. Determination coefficient of forest soil. *European Science and Technology: Materials of the IV International research and practice conference*, Munich, April 10–11, 2013. Munich, Germany: Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg, 2013, v. I, pp. 268–274.
- [11] Khitrov E.G., Dmitrieva M.N., Lukhminskiy V.A., Khakhina A.M., Grigor'ev I.V., Ivanov V.A. *Teoreticheskiy raschet konusnogo indeksa zabolochennogo grunta* [Theoretical calculation of the cone index of marshy ground] *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technologies], 2017, no. 4 (36), pp. 152–156.
- [12] Dmitrieva M.N., Grigor'ev I.V., Lukhminskiy V.A., Kazakov D.P., Khakhina A.M. *Ekspperimental'nye issledovaniya konusnogo indeksa i fiziko-mekhanicheskikh svoystv zabolochennogo grunta* [Experimental studies of the cone index and the physico-mechanical properties of marshy soil] *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2017, v. 7, no. 4 (28), pp. 167–174.
- [13] Khitrov E.G., Grigor'ev I.V., Khakhina A.M. *Povyshenie effektivnosti trelevki obosnovaniem pokazateley raboty lesnykh mashin pri operativnom kontrole svoystv pochvogrunta* [Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest machines in the operational control of the properties of the soil]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2015, 146 p.
- [14] Roman L.T., Tsarapov M.N. *Posobie po opredeleniyu fiziko-mekhanicheskikh svoystv promerzayushchikh, merzlykh i ottaivayushchikh dispersnykh gruntov* [Manual on the definition of physico-mechanical properties of freezing, frozen and thawing dispersed soils]. Moscow: KDU, Universitetskaya kniga [University Book], 2018, 188 c.
- [15] Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. *Mekhanika kontaktного razrusheniya* [Mechanics of contact destruction]. Moscow: LKI, 2010, 224 p.
- [16] Shapiro V.Ya., Shapiro N.A. *Ispol'zovanie tsepey Markova dlya prognoza effektivnosti PIFov* [Using Markov chains to predict the effectiveness of mutual funds] *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Ekonomicheskoe razvitiye: teoriya i praktika»*, Sankt Peterburg, SPbGU, 5–6 aprelya 2007/ Red. Boyko I.P. [Proceedings of the international scientific conference «Economic Development: Theory and Practice», St. Petersburg, St. Petersburg State University, 5–6 April 2007. Ed. Boyko I.P.] St. Petersburg: SPbSU, 2007, pp. 79–81.
- [17] Shapiro V.Ya., Shapiro N.A. *Modelirovanie portfel'nykh investitsiy v usloviyakh negativnykh stsenariyev razvitiya fondovogo rynka* [Modeling of portfolio investments in conditions of negative scenarios of the stock market development]. *Finansy i kredit* [Finance and Credit], 2008, no. 15 (303), pp. 39–51.
- [18] Pigil'din N.F. *Okorka lesomaterialov (teoriya, tekhnologiya, oborudovanie)* [Timber hacking (theory, technology, equipment)]. Moscow: Lesnaya prom-st' [Forest industry], 1982, 192 p.
- [19] Kunitskaya O.A., Shapiro V.Ya., Burmistrova S.S., Grigor'ev I.V. *Opredelenie optimal'nykh parametrov protsessa pressovaniya i obezvozhivaniya propitannykh drevesnykh materialov* [Determination of the optimal parameters of the process of pressing and dehydration of impregnated wood materials] *Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik*, 2012, no. 4, pp. 110–115.
- [20] Velli Yu.Ya., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F. *Zdaniya i sooruzheniya na kraynem Severe* [Buildings and facilities in the Far North]. Leningrad: Gosstroyizdat, 1963, 492 p.
- [21] Tsytoich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher School], 1983, 288 p.
- [22] Zhilenkov V.N. *Uovershenstvovannaya metodika opredeleniya fil'tratsionnykh svoystv gruntov, podvergshikhsya promorazhivaniyu i ottaivaniyu* [Improved methods for determining the filtration properties of soils subjected to freezing and thawing]. *Izvestiya VNIIG im. B.E.Vedeneeva*, 1999, t. 235, pp. 46–51.

## Authors' information

**Rudov Sergey Evgenyevich** — Cand. Sci. (Tech.), Senior Lecturer of the Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 89213093250@mail.ru

**Shapiro Vladimir Yakovlevich** — Dr. Sci. (Tech.), Senior Researcher, Professor of the Department of Higher mathematics, St. Petersburg state forest engineering University named after S.M. Kirov, shapiro54vlad@mail.ru

**Grigorev Igor Vladislavovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department Technology and equipment of the forest complex, Yakutsk state agricultural Academy, silver73@inbox.ru

**Kunitskaya Olga Anatol'evna** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department Technology and equipment of the forest complex, Yakut state agricultural Academy, ola.ola07@mail.ru

**Grigoreva Ol'ga Ivanovna** — Cand. Sci. (Agricultural), Associate Professor of the Forestry Department, St. Petersburg state forest engineering University named after S.M. Kirov, grigoreva\_o@list.ru

Received 16.10.2018.

Accepted for publication 26.12.2018.