



УДК 630\*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ МАШИН С ПОЧВОГРУНТОМ ПРИ РАБОТЕ НА СКЛОНАХ

*С.Е. Рудов<sup>1</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>*

*В.Я. Шапиро<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>*

*И.В. Григорьев<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>*

*О.А. Куницкая<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>*

*О.И. Григорьева<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>*

<sup>1</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: 89213093250@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva\_o@list.ru

<sup>3</sup>Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 23.10.20 / Принята к печати 15.01.21

---

**Аннотация.** Актуальность задачи эффективного освоения лесосек на склонах гор, сопкок и холмисто-рядовых рельефов обусловлена, прежде всего, истощением доступных спелых равнинных эксплуатационных лесов в Сибири и на Дальнем Востоке – в регионах, которые некогда не совсем корректно назывались лесозаготовительными. Удобные для освоения эксплуатационные лесные массивы в Сибири и на Дальнем Востоке во многом исчерпаны. Для освоения новых необходимо масштабное дорожное строительство, что требует значительных финансовых затрат и уменьшает без того низкую рентабельность лесозаготовительного производства. Она снижается и из-за постоянно растущего плеча вывозки заготовленной древесины (даже если не брать во внимание затраты на строительство и содержание новой сети лесовозных дорог). Лесные экосистемы, расположенные на склонах, относятся к наиболее уязвимым. При работе в подобных условиях традиционных систем машин лесозаготовительного производства приходится нарезать серпантин волоков, которые в дальнейшем становятся концентраторами водной и ветровой эрозии. В настоящее время ведущими компаниями-производителями машин и оборудования для лесной отрасли – Ponsse, John Deere, Komatsu и др. – разработаны технические решения, существенно облегчающие работу комплексов лесных машин. К таким решениям относятся интегрированные в трансмиссии машин лебедки, использование отдельных самоходных лебедок на дистанционном управлении, осуществляемом оператором лесной машины, например T-winch. В этом случае машина не получает дополнительной массы от интегрированной в нее лебедки, однако негативное воздействие лесных машин на почвогрунты при этом никуда не уходит, но имеет свою существенную специфику. Показано, что при проведении лесосечных

---

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

работ на склонах, в первую очередь крутых, с превышающими 20–25° углами наклона, необходимо вносить коррективы в оценки характера разрушения массива почвогрунта и закономерностей формирования глубины колеи при воздействии трелевочной системы.

**Для цитирования:** Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 121–134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134

**Ключевые слова:** леса на склонах, лесозаготовка, лесные машины, трелевочные системы, уплотнение почвогрунта, деформация почвогрунта.

### MODELING THE INTERACTION OF FOREST MACHINES WITH SOIL WHEN WORKING ON SLOPES

*Sergey E. Rudov*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

*Vladimir Ya. Shapiro*<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

*Igor V. Grigorev*<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

*Olga A. Kunitskaya*<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

*Olga I. Grigoreva*<sup>2</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

<sup>1</sup>Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva\_o@list.ru

<sup>3</sup>Arctic State Agrotechnological University, 3-y km, sh. Sergelyakhskoye, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

---

Original article / Received on October 23, 2020 / Accepted on January 15, 2021

---

**Abstract.** The urgency of the task of effective development of cutting areas on the slopes of mountains, hills, and hilly-ridge reliefs is primarily due to the depletion of available, special, lowland operational forests in Siberia and the Far East, which were once, not quite correctly, called forest-surplus regions of the Russian Federation. The operational woodlands that are convenient for development in Siberia and the Far East are largely depleted. To develop new ones, large-scale road construction is necessary, which requires significant financial expenses and reduces the already low profitability of logging production. It is also declining due to the ever-increasing volume of export of harvested timber, even if the cost of construction and maintenance of a new network of logging roads is not considered. Forest ecosystems located on slopes are among the most vulnerable. When working on the slopes with traditional systems of logging machines, it becomes necessary to cut a serpentine of skid trails, which later become concentrators of water and wind erosion. Currently, leading manufacturers of machinery and equipment for the forest industry, such as Ponsse, John Deer, Komatsu, and others, have developed technical solutions that significantly facilitate the operation of forest machine systems. Such solutions, first of all, include winches integrated into the transmissions of machines. Another solution is to use separate self-propelled winches remotely controlled

---

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

by the operator of a forest machine, for example, T-winch. In this case, the machine does not receive additional weight from the winch integrated into it; however, the negative impact of forest machines on soils does not disappear, but has its own significant specifics. The article shows that when performing logging operations on slopes, primarily steep ones with slope angles exceeding 20–25°, it is necessary to make adjustments to the assessment of the destruction nature of the soil array and the patterns of the track depth formation under the influence of the skidding system.

**For citation:** Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Modeling the Interaction of Forest Machines with Soil when Working on Slopes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 121–134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134

**Keywords:** forests on slopes, logging, forest machines, skidding systems, soil compaction, soil deformation.

### Введение

В Дальневосточном федеральном округе (ДФО) значительные площади спелого древостоя сосредоточены не только на территориях с резко пересеченным рельефом и крутыми склонами, но и в местах с наличием сильно переувлажненных грунтов, заболоченности и топей [1–5] (рис. 1).

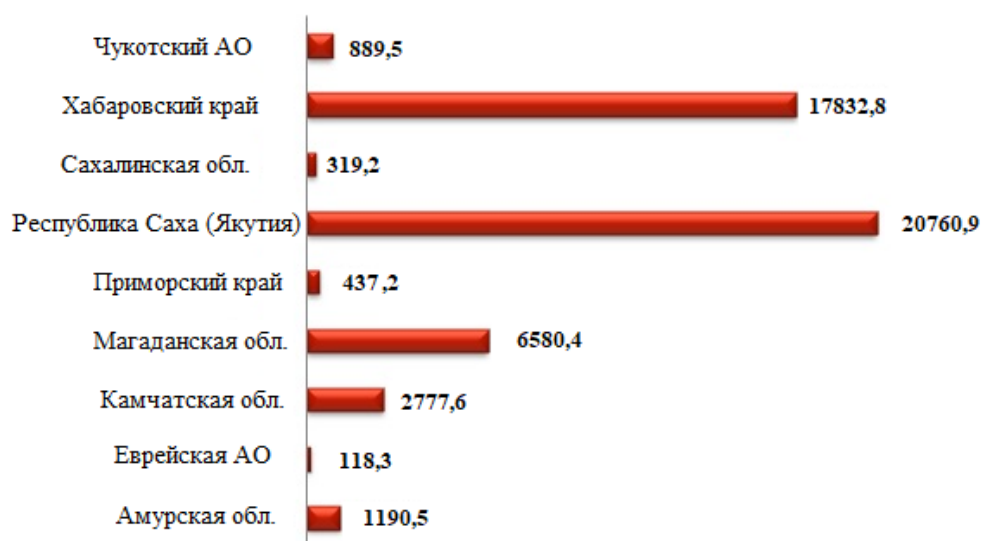


Рис. 1. Наличие в лесном фонде ДВФО лесоэксплуатационных территорий с сильно переувлажненными и заболоченными участками, тыс. га. [4]

Fig. 1. Availability in the forest fund of the Far Eastern Federal District of forest exploitation territories with highly waterlogged and swampy areas, ths ha [4]

Особенностью данных территорий является то, что основные площади, где произрастает качественный древостой, сосредоточены на крутых склонах, которые в нижней части нередко соприкасаются с гидрологическими системами (болотами, речками) [7]. В ДВФО на склонах с уклоном более 20° леса занимают больше 82 млн га, что составляет примерно 25 % лесопокрытой площади региона (табл. 1) [12].

Таблица 1

**Распределение лесопокрытых площадей по крутизне склона в субъектах ДВФО\***

Субъект	Единица измерения площади	Всего	До 20°	21°–30°	31° и более
Хабаровский край	тыс. га	50 924,20	36 105,25	10 694,08	4124,86
	%	100	70,9	21,0	8,1
Приморский край	тыс. га	11 373,20	7824,76	2843,30	705,14
	%	100	68,8	25,0	6,2
Амурская область	тыс. га	2654,00	15 676,57	5504,92	1472,51
	%	100	69,2	24,3	6,5
Камчатский край	тыс. га	9004,50	4952,48	3115,56	936,47
	%	100	55,0	34,6	10,4
Сахалинская область	тыс. га	5519,50	3366,90	1545,46	607,14
	%	100	61	28	11
Республика Саха (Якутия)	тыс. га	143 061,80	92 990,17	37 053,00	13 018,62
	%	100	65,0	25,9	9,1
Еврейская АО	тыс. га	1563,10	1067,60	359,51	136,00
	%	100	68,30	23,00	8,70
Всего	тыс. га	244 100,30	159 641,59	61 115,83	21 000,74
	$\Sigma_{\text{ср}}$ , %	100	65,4	26,0	8,6

\*Без учета Магаданской области.

Другой важной составляющей, характеризующей лесные массивы на склонах, обычно является их протяженность и изрезанность перепадами высот, которые в совокупности будут составлять микро- и макронеровности эксплуатационной территории [8, 11].

В ДВФО резкий перепад высот на общей линии одного склона варьирует в пределах 5–10°, протяженность перепада достигает более 50 м (табл. 2).

Таблица 2

**Распределение горных лесных склонов ДВФО по протяженности и перепаду высот**

Протяженность склона, м	Наличие по ДВФО (средние показатели), %	Перепады высот, %			
		Протяженность перепада до 50 м		Протяженность перепада более 50 м	
		До 5°	Более 5°	До 5°	Более 5°
До 200	15	14	8	1	1
До 400	42	28	7	11	3
До 600	24	23	11	9	6
До 800	13	24	13	10	8
1000 и более	9	25	15	12	10

В лесозаготовительной практике по перепаду высот принято выделять 3 основных вида рельефа (рис. 2): длинный склон, склон с гребнями и раздробленный склон.

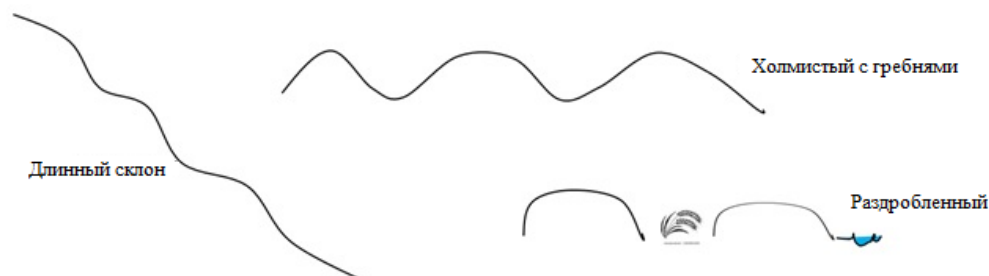


Рис. 2. Формы рельефа

Fig. 2. Relief forms

Труд вальщика леса, даже в равнинных лесах, физически тяжел и травмоопасен, а при работе на склонах тем более. В равнинных лесах России все большее распространение находит машинная заготовка древесины, которая при больших объемах работ и сплошных рубках спелых и перестойных насаждений оказывается выгоднее механизированной. Кроме того, наблюдается серьезный дефицит профессиональных вальщиков леса в связи с непрестижностью данной профессии у молодежи и тем, что многие опытные специалисты переучиваются на операторов лесных машин.

Машинная заготовка древесины на склонах имеет свои очевидные сложности как технические, так и технологические. Но альтернативы данному виду заготовки, даже в условиях крутых склонов, в настоящее время нет [7, 10].

Машинная валка деревьев на склонах возможна как сортиментными, так и хлыстовыми комплексами. При освоении лесосек на склонах наибольшую трудность представляет не валка деревьев, а их трелевка, причем она также входит в число наиболее опасных для экосистем леса операций [15, 18–23]. Лесозаготовители США и Канады применяют перемещение с лесосеки пакетов деревьев, сваленных валочно-пакетирующей машиной, вертолетами, но это, безусловно, очень затратный вариант.

Эксплуатация и техническое оснащение лесных машин в условиях работы на склоне имеют свои особенности. Как и в случаях работы на лесосеках со слабыми почвогрунтами, при работе на склонах колесные лесные машины надо оснастить правильным типом гусениц. Ведущие компании-производители машин для сортиментной заготовки – Ponsse, John Deere, Komatsu – предлагают технические решения, которые существенно повышают эффективность работы машин в таких условиях. Прежде всего, это установка специальной лебедки. Ponsse и John Deere по предварительному заказу оснащают уже готовые машины лебедками – на заводах, которые их производят. И, в принципе, такие лебедки могут быть установлены на весь модельный ряд машин этих компаний. У Komatsu лебедка интегрирована в трансмиссию, и машина собирается на заводе-производителе вокруг данной трансмиссии. Лебедочное оборудование является внутренней разработкой Komatsu, Ponsse и John Deere добавляют это оборудование к готовой машине.

Лебедка дает возможность зацепиться тросом за верх склона и помогает машине подниматься вдоль него, стабильно держит ее на уклоне, не дает пробуксовывать трансмиссии, позволяет экономить топливо. Длина троса у Ponsse составляет 350 м, у Komatsu на харвестерах – 325 м, на форвардерах – 425 м. Диаметр троса – 14–15 мм. Без лебедки машину оптимально эксплуатировать на уклонах до 25°. В случае оснащения гусеницами она может работать и на уклонах до 30°, но при этом начинают проворачиваться гусеницы, трансмиссия испытывает повышенную нагрузку, что приводит к увеличению расхода топлива, износа гусениц и колес, а также к существенному снижению производительности. При работе на склонах по сравнению с работой на равнине возрастает расход топлива. При использовании лебедки повышение расхода топлива значительно меньше, чем без нее.

Лебедка существенно помогает и при работе машин на склонах в зимний период, когда из-за снега и наледи склон становится еще и скользким.

Установка лебедки и другого дополнительного оборудования достаточно существенно удорожает и утяжеляет базовую машину, делает ее узкоспециализированной, и увеличивает срок получения машины с завода. Решить эту проблему позволяет инновационное решение от компании Ecoforst, которая создала концептуально новую модель самоходной лебедки для лесных машин T-Winch.

По функциональности технология T-Winch в значительной мере превосходит другие технические решения, существующие в настоящее время для заготовки леса на склонах. Благодаря своим габаритам T-Winch без труда доставляется к месту проведения работ автомобилем с повышенной проходимостью. Неоспоримым преимуществом является и то, что лебедки T-Winch способны работать с любой лесозаготовительной техникой без ее специальной подготовки для работы на склонах. Поэтому лесозаготовительные компании, в парке которых есть лесные машины (любой конструкции) без лебедок, успешно работают на склонах при помощи T-Winch.

Лебедки не имеют кабинов и управляются по радиоканалу. Для работы лебедок отдельный оператор не нужен: оператор лесной машины сам определяет тяговое усилие и управляет T-Winch из кабины.

*Объектом* исследования являются почвогрунты лесов на склонах. Используются справочные данные о физико-механических свойствах почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Применялись методы аппроксимации численных данных.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Оптимизация параметров процесса деформирования почвогрунта при статических и динамических нагрузках на него лесной машины или трелевочной системы направлена на минимизацию негативных последствий разрушения почвы в пределах заданных границ волока (трассы движения машины), сохранение корневой системы близко расположенного подроста, оставляемых на доразращивание деревьев.

Однако в процессе перемещения лесной машины, например при трелевке, трактор многократно изменяет направление движения и совершает поворотные маневры. Это обуславливает формирование дополнительных

касательных напряжений в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки.

Если трелевка осуществляется на склонах с углом наклона направления движения к линии горизонта  $\beta$ , то объемное напряженно-деформированное состояние краевой части массива в пределах глубины  $h$  будет трансформироваться в зависимости от углового параметра  $\beta$ . При этом надо учитывать расположение границы твердого основания мощностью  $H$ , ориентированной к линии горизонта в общем случае под углом  $\gamma \neq \beta$ , и тот факт, что в пределах зоны размером  $H-h$  осуществляется сжатие и деформирование массива почвогрунта.

Результаты математического моделирования и исследований отмеченных процессов при условии  $\gamma = \beta = 0$  (глубина зоны деформации  $H-h$  не зависит от угловых параметров) подробно изложены в работах [6, 9, 13, 14, 16, 17 и др.].

Воспользуемся установленным [13] соотношением для определения нормальной нагрузки (среднего давления)  $q$  при деформировании слоя грунта размером  $h$ :

$$q = \frac{E H k(r, h)}{k_\phi R} \left( \frac{1}{\operatorname{arctg} H/R} - \frac{1-h/H}{\operatorname{arctg} \frac{H-h}{R}} \right), \quad (1)$$

где  $E$  – модуль деформации;  $k(r, h)$  – безразмерная функция, учитывающая снижение напряжений на глубине зоны деформаций  $h$  по мере удаления расчетной точки от границы волокна на величину  $r$ ,  $k(r, h) = 1,0461 - 0,9145r/h$ ;  $k_\phi$  – коэффициент, отражающий увеличение общей деформации грунта при погружении ядра уплотнения,  $k_\phi = \operatorname{tg}^{-5/3} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$ ;  $\phi$  – угол внутреннего трения;  $R$  – параметр

штампа, определяемый через величины  $a$  и  $D$ ,  $R = aD$ ;  $a = 1 + \frac{b}{H}$ ;  $D$  – диаметр круга, равный площади  $F$  грунтозацепа;  $b$  – ширина штампа.

Массив грунта мощностью  $H-h$ , т. е. за пределами сжатия слоя  $h$ , находится в объемном напряженном состоянии. Пусть лесная машина или трелевочная система весом  $Q_b$  оказывает вертикальное давление на почвогрунт. Точку приложения силы тяжести  $Q_b$  примем за начало системы координат, ось ординат  $y$  направим вдоль плоскости склона, ось абсцисс  $x$  – перпендикулярно оси  $y$ , а ось аппликат  $z$  – в глубь массива перпендикулярно плоскости склона.

Тогда (рис. 3) сила  $Q = Q_b \cos \beta$  действует в направлении оси  $z$ , процесс деформирования почвогрунта под действием этой силы происходит в пространственной декартовой системе координат  $xuz$ , оси которой принимаются главными, а на элементарных площадках массива действуют соответствующие главные напряжения  $\sigma_1 = \sigma_z$ ;  $\sigma_2 = \sigma_y$ ;  $\sigma_3 = \sigma_x$ , тогда как касательные напряжения отсутствуют.

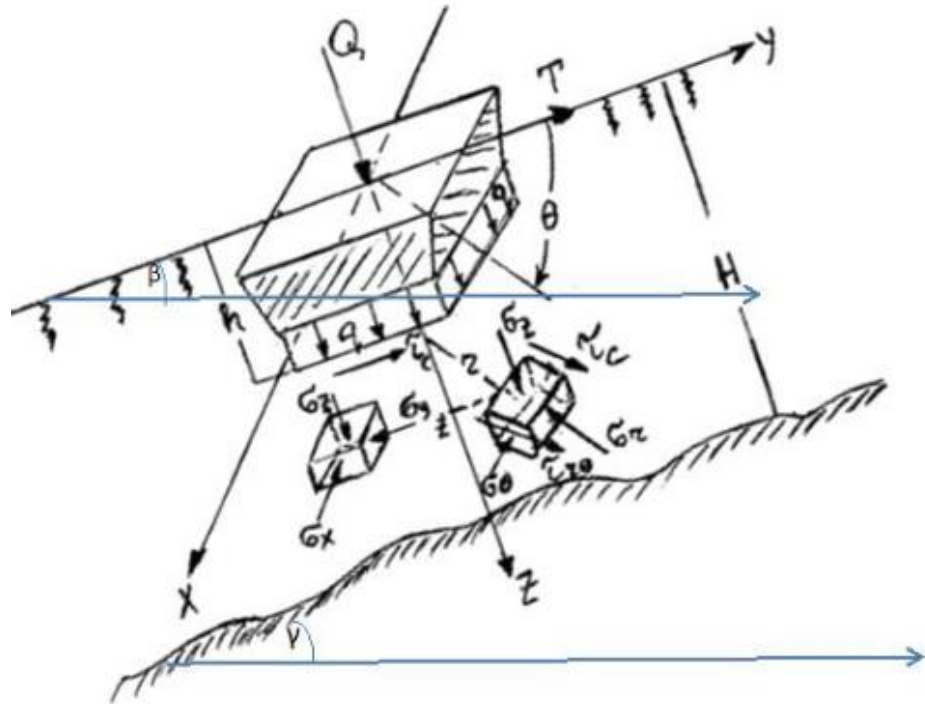


Рис. 3. Схема деформирования краевой части массива почвогрунта  
Fig. 3. Scheme of deformation of the soil array edge part

К штампу кроме силы  $Q$  приложена касательная сила  $T$  тяги трактора, вследствие чего почвогрунт деформируется в направлении действия этой силы. В итоге в плоскости склона вдоль оси  $y$  действует нагрузка  $\tau_c$  удельного сопротивления почвогрунта срезу, связанная с нагрузкой  $q$  посредством силы сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  уравнением обобщенного закона Кулона.

В момент маневра трактора и его отклонения от заданного направления движения на угол  $\theta$  деформирование почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат  $zr\theta$ . Компоненты тензора напряжений в этой системе в общем случае при наличии касательных напряжений  $\tau_{r\theta}$ , совпадающих по направлению с действием нагрузки  $\tau_c$ , определяются соотношениями:

$$\sigma_z = \sigma_1; \quad \sigma_r = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta;$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta.$$

Из данных соотношений следует, что при  $\theta = 0$  компоненты тензора напряжений являются главными, т. е.:

$$\sigma_z = \sigma_1; \quad \sigma_r = \sigma_2; \quad \sigma_\theta = \sigma_3; \quad \tau_{r\theta} = 0.$$

Эти напряжения будут определяться соотношениями:

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



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

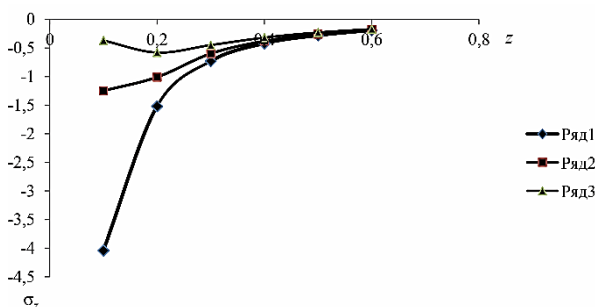
$$\sigma_\theta = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[ -\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] + z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right\}, \quad (2, в)$$

где  $\nu$  – коэффициент бокового расширения (коэффициент Пуассона).

На рис. 3 при  $\beta = 10^\circ$  представлены зависимости  $\sigma_z(z)$  при трех значениях компоненты  $r$ : 0,05; 0,1; 0,2 м. Исходные данные расчетов:  $Q_b = 150$  кН.

Рис. 4. Зависимость вертикального напряжения  $\sigma_z$  от координаты  $z$  при  $r$ , равном: 1 – 0,05 м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,2 м

Fig. 4. Dependence of the vertical stress  $\sigma_z$  on the  $z$  coordinate at  $r$  equal to: 1 – 0.05 m; 2 – 0.1 m; 3 – 0.2 m



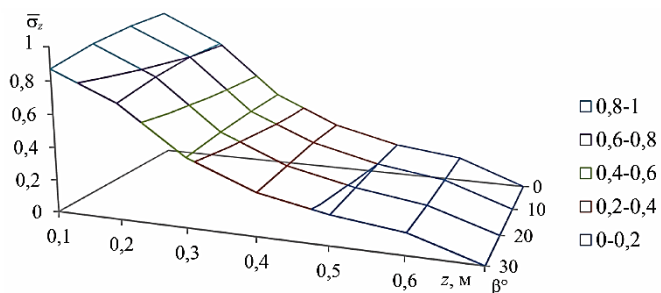
Графические данные рис. 4 показывают, что с удалением от точки приложения нагрузки в плоскости склона, т. е. с ростом  $r$ , напряжения в ряде случаев кратно снижаются. Необходимо при этом отметить, что при  $r \rightarrow 0$ , т. е. в рамках рассмотрения одномерной модели процесса деформирования почвогрунта в непосредственной близости от штампа, снижение вертикальных напряжений  $\sigma_z$  подчиняется степенному закону и, как следует из уравнения (2, а), происходит пропорционально величине  $\frac{1}{z^2}$ .

Зафиксируем координату  $r = 0,1$  м и примем максимальное значение компоненты  $\sigma_z$  на поверхности склона за 1. Угловой параметр  $\beta$  изменяем в пределах от 0 до  $30^\circ$ . Исследуем совместное влияние  $\beta$  и координаты  $z$  на характер снижения относительных напряжений  $\bar{\sigma}_z$  (рис. 5).

На рис. 5 отражено изменение  $z$  от 0,1 до 0,6 м (ось абсцисс),  $\beta$  от 0 до  $30^\circ$  (ось ординат). Относительные напряжения отложены на оси аппликат.

Рис. 5. График совместного влияния угла  $\beta$  и координаты  $z$  на относительное вертикальное напряжение

Fig. 5. Graph of the joint effect of the angle  $\beta$  and the  $z$  coordinate on the value of the relative vertical stress



Анализ данных рис. 5 свидетельствует о том, что изменение  $z$  в заданных пределах обуславливает снижение относительных напряжений в 5–6 и более раз, тогда как изменение угла  $\beta$  – не более чем на 16 %.

Из соотношений (2, б) и (2, в) при  $z = 0$  (поверхность склона) следует, что при совершении маневра лесной машиной или трелевочной системой на угол  $\theta$  одно из трех максимальных касательных напряжений можно выразить как:

$$\sigma_{\max} = 0,5(\sigma_r - \sigma_\theta) = Q(1 - 2\nu) / \{2\pi r^2 \cos\theta\}.$$

На рис. 6 представлены результаты расчетов влияния параметров отклонения трактора от направления движения  $r$ , м, и угла поворота  $\theta^\circ$  на  $\sigma_{\max}$ , МПа.

Так, при  $r = 0,05$  м увеличение угла  $\theta$  от 0 до  $30^\circ$  приводит к росту  $\sigma_{\max}$  на 15–16 %, тогда как при  $r = 0,6$  м – к росту уже на 33–34 %. Этот результат позволяет заключить, что, несмотря на существенно меньшие абсолютные значения  $\sigma_{\max}$ , в более удаленных от направления трассы участках почвогрунта влияние маневра трактора превосходит его влияние на участках в непосредственной близости от места приложения нагрузки. При достижении  $r$  значений 0,15–0,2 м  $\sigma_{\max}$  кратно уменьшается по сравнению с максимальными значениями.

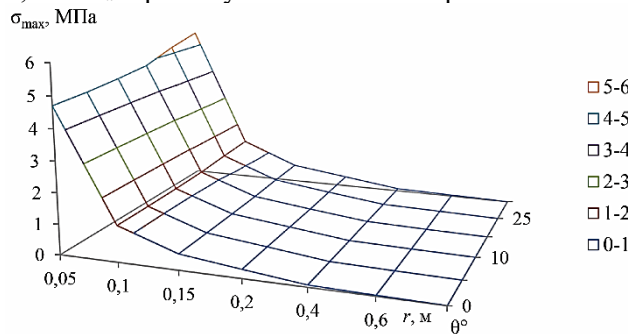


Рис. 6. Зависимость максимального касательного напряжения  $\sigma_{\max}$  от координаты  $r$  и угла поворота трактора  $\theta$

Fig. 6. Dependence of the maximum shear stress  $\sigma_{\max}$  on the  $r$  coordinate and the tractor rotation angle  $\theta$

Связь  $\sigma_z$  с нормальной нагрузкой  $q$ , согласно [6], описывается с помощью зависимости

$$\sigma_z = \frac{q}{1 + (z/aD)^2}. \quad (3)$$

Как следует из (3), при  $z = 0$   $\sigma_z = q$ .

Для определения нагрузки  $q$  можно использовать соотношение (1), в котором геометрические параметры  $h$  и  $H$  необходимо скорректировать путем умножения на коэффициент  $K_\Delta = \cos\Delta$ , где  $\Delta = \beta - \gamma$ . В силу четности функции косинуса знак углового приращения  $\Delta$  не имеет значения. Нагрузка  $q$  рассчитана при следующих исходных данных:  $Q_b = 150$  кН;  $F = 0,24$  м<sup>2</sup>;  $H = 0,5$  м;  $b = 0,4$  м;  $E = 400$  кПа;  $a = 1,8$  м;  $D = 0,28$  м. Угловые параметры  $\beta$  и  $\gamma$  изменялись от 0 до  $30^\circ$ .

Радиальную компоненту  $\sigma_r$ , исходя из моделей деформации грунта с внутренним трением [14–17], можно связать с вертикальной компонентой  $\sigma_z$  соотношением

$$\sigma_r = \alpha; \quad \sigma_z = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_z, \quad (4)$$

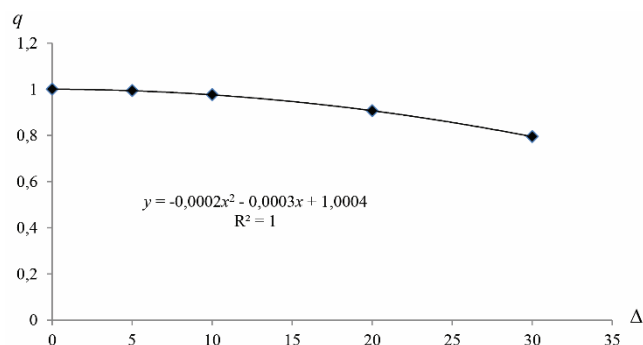
где  $\alpha$  – коэффициент бокового распора.

Для дальнейшего использования соотношений (3) и (4) была проведена оценка зависимости вертикальной нагрузки  $q$  от размера деформируемого слоя  $h$ . Показано, что  $q(h)$  хорошо описывается логарифмическими, т. е. асимптотическими зависимостями, причем при значениях  $h < 0,15$  м влияние соотношения угловых параметров не является существенным. По мере приближения  $h$  к 0,3 м отличие значения  $q$  от исходного достигает 20–25 %, т. е. учитывать

угловые параметры поверхности склона и границы твердого основания необходимо. Этот вывод иллюстрируется при представлении значений  $q$  в относительном виде (рис. 7).

Рис. 7. Влияние углового параметра  $\Delta$  на относительную вертикальную нагрузку

Fig. 7. Effect of the angular parameter  $\Delta$  on the value of the relative vertical load



Если максимальное значение  $q$  принять за 1, то график безразмерной функции  $q$  от  $\Delta$  при фиксированном значении  $h = 0,15$  м показывает, что до уровня  $\Delta = 10\text{--}15^\circ$  влияние угловых параметров на нагрузку незначительно. При больших угловых отклонениях  $q$  снижается до 20 %.

Основываясь на соотношениях (3) и (4), считая в качестве критерия разрушения массива почвогрунта предельное состояние, при котором одно из трех максимальных сдвиговых напряжений  $\sigma_{\max} = 0,5(\sigma_z - \sigma_r)$  превышает предел прочности почвогрунта на сдвиг  $\sigma_{\text{сд}}$ , установим предельную вертикальную координату  $z$  – глубину зоны разрушения, которую можно принять в качестве глубины  $h_k$  образованной колеи:

$$h_k = R \sqrt{\frac{q(1-2\nu)}{2\sigma_{\text{сд}}(1-\nu)} - 1}. \quad (5)$$

На рис. 8 представлена зависимость  $h_k$ , м, от  $q$ , кПа, при двух значениях углового соотношения:  $\Delta = 20^\circ$  (кривая 1) и  $0^\circ$  (кривая 2).

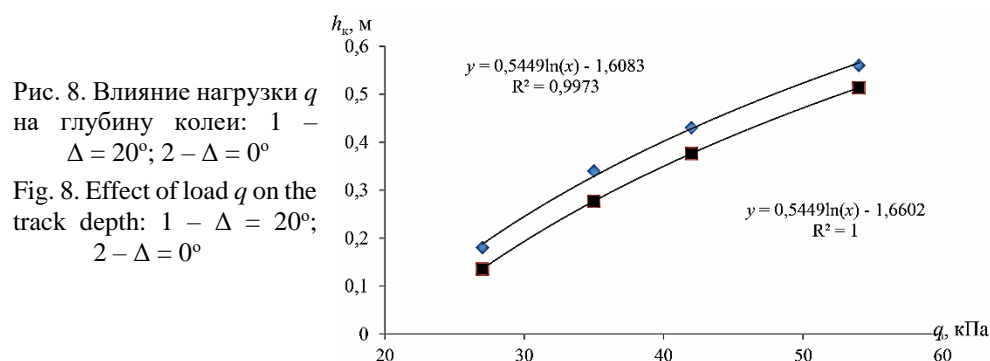


Рис. 8. Влияние нагрузки  $q$  на глубину колеи: 1 –  $\Delta = 20^\circ$ ; 2 –  $\Delta = 0^\circ$

Fig. 8. Effect of load  $q$  on the track depth: 1 –  $\Delta = 20^\circ$ ; 2 –  $\Delta = 0^\circ$

Как видим, кривые на рис. 8 являются эквидистантными и удаленными друг от друга на постоянную величину, равную 0,05 м.

Анализ графика на рис. 8 и зависимость  $h_k \sim \sqrt{q}$  в соответствии с формулой (5) показывают, что при предельном 20 %-м снижении вертикальной нагрузки  $q$  относительное уменьшение глубины колеи не превышает 10 %.

Вместе с тем не учитывать даже этот результат в сложных климатических условиях межсезонных работ неверно.

### Заключение

На крутых склонах современные харвестеры и форвардеры фирмы Ponsse могут эффективно работать и при углах  $\beta$ , достигающих  $41^\circ$ , но при условии оснащения лебедкой типа Synchronwinch. Без лебедки условия работы ограничены углом в  $30^\circ$ .

Для таких крутых склонов была произведена оценка снижения вертикальной нагрузки  $q$ , которая достигает 52–55 %, на грунт. Расчеты показали, что максимально возможное снижение глубины колеи 22–23 %, это является существенным показателем взаимодействия лесной машины или трелевочной системы с почвогрунтом при условии его устойчивости в экстремальных условиях разработки лесосеки.

Таким образом, исследования позволяют сделать вывод о том, что при проведении лесосечных работ на склонах, в первую очередь крутых с углами наклона, превышающими  $20\text{--}25^\circ$ , необходимо корректировать определение предельной нагрузки трелевочной системы на почвогрунт и прогноз глубины образованной в процессе их взаимодействия колеи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В. Перспективность внедрения и эксплуатации современных аэростатных систем трелевки // Наука – Хабаровскому краю: материалы 8-го краевого конкурса-конф. молодых ученых и аспирантов (секция техн. наук). Хабаровск: ТОГУ, 2006. С. 144–154. Abuzov A.V. Prospects for the Introduction and Operation of Modern Balloon Skidding Systems. *Science to Khabarovsk Krai: Proceedings of the 8th Regional Competition-Conference of Young Scientists and Postgraduate Students (Section of Engineering Sciences)*. Khabarovsk, PNU Publ., 2006, pp. 144–154.
2. Абузов А.В. Альтернативные транспортные системы как направление рационального лесозаготовительного процесса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Вологда: ВоГТУ, 2012. С. 60–63. Abuzov A.V. Alternative Transport Systems as a Direction of Rational Logging Process. *Current Issues of the Forest Complex Development*. Vologda, VSTU Publ., 2012, pp. 60–63.
3. Абузов А.В. Основные технологические направления по освоению горных лесов Дальневосточного региона // Вестн. ТОГУ. 2013. № 3(30). С. 91–100. Abuzov A.V. The Basic Technological Directions on the Development of Mountain Forests of the Far East Region. *Vestnik TOGU [Bulletin of PNU]*, 2013, no. 3(30), pp. 91–100.
4. Абузов А.В., Григорьев И.В. Конструктивные особенности канатных лесотранспортных систем на мягких пневматических опорах // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 1(37). С. 86–95. Abuzov A.V., Grigoryev I.V. Design Features of Cable Forestry Systems on Soft Pneumatic Supports. *Lesotekhnicheskij zhurnal [Forestry Engineering Journal]*, 2020, vol. 10, no. 1(37), pp. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/9>
5. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока. Хабаровск: ТОГУ, 2013. 199 с. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Balloon Transport for Mountain Logging in the Far East*. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 199 p.
6. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 183 с. Ageykin A.S. *All-Terrain Wheeled and Combined Propulsors*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1972. 183 p.

7. Адамов Д.В., Любавский Н.А., Галактионов О.Н., Кузнецов А.В. К вопросу моделирования и оценки взаимодействия траков съёмных гусениц противоскольжения с грунтом // *Международ. журн. приклад. и фундам. исследований*. 2018. № 1. С. 11–15. Adamov D.V., Lyubavskiy N.A., Galaktionov O.N., Kuznetsov A.V. Simulation and Evaluation of Interaction of the Anti-Sliding Removable with Ground. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2018, no. 1, pp. 11–15.

8. Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Перфильева В.И., Щербаков И.П. Основные особенности растительного покрова Якутской АССР. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 156 с. Andreyev V.N., Galaktionova T.F., Perfil'yeva V.I., Shcherbakov I.P. *Main Features of Vegetation Cover of the Yakut ASSR*. Yakutsk, YaF SO AN SSSR Publ., 1987. 156 p.

9. Анисимов Г.М., Большаков Б.М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: ЛТА, 1998. 106 с. Anisimov G.M., Bol'shakov B.M. *Fundamentals of Minimizing Soil Compaction by Skidding Systems*. Saint Petersburg, LTA Publ., 1998. 106 p.

10. Галактионов О.Н. Методика расчета площади пятна контакта шины лесозаготовительной машины // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3, № 4-1(15-1). С. 24–27. Galaktionov O.N. Methods of Determining the Area of the Tire Contact Patch Logging Machines. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2015, vol. 3, no. 4-1(15-1), pp. 24–27. DOI: <https://doi.org/10.12737/13878>

11. Карпачев С.П., Шевелев И.Л., Щербаков Е.Н. Технология механизированных лесозаготовок на крутых склонах // *Лесопромышленник*. 2012. № 4(64). С. 26–29. Karpachev S.P., Shevelev I.L., Shcherbakov E.N. Technology of Mechanized Logging on Steep Slopes. *Lesopromyshlennik* [The Timber Industry Worker], 2012, no. 4(64), pp. 26–29.

12. Рябухин П.Б., Казаков Н.В., Абузов А.В. Анализ состояния и перспектив развития лесопромышленного комплекса Дальневосточного федерального округа. Хабаровск: ТОГУ, 2013. 207 с. Ryabukhin P.B., Kazakov N.V., Abuzov A.V. *Analysis of the State and Prospects for the Timber Industry Complex Development of the Far Eastern Federal District*. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 207 p.

13. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // *Актуальные проблемы современной науки*. 2006. № 3(29). С. 301–309. Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V., Zhukova A.I. Features of Soil Dynamic Compaction under Its Cyclic Loading. *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki*, 2006, no. 3(29), pp. 301–309.

14. Шапиро В.Я., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Григорьев М.Ф. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2018. № 1. С. 61–69. Shapiro V.Ya., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V., Grigor'ev M.F. Theoretical Study of the Soil Mass Destruction Process by Spherical Knives when Using Combined Forest Fire-Fighting Soil-Thrower Constructions. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 1, pp. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.61>

15. Contreras M.A., Parrott D.L., Chung W. Designing Skid-Trail Networks to Reduce Skidding Costs and Soil Disturbance for Ground-Based Timber Harvesting Operations. *Forest Science*, 2016, vol. 62, iss. 1, pp. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.5849/forsci.14-146>

16. Di Gironimo G., Balsamo A., Esposito G., Lanzotti A., Melemez K., Spinelli R. Simulation of Forest Harvesting Alternative Processes and Concept Design of an Innovative Skidding Winch Focused on Productivity Improvement. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2015, vol. 39, pp. 350–359. DOI: <https://doi.org/10.3906/tar-1408-64>

17. d'Oliveira M.V.N. Artificial Regeneration in Gaps and Skidding Trails after Mechanized Forest Exploitation in Acre, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 127, iss. 1-3, pp. 67–76. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00117-6)
18. Gilanipoor N., Najafi A., Heshmat Alvaezin S.M. Productivity and Cost of Farm Tractor Skidding. *Journal of Forest Science*, 2012, vol. 58, no. 1, pp. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.17221/4804-JFS>
19. Glazar K., Maciejewska M. Ecological Aspects of Wood Harvesting and Skidding in Pine Stands with Use Different Technologies. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 2009, vol. 8, pp. 5–14.
20. Jourgholami M. Effects of Soil Compaction on Growth Variables in Cappadocian Maple (*Acer cappadocicum*) Seedlings. *Journal of Forestry Research*, 2018, vol. 29, pp. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0491-7>
21. Kremers J., Boosten M. *Soil Compaction and Deformation in Forest Exploitation*. Wageningen, Netherlands, Stichting Probos, 2018. 53 p.
22. Rudov S., Grigorev I., Kunickaya O., Ivanov N., Kremleva L., Myuller O., Hertz E., Chemshikova Yu., Teterleva E., Knyazev A. Method of Variational Calculation of Influence of the Propulsion Plants of Forestry Machines upon the Frozen and Thawing Soil Grounds. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2019, vol. 28, no. 9, pp. 179–197.
23. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunickaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific Features of Influence of Propulsion Plants of the Wheel-Tyre Tractors upon the Cryomorphic Soils, Soils, and Soil Grounds. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, iss. 1, pp. 2052–2071.