

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6443

Статья

## **Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным двигателем на почвогрунты на склонах**

**До Туан Ань**

*преподаватель, Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства (Социалистическая Республика Вьетнам), [anhdo.dhln@gmail.com](mailto:anhdo.dhln@gmail.com)*

**Григорьев Глеб Владимирович**

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), [vtl-lta@mail.ru](mailto:vtl-lta@mail.ru)*

**Каляшов Виталий Анатольевич**

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

**Новгородов Дьулус Васильевич**

*аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), [novgorodov\\_dulus@mail.ru](mailto:novgorodov_dulus@mail.ru)*

**Григорьева Ольга Ивановна**

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), [grigoreva\\_o@list.ru](mailto:grigoreva_o@list.ru)*

**Хитров Егор Германович**

*доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Российская Федерация), [yegorkhitrov@gmail.com](mailto:yegorkhitrov@gmail.com)*

*Получена: 4 июня 2022 / Принята: 12 декабря 2022 / Опубликовано: 15 декабря 2022*

---

**Аннотация:** При работе на склонах колёсные лесные машины (харвестеры, форвардеры, скиддеры) со встроенными в трансмиссию лебёдками обычно оснащаются съёмными гусеницами для повышения устойчивости и эффективности работы. При разработке горных склонов системами машин, включающими специальные самоходные лебёдki, даже на крутых склонах эффективно работают гусеничные валочно-пакетирующие машины. Поэтому

изучение процесса воздействия лесных машин с гусеничным двигателем на почвогрунты горных лесосек является достаточно актуальным. Представленная работа посвящена экспериментальной проверке в лабораторных условиях положений ранее выполненных теоретических исследований. С учётом полученных результатов на настоящем этапе изучения планировалось проведение экспериментальных исследований, основываясь при моделировании на геометрическом подобии (1:15, коэффициент для пересчёта линейных параметров  $k = 15$ ). Оригинальный лабораторный стенд был собран на кафедре «Технология и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета. В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных установлено, что отклонения теоретических значений несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного двигателя, не превышают границ, связанных с погрешностями экспериментального определения данной величины. Отклонения находятся в пределах 13 %. Отклонения теоретических значений допустимого среднего давления гусеничного двигателя на почвогрунт не превышают границ, связанных с погрешностями экспериментального определения данной величины. Отклонения находятся в пределах 14 %.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования; горные леса; давление двигателя; лесосечные работы; трелёвка; почвогрунты

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6443

Article

## **Methodology and results of experimental studies of the impact of forest machines with a tracked mover on the soils of slopes**

**Do Tuan An'**

*lecturer, Vietnam National University of Forestry (Socialist Republic of Vietnam),  
anhdo.dhln@gmail.com*

**Gleb Grigorev**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), vtl-lta@mail.ru*

**Vitalij Kalyashov**

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

**D'ulus Novgorodov**

*Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation),  
novgorodov\_dulus@mail.ru*

**Olga Grigoreva**

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

**Egor Hitrov**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com*

*Received: 4 June 2022 / Accepted: 12 December 2022 / Published: 15 December 2022*

---

**Abstract:** When working on slopes, wheeled forest machines (harvesters, forwarders, skidders) with winches built into the transmission are usually equipped with removable tracks to improve stability and operating efficiency. When machine systems including special self-propelled winches operate on even on steep slopes, tracked feller-buncher machines work effectively. Therefore, to study the forest machines with caterpillar mover impact on the soils of mountain logging sites is quite relevant. The presented work is focused on laboratory experimental verification of previously performed

theoretical research results. Taking into account the obtained results, at the present stage of the research it was planned to perform experimental research based on geometrical simulation (1:15, the coefficient for recalculation of linear parameters  $k=15$ ). The original laboratory testing unit was assembled at the Department "Technology and equipment of forestry complex" of the Arctic State Agrotechnological University. As a result of statistical processing of the experimental data obtained it was found that deviations of theoretical values of the soil bearing capacity under the influence of the tracked mover were within 13% and did not exceed the limits associated with errors in the experimental determination of this value. Deviations of theoretical values of permissible average pressure of the tracked mover on the ground were within 14% and did not exceed the limits related to the errors of experimental determination of this value.

**Keywords:** experimental research; mountain forests; mover pressure; logging; skidding; soils

---

## 1. Введение

В ходе теоретических исследований были получены зависимости для обоснования параметров гусеничных машин, работающих на крутых склонах. С их использованием проводится расчёт глубины образующейся колеи, тягово-сцепных свойств движителей с учётом соотношения сторон пятна контакта с почвогрунтом, усилия, необходимого для буксировки машины лебёдкой на крутых склонах. Зависимости базируются на оценке несущей способности почвогрунта с учётом угла склона и среднего давления движителя. Важно отметить, что уравнения для оценки тягово-сцепных свойств по зависимости глубины колеи от среднего давления движителя, с учётом несущей способности почвогрунта и геометрии пятна контакта, были подтверждены ранее. В этой связи необходима экспериментальная проверка:

1. Уравнений для расчёта несущей способности почвогрунта с учётом ослабления, вызванного отклонением результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности.
2. Уравнений для расчёта допустимого среднего давления движителя гусеничной машины, работающей на склоне, с учётом его угла и геометрических параметров пятна контакта.

## 2. Материалы и методы

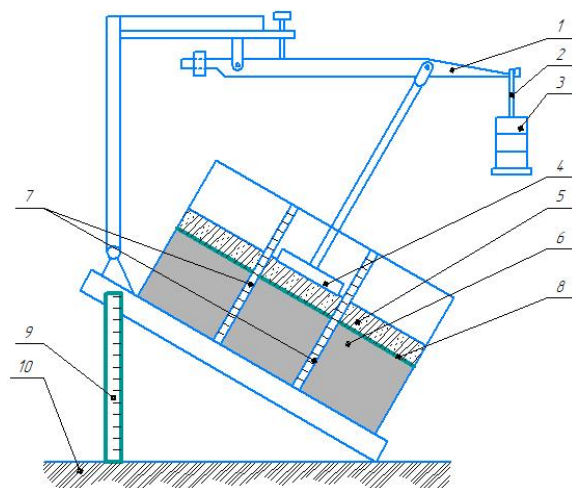
Лабораторные экспериментальные исследования выполнены на оригинальном стенде. Также использованы справочные данные о физико-механических свойствах почвогрунтов. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных выполнена по стандартным методикам.

## 3. Результаты

При разработке плана и методики экспериментальных исследований были внимательно изучены опыт и рекомендации коллег по полевым и лабораторным исследованиям воздействия движителей лесных машин на почвогрунты лесосек в равнинных условиях [1—7]. Также были проанализированы экспериментальные подходы к верификации математических моделей статического и динамического воздействия движителей лесных машин на почвогрунты лесосек в равнинных условиях [8—17]. Были учтены результаты исследований режимов работы современных трансмиссий лесных машин с гусеничным движителем [18—23], а также специфика работы лесных машин на склонах гор и сопок [24]. При этом при организации экспериментов результативно использованы положения теории подобия, что позволило снизить число трудоёмких полевых опытов и погрешность измерения экспериментальных величин за счёт использования более точного лабораторного оборудования. С учётом ранее полученных теоретических результатов [25], [26] на настоящем этапе исследования планировалось проведение экспериментальных

исследований в лабораторных условиях, основываясь при моделировании на геометрическом подобии.

Схема лабораторного стенда приведена на рисунке 1. Обоснование параметров модели осуществлялось исходя из геометрического подобия (1:15, коэффициент для пересчёта линейных параметров  $k = 15$ ). Соотношение сторон пятна контакта, как было принято в теоретических исследованиях, для гусеничного движителя составляет  $l/b = 5$ . Максимальный вес груза  $Q$  изменялся с учётом площади штампа  $F$  так, чтобы обеспечить оценку максимального давления  $p$  не менее 0,3 МПа.



**Рисунок 1.** Лабораторный стенд для определения допустимого давления штампа и несущей способности почвогрунта на склоне: 1 — рычаг; 2 — навеска; 3 — груз; 4 — штамп; 5 — верхний слой (щепа); 6 — слой грунта; 7 — линейки; 8 — металлическая пластина; 9 — планка для выставления наклона платформы; 10 — основание (стол)

**Figure 1.** Laboratory testing unit for determining the permissible pressure of the die and the bearing capacity of the soil on the slope: 1 — lever; 2 — hinge; 3 — load; 4 — die; 5 — top layer (chips); 6 — soil layer; 7 — rulers; 8 — metal plate; 9 — bar for setting platform slope; 10 — base (table)

В таблице 1 указаны геометрические параметры лабораторных штампов, использованных в опытах, основные соотношения лабораторной модели и параметров движителя в натуральном масштабе. Опыты проведены в лаборатории условиях кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» АГАТУ. Предварительно почвогрунт на участках, где отбирали керны, классифицировали по категориям прочности на основе результатов зондирования. Для образцов почвогрунта по стандартным методикам определяли угол внутреннего трения  $\varphi$  и удельное сцепление частиц почвогрунта  $C$  по стандартной методике. Переменными факторами являлись:

- усилие, с которым штамп воздействовал на почвогрунт (определялось исходя из соотношения плеч рычага 1 : 10 и веса эталонного груза);
- геометрические параметры штампа (таблица 1);
- уклон наклона поверхности почвогрунта, на который воздействовал штамп ( $\beta = 0^0, 15^0, 30^0$ ).

**Таблица 1.** Основные параметры лабораторной модели

**Table 1.** Main parameters of the laboratory model

Параметр	Штамп		
	1	2	3
$k$	15	15	15
$b_{\text{лаб}}, \text{ м}$	0,03	0,04	0,05
$l_{\text{лаб}}, \text{ м}$	0,15	0,2	0,25
$F_{\text{лаб}}, \text{ М}^2$	0,0045	0,008	0,0125
$Q_{\text{max}}, \text{ Н}$	140	240	380
$b, \text{ м}$	0,45	0,6	0,75
$F, \text{ М}^2$	1,0125	1,8	2,8125
$p_{\text{max}}, \text{ МПа}$	0,311	0,300	0,304

Толщина слоя почвогрунта  $H_{\text{пг}}$  составляла не менее 40 см, чтобы обеспечить условие  $H_{\text{пг}} \gg 2b$ . Ширина лотка с грунтом  $B_{\text{пг}}$  составляла 30 см, таким образом,  $B_{\text{пг}} \gg 2b$ . Длина лотка  $L_{\text{пг}}$  составляла 60 см.

Экспериментальный грунт  $b$  требуемого объема размещали в лотке (см. рисунок 1). Вес эталонного груза  $3$  через рычаг  $1$  передавался на штамп  $4$ . Далее нагрузка прикладывалась ступенями, в зависимости от категории прочности почвогрунта. По результатам измерения перемещений штампа  $h_{\text{лаб},i}$  в зависимости от среднего давления  $p_i$  для экспериментального почвогрунта получали зависимости  $h_{\text{лаб}}(p)$ , по которым, в свою очередь, оценивали значения допустимого давления  $p_{\text{adm}}$  и несущей способности  $p_s$  (пример на рисунке 2).

Для определения  $p_{\text{adm}}, p_s$  использовали линейную интерполяцию (для  $p_{\text{adm}}$  по двум соседним узлам при  $h_{\text{лаб},i} \leq 0,2 \text{ м}, h_{\text{лаб},i+1} > 0,2 \text{ м}$ ; для  $p_s$  по узлам  $h_{\text{лаб},i-2}, h_{\text{лаб},i-1} \leq 2B$  м при  $h_{\text{лаб},i} > 2B$ ):

$$p_{\text{adm}} = \frac{p_{i+1} \left( \frac{0,2}{k} - h_{\text{лаб},i} \right) - p_i \left( \frac{0,2}{k} - h_{\text{лаб},i+1} \right)}{h_{\text{лаб},i+1} - h_{\text{лаб},i}}, \quad (1)$$

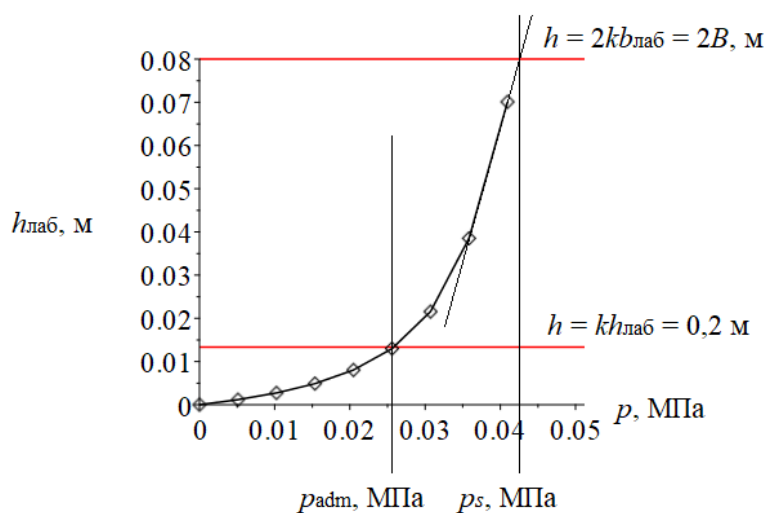
$$p_s = \frac{p_{i-1} \left( \frac{2B}{k} - h_{\text{лаб},i-2} \right) - p_{i-2} \left( \frac{2B}{k} - h_{\text{лаб},i-1} \right)}{h_{\text{лаб},i-1} - h_{\text{лаб},i-2}} \quad (2)$$

Проверка согласования результатов теоретических и экспериментальных исследований проводилась с учётом максимальных абсолютных погрешностей измерения экспериментальных величин:

$$\overline{\Delta_{p_{adm}}} = \left| \frac{\partial p_{adm}}{\partial C} \right| \overline{\Delta_C} + \left| \frac{\partial p_{adm}}{\partial \varphi} \right| \overline{\Delta_\varphi} + \left| \frac{\partial p_{adm}}{\partial b} \right| \overline{\Delta_b} + \left| \frac{\partial p_{adm}}{\partial \beta} \right| \overline{\Delta_\beta}, \quad (3)$$

$$\overline{\Delta_{p_s}} = \left| \frac{\partial p_s}{\partial C} \right| \overline{\Delta_C} + \left| \frac{\partial p_s}{\partial \varphi} \right| \overline{\Delta_\varphi} + \left| \frac{\partial p_s}{\partial b} \right| \overline{\Delta_b} + \left| \frac{\partial p_s}{\partial \beta} \right| \overline{\Delta_\beta}, \quad (4)$$

где верхний штрих означает максимальную границу погрешности (половина цены деления измерительного прибора), интервал изменения  $C$ ,  $\varphi$ ,  $b$ ,  $\beta$  изменяется в соответствии с физико-механическими свойствами почвогрунта в опыте и условиями его проведения.



**Рисунок 2.** Кривая осадки лабораторного штампа

**Figure 2.** Deposition curve of the laboratory die

В таблице 2 приведены результаты экспериментов по определению допустимого давления  $p_{adm}$  и несущей способности  $p_s$  образцов почвогрунта, отнесённого к III категории прочности (слабонесущий почвогрунт). В таблице также приведены результаты расчёта теоретических значений  $p_s$  и  $p_{adm}$  [25], [26].

Аналогичные сведения для почвогрунта II (средней прочности) и I (прочный почвогрунт) категорий прочности приведены в таблицах 3, 4. С учётом изменения физико-механических свойств почвогрунта по формулам (3), (4) получены верхние оценки абсолютной



и относительной погрешностей измерения экспериментальных величин  $p_s$ ,  $p_{adm}$ , представленные в таблице 5. При расчёте приняты погрешности определения  $\overline{\Delta_C} = 0,5$  кПа,  $\overline{\Delta_\varphi} = 0,5^\circ$ ,  $\overline{\Delta_\beta} = 2,5^\circ$ ,  $\overline{\Delta_B} = 15 \cdot 0,0005$  м.

Согласование теоретических и экспериментальных данных удобно проиллюстрировать графиками. На рисунках 3—14 представлены результаты сопоставления расчётных и опытных значений допустимого среднего давления движителя и несущей способности для трёх исследованных категорий почвогрунтов. Пунктирными линиями на графиках нанесены границы изменения величин с учётом полученных выше верхних оценок погрешностей определения экспериментальных значений.

**Таблица 2.** Результаты определения физико-механических и прочностных свойств слабонесущего почвогрунта и допустимого среднего давления штампа (III категория прочности)

**Table 2.** Physical-mechanical and strength properties of weakly bearing soil and permissible average die pressure (strength category III)

№	$C$ , кПа	$\varphi$ , °	$B$ , м	$\beta$ , °	$p_{adm}^{эксп}$ , кПа	$p_{adm}^{теор}$ , кПа	$p_s^{эксп}$ , кПа	$p_s^{теор}$ , кПа
1	5,9	12	0,75	15	26,12	27,16	50,52	49,25
2	5,5	12	0,6	0	25,08	27,03	50,3	49,45
3	6,7	12	0,45	15	24,53	26,62	49,58	53,43
4	6,6	12	0,6	0	27,28	31,32	57,77	52,69
5	5,7	12	0,6	15	23,47	24,8	46,39	40,95
6	6	12	0,6	0	31,23	28,98	53,7	47,21
7	8	13	0,75	30	33,94	32,54	59,88	67,67
8	5,8	12	0,45	30	20,17	20,66	39,08	34,27
9	6,2	12	0,75	30	25,74	24,8	46,4	44,76
10	6,8	13	0,45	0	28,81	32,28	59,43	61,1
11	5,5	12	0,6	15	23,98	24,1	45,17	45,62
12	9,1	13	0,6	15	38,23	39,15	71,25	79,57
13	8,6	13	0,6	15	35,24	37,31	68,08	69,18
14	8	13	0,75	30	34,37	32,54	59,88	55,37
15	8,6	13	0,45	15	39,56	35,32	64,67	70,38
16	9,1	13	0,75	30	31,45	36,12	66,04	61,76
17	7,4	13	0,6	0	41,66	36,95	67,47	65,14

**Таблица 3.** Результаты определения физико-механических и прочностных свойств почвогрунта средней прочности и допустимого среднего давления штампа (II категория прочности)

**Table 3.** Physical-mechanical and strength properties of the soil of average strength and permissible average die pressure (strength category II)

№	$C$ , кПа	$\varphi$ , °	$B$ , м	$\beta$ , °	$P_{adm}^{эксп}$ , кПа	$P_{adm}^{теор}$ , кПа	$p_s^{эксп}$ , кПа	$p_s^{теор}$ , кПа
1	13	14	0,45	30	44,89	47,83	86	85,15
2	15	15	0,6	0	74,58	77,41	135,3	140
3	16	15	0,75	0	83,06	85,16	148,1	142,1
4	12	14	0,45	30	44,15	44,4	80,19	75,08
5	15	15	0,6	30	64,57	60,03	106,5	113,2
6	16	15	0,6	0	74,89	82,08	143	151,6
7	13	14	0,75	0	69,36	66,74	117,7	122,1
8	13	14	0,6	30	53,56	49,89	89,49	87,11
9	16	15	0,45	15	67,34	70,1	123,3	126,1
10	16	15	0,6	0	87,7	82,08	143	154,6
11	13	14	0,75	30	52,96	51,96	92,97	92,38
12	18	15	0,6	15	80,6	81,15	141,5	140,8
13	18	15	0,45	30	68	68,52	120,6	110,6
14	15	15	0,75	15	65,88	71,42	125,4	119,5

**Таблица 4.** Результаты определения физико-механических и прочностных свойств прочного почвогрунта и допустимого среднего давления штампа (I категория прочности)

**Table 4.** Physical-mechanical and strength properties of firm soil and permissible average die pressure (I strength category)

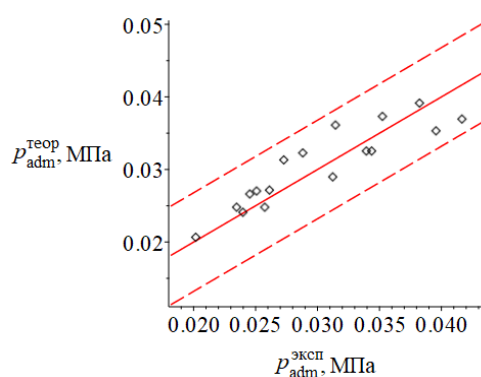
№	$C$ , кПа	$\varphi$ , °	$B$ , м	$\beta$ , °	$P_{adm}^{эксп}$ , кПа	$P_{adm}^{теор}$ , кПа	$p_s^{эксп}$ , кПа	$p_s^{теор}$ , кПа
1	22	17	0,75	15	109,6	112,8	192,9	202,2
2	24	17	0,6	15	118,2	118,4	202	201,4
3	20	17	0,45	0	112,4	109	186,9	176,5
4	21	17	0,6	15	101,1	104,6	179,7	176,3
5	21	17	0,6	0	113,3	118,2	201,8	188,8
6	21	17	0,45	0	113,8	114,2	195,3	181,2
7	22	17	0,75	30	102,8	98,11	169,2	166,1

№	$C$ , кПа	$\varphi$ , °	$B$ , м	$\beta$ , °	$P_{adm}^{эксп}$ , кПа	$P_{adm}^{теор}$ , кПа	$p_s^{эксп}$ , кПа	$p_s^{теор}$ , кПа
8	22	17	0,75	15	111,1	112,8	192,9	184,1
9	23	17	0,45	0	128	124,6	212	224,6
10	22	17	0,45	0	114	119,4	203,6	189,4
11	23	17	0,45	15	103,6	110,2	188,8	185,2
12	23	17	0,6	0	135,4	128,7	218,5	230,5
13	22	17	0,75	30	90,77	98,11	169,2	168,8
14	22	17	0,6	15	100,9	109,2	187,1	186,7
15	22	17	0,75	15	118	112,8	192,9	206,5

**Таблица 5.** Верхние оценки погрешностей экспериментального определения допустимого среднего давления штампа и несущей способности почвогрунта

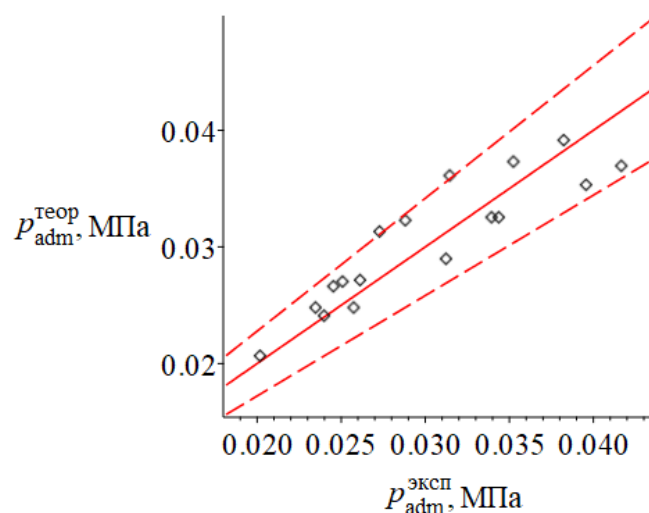
**Table 5.** Upper estimates of errors in the experimental determination of the allowable average die pressure and bearing capacity of the soil

Категория почвогрунта	$\overline{\Delta_{p_{adm}}}$ , кПа	$\overline{\delta_{p_{adm}}}$ , %	$\overline{\Delta_{p_s}}$ , кПа	$\overline{\delta_{p_s}}$ , %
III (слабый)	6,794	13,90	7,963	13,04
II (средней прочности)	10,80	9,332	11,46	8,791
I (прочный)	14,30	7,735	14,64	7,303



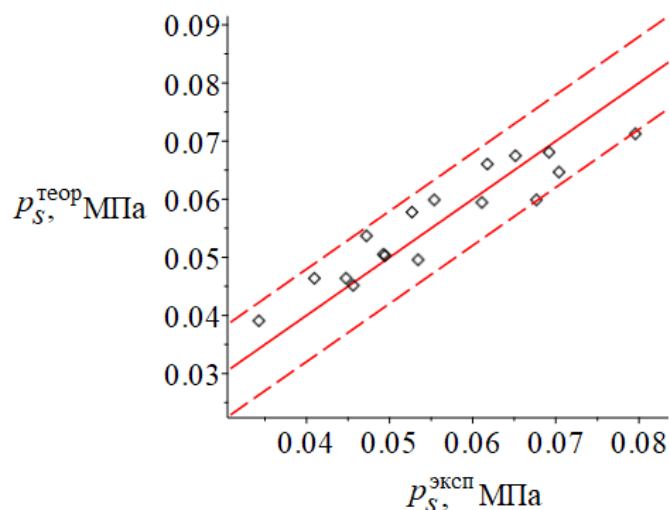
**Рисунок 3.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на слабонесущий почвогрунт (границы варьирования в абсолютных величинах)

**Figure 3.** Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on weak soil (limits of variation in absolute values)



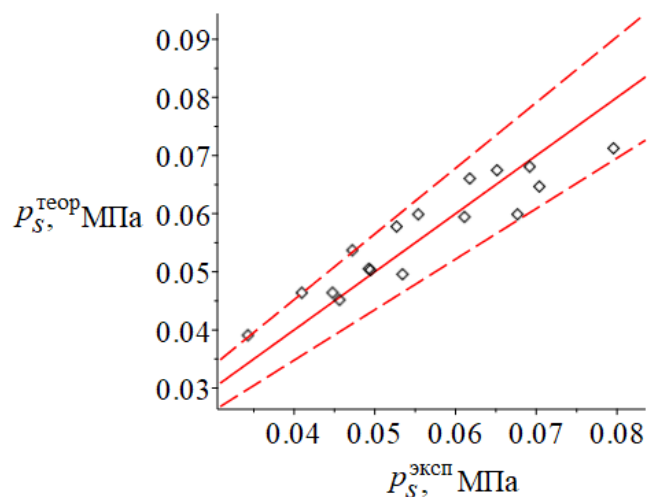
**Рисунок 4.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на слабонесущий почвогрунт (границы варьирования в относительных величинах)

**Figure 4.** Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on weak soil (limits of variation in relative values)



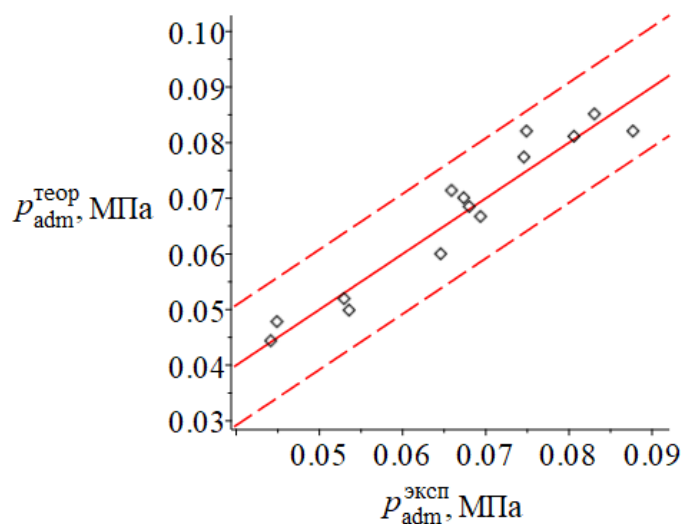
**Рисунок 5.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности слабонесущего почвогрунта (границы варьирования в абсолютных величинах)

**Figure 5.** Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of weak soil (limits of variation in absolute values)



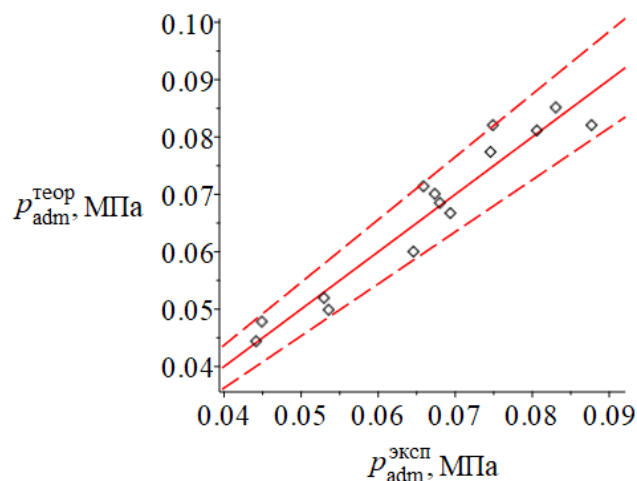
**Рисунок 6.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности слабонесущего почвогрунта (границы варьирования в относительных величинах)

**Figure 6.** Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of weak soil (boundaries of variation in relative values)



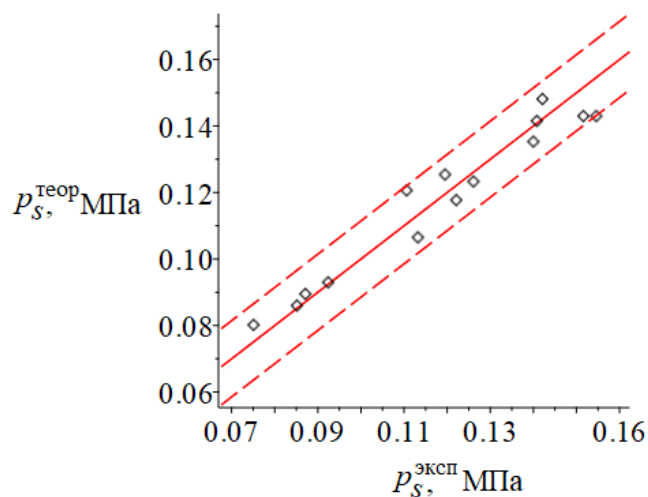
**Рисунок 7.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт средней прочности (границы варьирования в абсолютных величинах)

**Figure 7.** Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on the soil of average strength (limits of variation in absolute values)



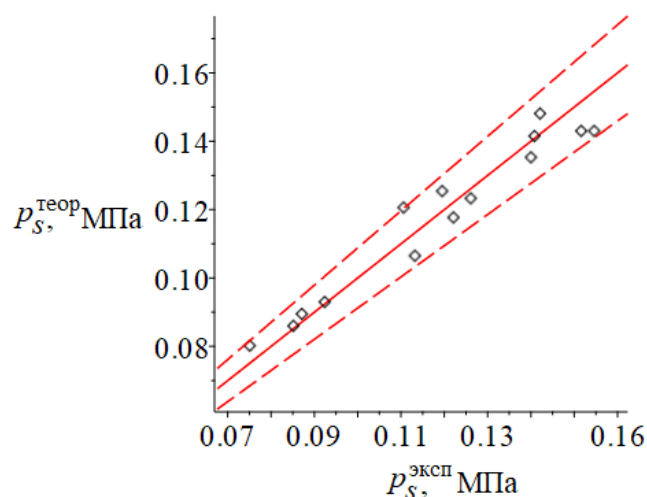
**Рисунок 8.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт средней прочности (границы варьирования в относительных величинах)

**Figure 8.** Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on the soil of average strength (limits of variation in relative values)



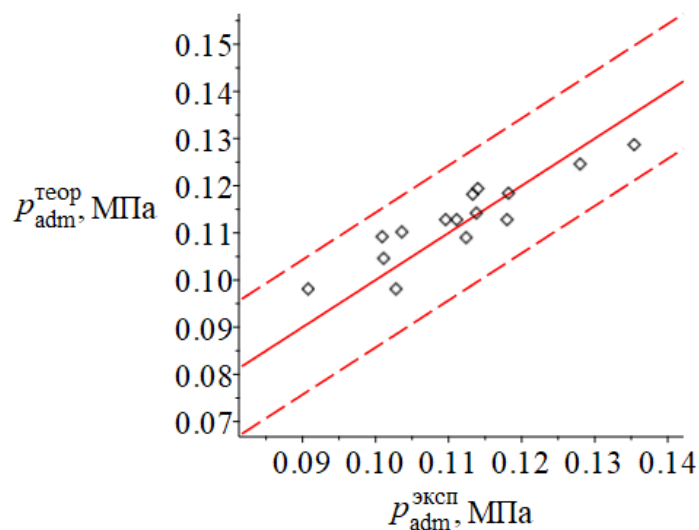
**Рисунок 9.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности почвогрунта средней прочности (границы варьирования в абсолютных величинах)

**Figure 9.** Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of the soil of average strength (limits of variation in absolute values)



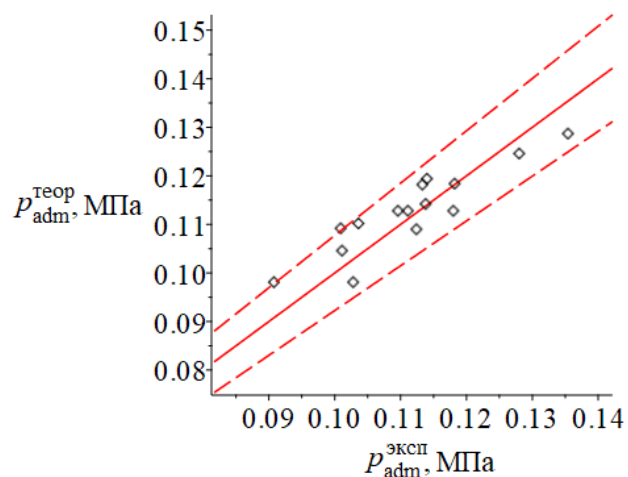
**Рисунок 10.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности почвогрунта средней прочности (границы варьирования в относительных величинах)

**Figure 10.** Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of the soil of average strength (limits of variation in relative values)



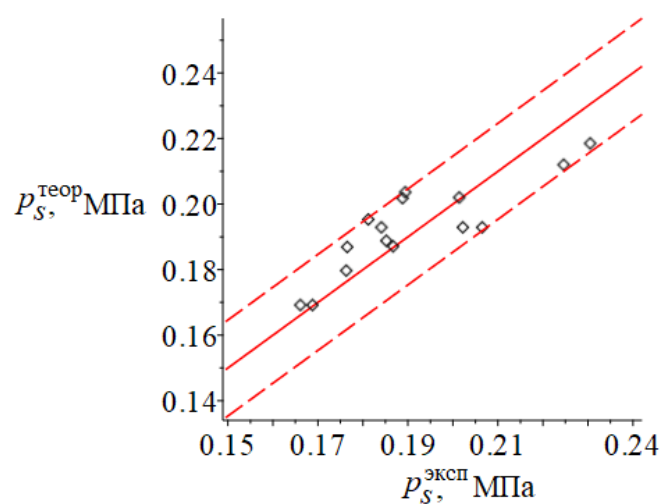
**Рисунок 11.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на прочный почвогрунт (границы варьирования в абсолютных величинах)

**Figure 11.** Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on firm soil (limits of variation in absolute values)



**Рисунок 12.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на прочный почвогрунт (границы варьирования в относительных величинах)

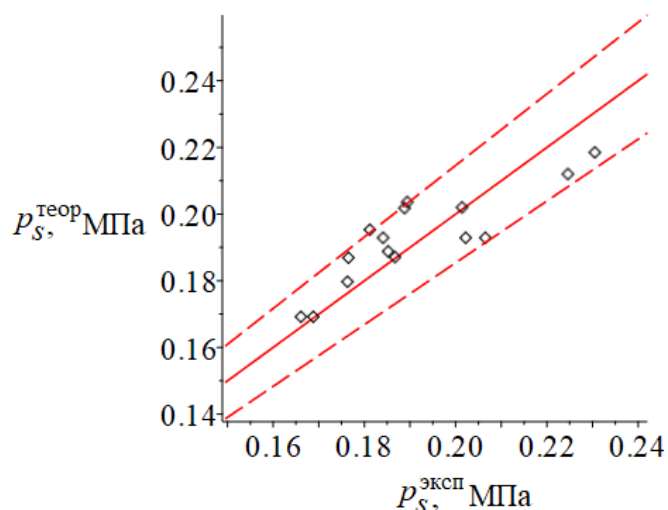
**Figure 12.** Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on firm soil (limits of variation in relative values)



**Рисунок 13.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности прочного почвогрунта (границы варьирования в абсолютных величинах)

**Figure 13.** Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of firm soil (limits of variation in absolute values)





**Рисунок 14.** Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности прочного почвогрунта (границы варьирования в относительных величинах)

**Figure 14.** Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of firm soil (limits of variation in relative values)

#### 4. Обсуждение и заключение

Сопоставление графических данных на рисунках 3—14, а также числовых данных, приведённых в таблицах 3—5, показывает:

1. Отклонения теоретических значений несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного движителя, не превышают границ, связанных с погрешностями экспериментального определения данной величины. Отклонения находятся в пределах 13 %.

2. Отклонения теоретических значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт не превышают границ, связанных с погрешностями экспериментального определения данной величины. Отклонения находятся в пределах 14 %.

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

### Список литературы

1. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трелёвочной системы с волоком / И. В. Григорьев, М. В. Цыгарова, А. И. Жукова [и др.] // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 47—54.
2. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта / И. В. Григорьев, А. И. Никифорова, А. А. Пельмский [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 8 (137). С. 77—80.
3. Экспериментальные исследования конусного индекса и физико-механических свойств заболоченного грунта / М. Н. Дмитриева, И. В. Григорьев, В. А. Лухминский [и др.] // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7, № 4 (28). С. 167—174.
4. Методика и результаты экспериментальных исследований взаимодействия колёсных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами / О. Н. Бурмистрова, Е. В. Тетеревлева, С. Е. Рудов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 66—71.
5. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры почвогрунтов криолитозоны на их физико-механические свойства / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 4 (40). С. 197—207.
6. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учётом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просужих, С. Е. Рудов [и др.] // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 94—124.
7. Experimental findings in forest soil mechanics / M. F. Grigorev, A. I. Grigoreva, I. V. Grigorev [et al.] // Eur. Asian Journal of Bio Sciences. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 277—287.
8. Моделирование процесса динамического уплотнения почвогрунта / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев [и др.] // IX Международная конференция по математическому моделированию, посвящённая 75-летию Владимира Николаевича Врагова: Тез. докл. / Северо-Восточный федеральный университет, Академия наук Республики Саха (Якутия). Якутск, 2020. С. 144.
9. Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and thawing soil grounds / S. Rudov, I. Grigorev, O. Kunickaya [et al.] // International Journal of Advanced Science and Technology. 2019. Vol. 28, no. 9. P. 179—197.
10. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds / S. Rudov, V. Shapiro, I. Grigorev [et al.] // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10, no. 1. P. 2052—2071.
11. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain / S. E. Rudov, A. M. Voronova, J. M. Chemshikova [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2019. Vol. 16, no. 4. P. 61—75.
12. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads / S. E. Rudov, I. V. Grigorev, O. A. Kunickaya [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Vol. 25, no. Suppl. 2. P. 191—205.
13. Theoretical studies of dynamic soil compaction by wheeled forestry machines / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov [et al.] // Diagnostyka. 2020. Vol. 21, no. 4. P. 3—13.
14. Efficiency improvement of forest machinery exploitation / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Prosuzhikh [et al.] // Diagnostyka. 2020. Vol. 21, no. 2. P. 95—109.

15. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19, no. 2. P. 439—447.
16. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas / I. V. Grigorev, O. A. Kunitskaya, E. A. Tikhonov [et al.] // *Journal of Terramechanics*. 2022. Vol. 101. P. 1—9.
17. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil / I. V. Grigorev, A. M. Burgonutdinov, V. A. Makuev [et al.] // *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2022. Vol. 19, no. 3. P. 2935—2949.
18. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles / R. Dobretsov, I. Grigorev, E. Tikhonov [et al.] // *International Review of Automatic Control*. 2021. Vol. 14, no. 3. P. 172—178.
19. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Куницкая О. А. Шасси гусеничного трелёвочного трактора с «диагональной» системой управления поворотом // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2020. № 1. С. 42—48.
20. Адаптация принципа низкочастотного импульсного управления поворотом к трансмиссиям лесных и транспортно-тяговых гусеничных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая [и др.] // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2020. № 11. С. 29—35.
21. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Квазибесступенчатые трансмиссии для лесных гусеничных машин // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2018. Т. 22, № 1. С. 68—77.
22. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Перспективные трансмиссии лесных гусеничных машин // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы IV Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием*. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2018. С. 57—58.
23. Увеличение подвижности гусеничных и колёсных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, С. Е. Рудов [и др.] // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2019. № 11. С. 4—10.
24. Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // *Forest engineering: Материалы научно-практич. конф. с междунар. участием*. Якутск, 2018. С. 67—71.
25. Теоретическое обоснование допустимого среднего давления на грунт движителя лесной машины, работающей на склоне / До Туан Ань, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 2 (54). С. 72—77.
26. Оценка тягово-сцепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне / До Туан Ань, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 2 (54). С. 78—84.

## References

1. Grigorev I. V., Tsygarova M. V., Zhukova A. I., Lepilin D. V., Yesin G. Y. Planning the experiment in the study of interaction skidding system with dragline. *Bulletin of Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2011, no. 2, pp. 47—54. (In Russ.)
2. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Pelymsky A. A., Khitrov E. G., Khakhina A. M. Experimental determination of stress relaxation time of forest soil. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2013, no. 8 (137), pp. 77—80. (In Russ.)
3. Dmitrieva M. N., Grigorev I. V., Lukhminsky V. A., Kazakov D. P., Khakhina A. M. Experimental studies of cone index and physical and mechanical properties of waterlogged soil. *Forest Engineering Journal*, 2017, vol. 7, no. 4 (28), pp. 167—174. (In Russ.)

4. Burmistrova O. N., Teterleva E. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Methodology and results of experimental research of wheeled vehicles interaction on low pressure pneumatics with forest soils. *Systems. Methods. Technologies*, 2020, no. 1 (45), pp. 66—71. (In Russ.)
5. Rudov S. E., Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I., Storodubtseva T. N. Results of experimental studies of cryolithozone soils temperature effect on their physical and mechanical properties. *Forest Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4 (40), pp. 197—207. (In Russ.)
6. Burmistrova O. N., Proshikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Experimental research of forwarder productivity taking into account its operating characteristics, logging parameters, and physical and mechanical properties of the soil. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 94—124. (In Russ.)
7. Grigorev M. F., Grigoreva A. I., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Stepanova D. I., Savvinova M. S., Sidorov M. N., Tomashevskaya E. P., Burtseva I. A., Zakharova O. I. Experimental findings in forest soil mechanics. *EurAsian Journal of BioSciences*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 277—287.
8. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Modeling of process of dynamic compaction of soil. *IX International Conference on Mathematical Modelling, devoted to 75th anniversary of Vladimir Nikolaevich Vragov: Theses of reports*. North-Eastern Federal University, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk, 2020, p. 144. (In Russ.)
9. Rudov S., Grigorev I., Kunickaya O., Ivanov N., Kremleva L., Mueller O., Hertz E., Chemshikova Y., 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.
10. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunitskaya 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, no. 1, pp. 2052—2071.
11. Rudov S. E., Voronova A. M., Chemshikova J. M., Teterleva E. V., Kruchinin I. N., Dondokov Yu. Zh., Khaldeeva M. N., Burtseva I. A., Danilov V. V., Grigorev I. V. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 61—75.
12. Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunickaya O. A., Druzyanova V. P., Ivanov A. K., Okhlopko M. K., Pankov V. Y., Pekhutov A. S., Ivanov A. P., Borovikov R. G. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, no. Suppl. 2, pp. 191—205.
13. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Ivanov V., Shuvalova S., Shvetsova V., Stepanishcheva M., Tikhonov E. Theoretical studies of dynamic soil compaction by wheeled forestry machines. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 3—13.
14. Grigorev I., Kunickaya O., Prosuzhih A., Kruchinin I., Shakirzyanov D., Shvetsova V., Markov O., Egipko S. Efficiency improvement of forest machinery exploitation. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 95—109.
15. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 439—447.

16. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Tikhonov E. A., Gerts E. F., Druzyanova V. P., Timokhova O. M., Ivanov V., Kruchinin I. N. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas. *Journal of Terramechanics*, 2022, vol. 101, pp. 1—9.
17. Grigorev I. V., Burgonutdinov A. M., Makuev V. A., Tikhonov E. A., Shvetsova V. V., Timokhova O. M., Revyako S., Dmitrieva N. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 2935—2949.
18. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles. *International Review of Automatic Control*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 172—178.
19. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Chassis of caterpillar skidder tractor with «diagonal» turn control system. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 1, pp. 42—48. (In Russ.)
20. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Pham N. L. Adaptation of the principle of low-frequency pulse control of turning to transmissions of forestry and transport-traction crawler machines. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 11, pp. 29—35. (In Russ.)
21. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V. Quasi-stage transmissions for forestry tracked machines. *Forestry Bulletin. Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 68—77. (In Russ.)
22. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V. Prospective transmissions of forest tracked machines. *Increasing the efficiency of the forestry complex. Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation*. Petrozavodsk, Publishing House of PetrSU, 2018, pp. 57—58. (In Russ.)
23. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Rudov S. E., Teterevleva E. V., Chemshikova Yu. M. Increase mobility of tracked and wheeled machines. *Repair. Restoration. Modernization*, 2019, no. 11, pp. 4—10. (In Russ.)
24. Grigorev I. V., Rudov S. E. Features of the operation of wheeled forest machines in complex soil and terrain conditions. *Forest engineering. materials of scientific and practical conference with international participation*. Yakutsk, 2018, pp. 67—71. (In Russ.)
25. Do Tuan Anh, Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Guryev A. Yu., Khitrov E. G. Theoretical substantiation of permissible average pressure on the ground of forest machine propeller operating on a slope. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 72—77. (In Russ.)
26. Do Tuan Anh, Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Evaluation of traction and coupling properties of forest tracked machine propulsor operating on a slope. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 78—84. (In Russ.)