


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/11>

УДК 630.232.216




Оптимизация параметров лесного плуга для образования микроповышений на основе множественного регрессионного анализа

Денис Ю. Дручинин✉, druchinin.denis@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Максим А. Попов, popovmaxim98@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

Сергей В. Зимарин, sezimarin@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>

Александр И. Третьяков, tret'yakov-ai@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0006-5834-1010>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Тасжные лесные ландшафты РФ, являясь основной частью бореальных лесов нашей планеты, в настоящее время подвергаются интенсивной эксплуатации. Проводимое после заготовки древесины лесовосстановление на таких площадях часто включает обработку почвы в виде образования пластов, гряд или линейных микроповышений ввиду преобладания временно переувлажняемых или влажных почв. Эффективность подготовки переувлажненной почвы микроповышениями напрямую зависит от конструктивно-технологических параметров лесного плуга, сочетающего лемешно-отвальные корпуса и сферические диски. В почвенном канале проведена серия экспериментов по тензометрическим замерам величин тягового сопротивления лесного плуга и линейных размеров образуемого им микроповышения. Регрессионные модели влияния конструктивных параметров плуга и влажности почвы адекватны экспериментальным значениям тягового сопротивления ($F = 13,847$, $p = 0,000334$) и высоты микроповышения ($F = 20,646$, $p = 0,000045$). На основании составленных моделей проведена оптимизация ряда параметров элементов конструкции лесного плуга с использованием функции желательности Харрингтона. Были установлены оптимальные значения угла атаки и угла наклона сферических дисков, расстояние от центра их вращения до кромки отвала корпусов, а также оценено влияние влажности обрабатываемой почвенной среды на исследуемые выходные характеристики работы плуга. Полученные результаты могут быть использованы при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию современной лесной почвообрабатывающей техники.

Ключевые слова: бореальные леса, лесовосстановление, переувлажненные почвы, микроповышение, лесной плуг, параметры конструкции, регрессионный анализ, оптимизация

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оптимизация параметров лесного плуга для образования микроповышений на основе множественного регрессионного анализа / Д. Ю. Дручинин, М. А. Попов, С. В. Зимарин, А. И. Третьяков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 188–203. – Библиогр.: с. 200–202 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/11>.

Поступила 01.04.2024. Пересмотрена 22.04.2024. Принята 23.04.2024. Опубликовано онлайн 17.06.2024.

Article

Optimization of the forest plow parameters for receiving microhills based on multiple regression analysis

Denis Yu. Druchinin✉, druchinin.denis@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Maksim A. Popov, popovmaxim98@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

Sergey V. Zimarin, sezimarin@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>

Alexander I. Tretyakov, tretyakov-ai@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0006-5834-1010>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

The taiga forest landscapes of the Russian Federation, being the main part of the boreal forests of our planet, are currently undergoing intensive exploitation. Reforestation carried out after harvesting in such areas often includes tillage in the form of formation of layers, ridges or linear microhills due to the predominance of temporarily moistened or wetland soils. The effectiveness of the preparation of waterlogged soil by microhills directly depends on the structural and technological parameters of a forest plow combining plow bottom and spherical discs. A series of experiments on strain gauge sampling of a forest plow draught resistance of and the linear dimensions of the microhill formed by it were carried out in the soil channel. Regression models of the influence of plough design parameters and soil moisture are adequate to the experimental values of draught resistance ($F = 13.847$, $p = 0.000334$) and microhill height ($F = 20.646$, $p = 0.000045$). Based on the compiled models, a number of parameters of the forest plow structural elements were optimized using the Harrington desirability function. The optimal values of the approach angle and the angle of inclination of spherical disks, the distance from the center of their rotation to the edge of the plow bottom earthboard were determined, and the influence of humidity of the treated soil environment on the estimated output characteristics of the plow was estimated. The results obtained can be used in the implementation of research and development on the creation of modern forest tillage equipment.

Keywords: *boreal forests, reforestation, wetland soils, microhill, forest plow, design parameters, regression analysis, optimization*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Druchinin D. Yu., Popov M. A., Zimarin S. V., Tretyakov A. I. (2024). Optimization of the forest plow parameters for receiving microhills based on multiple regression analysis. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 188-203 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/11>.

Received 01.04.2024. *Revised* 22.04.2024. *Accepted* 23.04.2024. *Published online* 17.06.2024.

Введение

Российская Федерация, являясь ведущей лесной державой, сосредоточила на своей площади, по разным оценкам, около четверти мирового запаса древесных ресурсов [1]. Однако в целом ряде работ отмечается, что в настоящее время вследствие активного освоения доступной лесосырьевой базы, особенно в зонах с умеренным климатом, заготовка древесины перемещается в бореальные широты²¹ [2-4].

Леса бореальной зоны, находясь между 50 и 70 градусами северной широты, являются одним из основополагающих климатообразующих факторов нашей планеты, так как *поглощают из атмосферы Земли до 17 % углекислого газа* [5]. Наибольшая площадь бореальных лесов сосредоточена в нашей стране, поэтому обеспечение устойчивого лесопользования таежных ландшафтов делает их охрану и своевременное восстановление одними из основных видов деятельности для лесной отрасли РФ.

В работах [4, 6] А.С. Ильинцев с соавторами, а также А.А. Дымов указывают на то, что в условиях бореальных широт доступная лесосека переходит с участков с дренированными почвами на площади с временным переувлажнением или избыточным увлажнением, часто преобладающие в таежных условиях. С учетом принятия в нашей стране Концепции интенсивного использования и воспроизводства лесов это вызывает необходимость проведения лесовосстановительных работ, в частности, обработки почвы, на вырубках с избытком влаги [5].

В статье Казакова В.И. и соавторов [7] отмечено, что механическая обработка временно или избыточно переувлажненных лесных почв выполняется с использованием специальных лесных плугов, например, ПЛД-1,2 или ПЛМ-1,5, которые создают линейные микроповышения в виде гряд.

М. Ramantswana и др. в работе [8] сделали вывод о том, что плужная обработка почвы в лесных условиях невозможна без создания и использования современных образцов эффективных технических средств. Аналогичный вывод о необходимости использования средств механизации при подготовке

участков к лесовосстановлению для улучшения приживаемости и последующего развития создаваемых культур сделан М. Löff и соавторами [9].

Механизация лесохозяйственных работ позволяет повысить экономическую эффективность и результативность их проведения.

Качество подготовки почвы, как было установлено на основе полевых опытов К. Uotila и др., существенно влияет на последующее развитие создаваемых насаждений [10].

В ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова на основании анализа конструктивных и технологических особенностей серийных образцов лесных почвообрабатывающих орудий разработана конструкция лесного плуга для образования линейных микроповышений [11]. Орудие включает следующие основные узлы (рис. 1): раму 1, механизм навески 2, подвижный брус 3 с расположенными на нем лемешно-отвальными корпусами 4, сферические диски 5 и каток-уплотнитель 6 для формирования профиля и плотной структуры микроповышения.

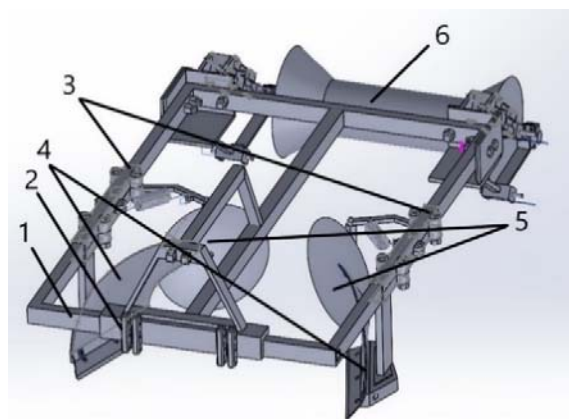


Рисунок 1. Разработанная конструкция лесного плуга для образования микроповышений

Источник: собственная схема авторов

Figure 1. The developed design of a forest plow for the microhills formation

Source: authors' own scheme

Помимо конструирования, важным этапом при разработке нового технического устройства яв-

²¹ Кармакова М. Руби – не хочу: сколько леса в России доступно для заготовки? // Лесной комплекс. 2021; 4(50): 24-32. URL:

<https://forestcomplex.ru/forestry/rubi-ne-hochu-skolko-lesa-v-rossii-dostupno-dlya-zagotovki/>

ляется определение его оптимальных компоновочных, конструктивных и технологических параметров. Для этого выполняются теоретические и экспериментальные исследования с использованием соответственно математического моделирования и физических моделей (экспериментальных образцов, лабораторных установок и т.д.).

Ранее авторами для определения оптимальных диапазонов параметров конструктивных узлов разрабатываемого лесного плуга была составлена формализованная модель перемещения почвенных масс по лемешно-отвальной поверхности и сферическим диском орудия для укладки в микроповышение [12].

Целью работы является решение оптимизационной задачи для многообразия конструктивно-технологических параметров и факторов почвенной среды, влияющих на процесс работы лесного плуга для создания линейных микроповышений на переувлажненных почвах.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Объектом исследования является процесс образования линейного микроповышения при работе лесного плуга с комбинированными лемешно-отвальными и дисковыми рабочими органами.

Предмет исследования – определенные экспериментальным путем закономерности влияния конструктивных параметров лесного плуга (углы установки α и β сферического диска, расстояние L от оси диска до кромки отвала) и характеристик обрабатываемой почвенной среды (влажность почвы W) на величину тягового сопротивления орудия и высоту образуемого им микроповышения.

Дизайн эксперимента

Для достижения поставленной цели исследования была составлена программа лабораторных исследований. Она подразумевала проведение экспериментальных замеров тягового сопротивления R_n и высоты создаваемого микроповышения h как критериев эффективности работы орудия Y_1 и Y_2 в зависимости от комбинации входных независимых переменных.

На этапе обобщенной постановки задачи эксперимента необходимо было определить количество

исследуемых параметров и их вариативность. Для этого было выполнено априорное ранжирование факторов [13, 14].

На основе априорного ранжирования в качестве независимых входных факторов для изучения их влияния на тяговое сопротивление и поперечный профиль микроповышения были отобраны следующие параметры конструкции лесного плуга: угол атаки α сферического диска (X_1); угол наклона β сферического диска в вертикальной плоскости (X_2); расстояние L от оси диска до кромки отвала (X_3). Из свойств обрабатываемой почвенной среды был выбран неуправляемый в реальных условиях параметр – влажность почвы W (X_4).

Графическое представление постановки задачи на эксперимент имеет следующий вид (рис. 2).



Рисунок 2. Постановка задачи для лабораторного исследования

Figure 2. Setting a task for laboratory research

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Оптимизационная задача, решаемая по итогам лабораторного исследования, заключалась в подборе такой комбинации задействованных в эксперименте параметров, которые позволяют достичь максимальной высоты микроповышения при минимальном тяговом сопротивлении разрабатываемого лесного плуга

$$\begin{cases} R_n(\alpha, \beta, L, W) \rightarrow \min \\ h(\alpha, \beta, L, W) \rightarrow \max \end{cases} \quad (1)$$

Намеченные граничные уровни входных факторов и интервалы их варьирования представлены в табл. 1.

Граничные условия исследуемых факторов

Table 1

Boundary conditions of the studied factors

Код / Code	Фактор / The factor	Уровень варьирования / The level of variation			Интервал варьирования / The variation interval Δ_i
		нижний / lower, $X_i^{(-)}$	основной / main, $X_i^{(0)}$	верхний / upper, $X_i^{(+)}$	
X_1	Угол атаки / Approach angle α	45°	50°	55°	5°
X_2	Угол установки диска в вертикальной плоскости / Setting angle of the disc in the vertical plane β	0°	7.5°	15°	7.5°
X_3	Расстояние от оси диска до отвала / The distance from the axis of the disc to the earthboard L	-50 мм / mm	0 мм / mm	50 мм / mm	50 мм / mm
X_4	Влажность почвы / Soil moisture W	30%	45%	60%	15%

Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

С использованием метода планирования многофакторного эксперимента согласно формулы числа опытов 2^x была составлена кодированная матрица планирования эксперимента для четырех исследуемых факторов X^{22} . Исследование проводилось согласно заранее составленной методике в специальном почвенном канале кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин²³.

Для проведения запланированной серии экспериментов была создана лабораторная установка в виде одной рабочей секции разработанного плуга для образования микроповышений, содержащая тележку с электродвигателем 1, навеску тележки 2, тензонавеску 3, S-образный тензодатчик 4 модели UU-K500, раму 5, опорное колесо 6, лемешно-отвалный корпус 7 и сферический диск 8 (рис. 3).



Рисунок 3. Установка для проведения лабораторных экспериментов по исследованию рабочего процесса лесного плуга / Figure 3. Apparatus for conducting laboratory experiments to study the forest plow working process

Источник: собственное фото авторов / Source: authors' own photo

² Адлер Ю. А., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва : Наука, 1976. 139 с.

²³ Рязанова Т.В., Демиденко Н.Ю., Почкутов И.С., Еременко О.Н. Планирование, организация, проведение эксперимента и патентование : учеб. пособие. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. 88 с.

Скорость движения экспериментальной установки составляла 0,26 м/с (1 км/ч). Глубина хода рабочих органов в процессе исследований была постоянной и равнялась 150 мм.

Анализ данных

Требуемые опыты из матрицы планирования выполнялись с трехкратным повтором, после чего

полученные данные по каждому показателю эффективности подвергались первичной статистической обработке и усреднению с использованием программных средств математической статистики.

Рассчитанные значения выходных критериев эффективности рабочего процесса лесного плуга для каждого эксперимента, согласно матрице планирования, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Усредненные результаты выполненных экспериментальных исследований

Table 2

The average results of the performed experimental studies

№ опыта / Experience Number	X ₁ (угол α, град. / angle α, degree)	X ₂ (угол β, град. / angle β, degree)	X ₃ (расстояние L от оси диска до отвала, мм / distance L from the axis of the disc to the earthboard, mm)	X ₄ (влажность почвы W, % / soil moisture W, %)	Y ₁ , Сопротивление орудия R _n , Н / Draught resistance R _n , N	Y ₂ , Средняя высота микроповышения h, мм / The average height of the microhill h, mm
1	55	0	-50	30	1423,67	48,5
2	45°	0°	-50	30%	1310,37	37,8
3	55°	15°	-50	30%	1383,5	33,6
4	45°	15°	-50	30%	1320,82	25,3
5	55°	0°	50	30%	1794,56	44,9
6	45°	0°	50	30%	1598,04	41
7	55°	15°	50	30%	1483,05	37,5
8	45°	15°	50	30%	1450,15	32,3
9	55°	0°	-50	60%	2160,48	55,3
10	45°	0°	-50	60%	1978,4	38,7
11	55°	15°	-50	60%	1905,83	42
12	45°	15°	-50	60%	1726,28	32,8
13	55°	0°	50	60%	2034,79	62
14	45°	0°	50	60%	1735,39	59,5
15	55°	15°	50	60%	1814,29	45,5
16	45°	15°	50	60%	1463,9	39

Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

С использованием средних значений для каждого из критериев эффективности Y₁ и Y₂ процесса образования микроповышения был проведен регрессионный анализ полученных данных и составлены линейные регрессионные модели [15-17].

Для дополнительной проверки значимости полученных уравнений регрессии при уровне достоверности вычислений в 95 % построена диаграмма Парето, упорядочивающая рассчитанные значения

t-статистики. Вертикальной линией на графике отмечена значимость 0,05.

Для проверки соответствия остатков модели нормальному распределению путем визуальной оценки характера разброса данных с использованием программных средств математической статистики построена гистограмма остатков для каждой из зависимых переменных Y₁ и Y₂.

Для оптимизации значений задействованных в эксперименте конструктивных параметров лесного

плуга и влажности обрабатываемой почвы используется функция желательности Харрингтона *d*. Данный метод применяется в экономических, технических, экологических, социальных и других многокритериальных задачах для оценки и поиска оптимальных параметров исследуемых процессов [17, 18].

Для этого с использованием автоматизированной системы статистических расчетов натуральные значения зависимых переменных Y_1 и Y_2 переведены в безразмерную шкалу желательности. Здесь значение «0» – абсолютно неприемлемая величина выходного критерия, значение «1» – наиболее предпочтительный уровень выходного критерия рассматриваемого процесса. В результате функция желательности отражает зависимость оценочных показателей желательности от натуральных размерных величин (например, полученных экспериментальным путем), переведенных в безразмерные показатели.

Стандартизация значений желательности для всех оптимизируемых выходных параметров осуществляется с использованием специально разработанной шкалы желательности.

Результаты

Коэффициенты уравнения регрессии влияния параметров конструкции лесного плуга и влажности обрабатываемой почвы на тяговое сопротивление орудия R_n (переменная Y_1), рассчитанные с использованием программных средств математической статистики, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты уравнения регрессии для расчета тягового сопротивления лесного плуга
Table 3
Coefficients of the regression equation for calculating the draught resistance of a forest plow

b_0	b_1	b_2	b_4
296,1000	17,7103	-12,3990	12,7300

Источник: собственные данные авторов
Source: author’s own data

Коэффициент b_3 в уравнении отсутствует, т.к. первоначально проведенный корреляционный анализ полученных экспериментальных данных показал, что теснота связи между выходным критерием Y_1 и независимой переменной X_3 (расстояние от оси диска до кромки отвала) незначительная.

В кодированной форме уравнение регрессии имеет следующую запись:

$$Y_1 = 296,1 + 17,71X_1 - 12,399X_2 + 12,73X_4. \quad (2)$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии выполнена с использованием t-критерия Стьюдента путем проверки гипотезы о случайной природе оцениваемых показателей.

В табл. 4 приведены результаты расчета t-статистики коэффициентов уравнения регрессии для расчета тягового сопротивления лесного плуга, значимых с 95 % вероятностью ($t_{табл}=2,13$ для $df=15$).

Таблица 4

Результаты расчета t-статистики Стьюдента для определения значимости уравнения регрессии

Table 4

The results of calculating the Student's t-statistics to determine the significance of the regression equation

Коэффициент Регрессии / Regression coefficient	Расчетные коэффициенты регрессии / Calculated regression coefficients	Стандартная ошибка / The standard error	t-статистика / t-statistics	Коэффициент значим (+) / незначим (-) / The coefficient is significant (+) / insignificant (-)
b_0	296,1	391,5049	0,75631	±
b_1	17,7103	7,4320	2,38297	+
b_2	-12,399	4,9547	-2,50249	+
b_4	12,73	2,4773	5,13859	+

Источник: собственные данные авторов / Source: author’s own data

Свободный член регрессионной модели b_0 по итогам оценки t-статистики является незначимым и

его можно исключить из уравнения, однако ситуации, когда величина b_0 определяет значение Y в случае, если все переменные X в модели равны нулю,

присуща экономическим задачам, поэтому коэффициент b_0 целесообразно оставить в модели

Расчет коэффициентов регрессионной модели влияния параметров конструкции лесного плуга и влажности почвы на высоту образуемого разрабатываемым лесным плугом микроповышения h (переменная Y_2) также выполнен с использованием программных средств математической статистики (табл. 5).

Кодированная форма записи уравнения регрессии имеет следующий вид:

$$Y_2 = -4,706 + 0,786X_1 - 0,831X_2 + 0,596X_3 + 0,308X_4. \quad (3)$$

В табл. 6 приведены результаты расчета t-критерия Стьюдента коэффициентов уравнения регрессии для расчета высоты образуемого микроповышения с 95 % доверительной вероятностью ($t_{\text{табл}} = 2,13$ для $df = 15$).

Свободный член регрессионной модели b_0 по итогам оценки t-статистики является незначимым, однако, как и для уравнения регрессии расчета тягового сопротивления, он оставлен в модели вследствие особенностей исследуемого процесса.

Таблица 5

Коэффициенты уравнения регрессии для расчета высоты образуемого микроповышения

Table 5

Coefficients of the regression equation for calculating the height of the resulting microhill

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
-4,706	0,78625	-0,83083	0,59625	0,3079

Источник: собственные данные авторов

Source: author's own data

Таблица 6

Результаты расчета t-статистики Стьюдента для определения значимости уравнения регрессии

Table 6

The results of calculating the Student's t-statistics to determine the significance of the regression equation

Коэффициент Регрессии / Regression coefficient	Расчетные Коэффициенты регрессии / Calculated regression coefficients	Стандартная ошибка / The standard error	t-статистика / t-statistics	Коэффициент значим (+) / незначим (-) / The coefficient is significant (+) / insignificant (-)
b_0	-4,706	10,6574	-0,44159	±
b_1	0,786	0,2023	3,88633	+
b_2	-0,831	0,1349	-6,16005	+
b_3	0,596	0,2023	2,94719	+
b_4	0,308	0,0674	4,56598	+

Источник: собственные данные авторов

Source: author's own data

Общие результаты проверки адекватности полученных регрессионных моделей расчета тягового сопротивления орудия и высоты образуемого им микроповышения с использованием программного продукта Microsoft Excel представлены в табл. 7.

Общий коэффициент корреляции регрессионной модели расчета тягового сопротивления $R = 0,881$, что позволяет сделать вывод о том, что между тяговым сопротивлением и входными параметрами, включенными в модель, существует высокая линейная зависимость. В свою очередь, коэффициент детерминации $R^2 = 0,776$, а значит, значение

переменной отклика Y_1 в основном зависит от величины задействованных в эксперименте независимых переменных X .

Общий коэффициент корреляции регрессионной модели расчета высоты микроповышения $R = 0,939$, соответственно, между высотой микроповышения и всеми четырьмя входными параметрами, включенными в модель, существует весьма высокая линейная зависимость. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,882$, а значит, значение переменной отклика Y_2 в основном зависит от величины задействованных в эксперименте независимых переменных X .

Общие статистические результаты выполненного регрессионного анализа

Table 7

General statistical results of the performed regression analysis

	Множ. R / Multiple R	Множ. R ² / Multiple R ²	Скоп. R ² / Adjusted R ²	SS Модель / SS Model	MS Модель / MS Model	MS Остаток / MS Balance	F	p
Y ₁ (тяговое сопротивление / Draught resistance)	0,881	0,776	0,720	847213,3	282404,4	20394,19	13,847	0,000334
Y ₂ (высота микроповышения / The height of the microhill)	0,939	0,882	0,839	1352,1	338,0	16,37	20,646	0,000045

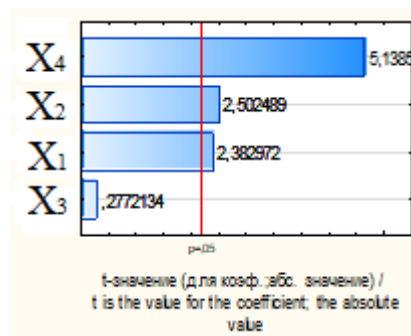
Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

F-критерий Фишера позволяет оценить общую адекватность построенной модели. В случае, если он меньше табличной величины $F_{табл}$ для установленного уровня значимости, принимается случайный характер оцениваемых параметров. В регрессионной модели расчета тягового сопротивления лесного плуга при уровне значимости 0,05 (95 % вероятность) значение $F_{табл}$, равное 3,59, меньше $F_{факт}$ ($3,59 < 13,85$), поэтому признается статистическая значимость рассматриваемых характеристик рабочего процесса орудия.

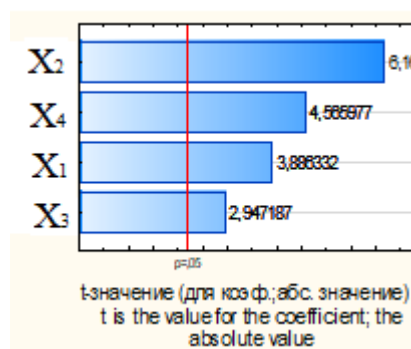
Для регрессионной модели расчета высоты микроповышения также признается статистическая значимость значений высоты образуемого микроповышения с 95 % доверительной вероятностью, так как значение $F_{табл}$, равное 3,36, меньше $F_{факт}$: $3,36 < 20,64$.

P-значение, связанное с заданным уровнем надежности статистических вычислений, для оцениваемых моделей расчета тягового сопротивления и высоты микроповышения равняется 0,00034 и 0,000045 соответственно, что меньше заданного значения 0,05. Это подтверждает, что рассчитанные регрессионные модели статистически значимы и по этому критерию.

Анализ построенной для оценки значимости оцениваемых факторов X диаграммы Парето (рис. 4) подтверждает ранее сделанный вывод о том, что переменная X₃ (расстояние L от оси диска до кромки отвала) в регрессионной модели расчета тягового сопротивления лесного плуга не является значимой, так как значение t-критерия для нее меньше установленного уровня значимости.



a / a



b / b

Рисунок 4. Диаграмма Парето для рассчитанных значений t-статистики регрессионных моделей для расчета тягового сопротивления лесного плуга (a) и высоты образуемого микроповышения (b)
Figure 4. Pareto diagram for the calculated values of t-statistics of regression models for calculating the draught resistance of a forest plow (a) and the amount of microhill formed (b)

Источник: собственные результаты авторов
Source: authors' own scheme

Установлено, что графическое представление распределения остатков для каждой из зависимых переменных Y_1 и Y_2 (рис. 5) соответствует нормальному распределению, а значит, подтверждается адекватность полученных линейных регрессионных моделей.

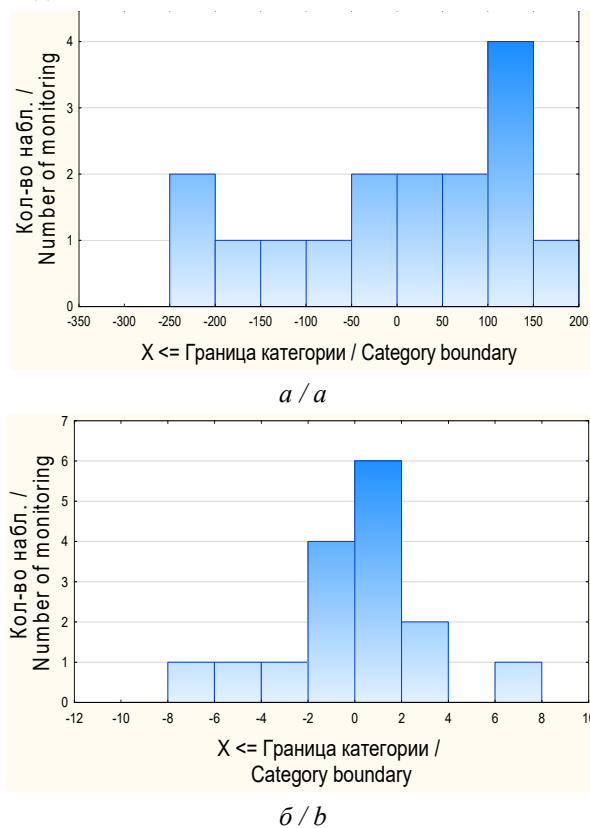


Рисунок 5. Гистограмма исходных остатков для регрессионных моделей расчета тягового сопротивления лесного плуга (a) и высоты образуемого микроповышения (b)
Источник: собственные результаты авторов

Figure 5. Histogram of the initial residues for regression models for calculating the draught resistance of a forest plow (a) and the height of the resulting microhill (b)

Source: authors' own scheme

Представленные на рис. 6 графики наблюдаемых и предсказанных значений для каждого составленного регрессионного уравнения позволяют оценить качество описания исследуемых процессов разработанными моделями. Кроме того, данные графики позволяют установить наличие выбросов данных.

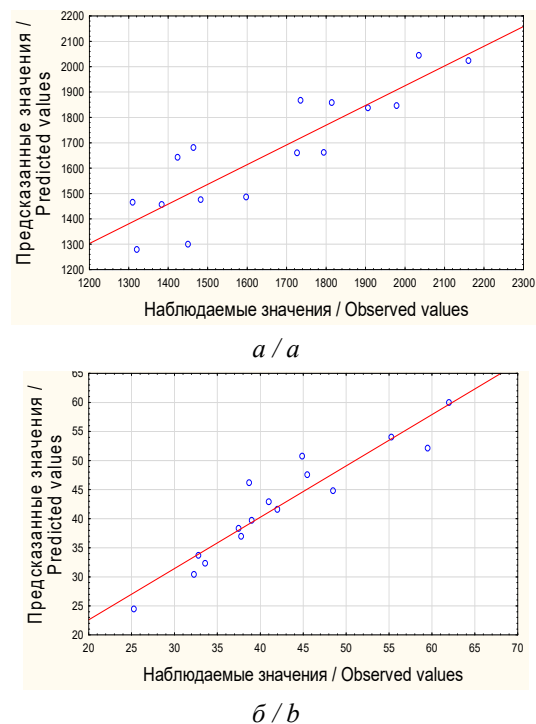


Рисунок 6. Графики наблюдаемых и предсказанных значений для регрессионных моделей расчета тягового сопротивления лесного плуга (a) и высоты образуемого микроповышения (b)

Источник: собственные результаты авторов
Figure 6. Graphs of observed and predicted values for regression models for calculating the draught resistance of a forest plow (a) and the height of the resulting microhill (b)

Source: authors' own scheme

Для оптимизации значений задействованных в эксперименте конструктивных параметров лесного плуга и влажности обрабатываемой почвы использована функция желательности Харрингтона. Данный метод применяется в экономических, технических, экологических, социальных и других многокритериальных задачах для оценки и поиска оптимальных параметров исследуемых процессов.

Для значений отклика по каждой регрессионной модели были определены уровни желательности достигаемых величин с учетом условий поставленной оптимизационной задачи и данных, полученных в процессе экспериментов: тяговое сопротивление орудия необходимо минимизировать при одновременном получении микроповышения максимальной высоты (табл. 8).

С использованием автоматизированной системы статистических вычислений были построены двумерные поверхности отклика функции желательности вида $d(X_i, X_j)$, где i и j – порядковые номера входных факторов, задействованных в экспери-

менте) для предсказанных значений зависимых переменных Y , показывающие взаимосвязь между каждым из входных факторов X . Возможные комбинации влияния уровней задействованных в экспериментах параметров на величину их желательности представлены на рис. 7.

Таблица 8

Уровни желательности для зависимых переменных Y_1 и Y_2

Table 8

Desirability levels for dependent variables Y_1 and Y_2

Зависимая переменная Y_1 – Тяговое сопротивление / Dependent variable Y_1 – Draught resistance		
Уровень / Level	Значение, Н / Value, N	Значение по шкале желательности / Value on the desirability scale
Нежелательно / Undesirable	2200	0
Удовлетворительно / Satisfactory	1600	0,5
Наиболее желательно / Most desirable	1100	1
Зависимая переменная Y_2 – Высота микроповышения / Dependent variable Y_2 – Microhill height		
Уровень / Level	Значение, Н / Value, N	Значение по шкале желательности / Value on the desirability scale
Нежелательно / Undesirable	20	0
Удовлетворительно / Satisfactory	40	0,5
Наиболее желательно / Most desirable	60	1

Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

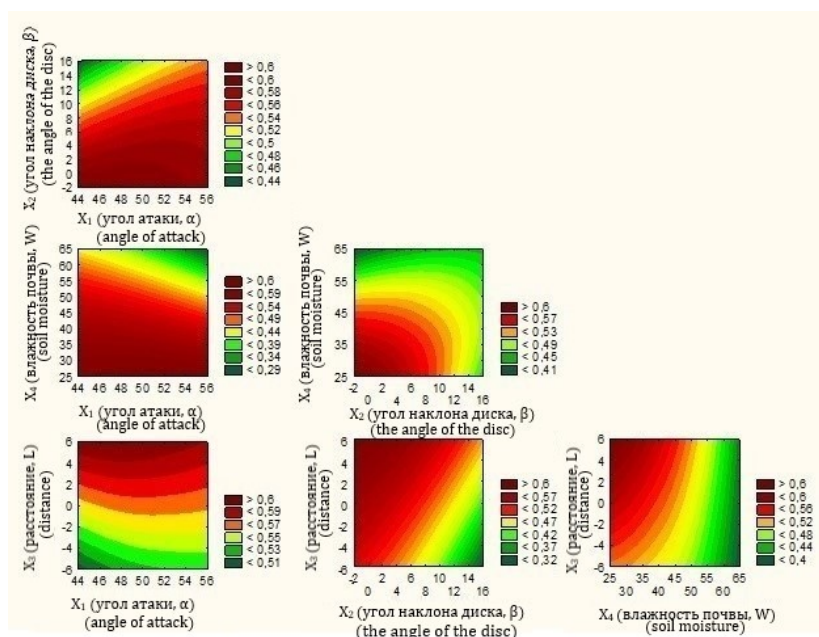


Рисунок 7. Поверхности отклика функции желательности для предсказанных значений зависимых переменных Y_1 и Y_2

Figure 7. Desirability function response surfaces for predicted values of dependent variables Y_1 and Y_2

Источник: собственные результаты авторов / Source: authors' own scheme

Обсуждение

Применение обобщенной функции желательности Харрингтона позволяет решить поставленную в работе оптимизационную задачу. Данное соответствие отражает зависимость оценочных показателей желательности от натуральных размерных величин (например, полученных экспериментальным путем), переведенных в безразмерные показатели.

Подход, аналогичный используемому в исследовании, был применен в работе [18], где авторами были выявлены частные желательности сравнения тягового сопротивления серийных и экспериментального рабочих органов культиваторов в зависимости от скорости обработки, а также свойств почвенной среды.

В работах [19] и [20] функция желательности Харрингтона используется для объективного выбора наилучшего ввиду своей объективности вари-

анта применяемой машины для сельскохозяйственных операций из целой группы аналогичных. Данный метод усовершенствован в виде использования обобщенного показателя, учитывающего агрономическую, техническую и экономическую оценку выполняемого технологического процесса.

Аппроксимация полученных уравнений регрессии для построения поверхностей отклика функции желательности выполнена методом наименьших квадратов с использованием автоматизированной системы статистической обработки данных.

Оптимальные параметры входных факторов эксперимента были определены путем совместного наложения благоприятных согласно заданным уровням желательности границ каждой из поверхностей отклика на значения независимых переменных X .

Диапазоны их изменения были определены на этапе составления матрицы планирования эксперимента (рис. 8).

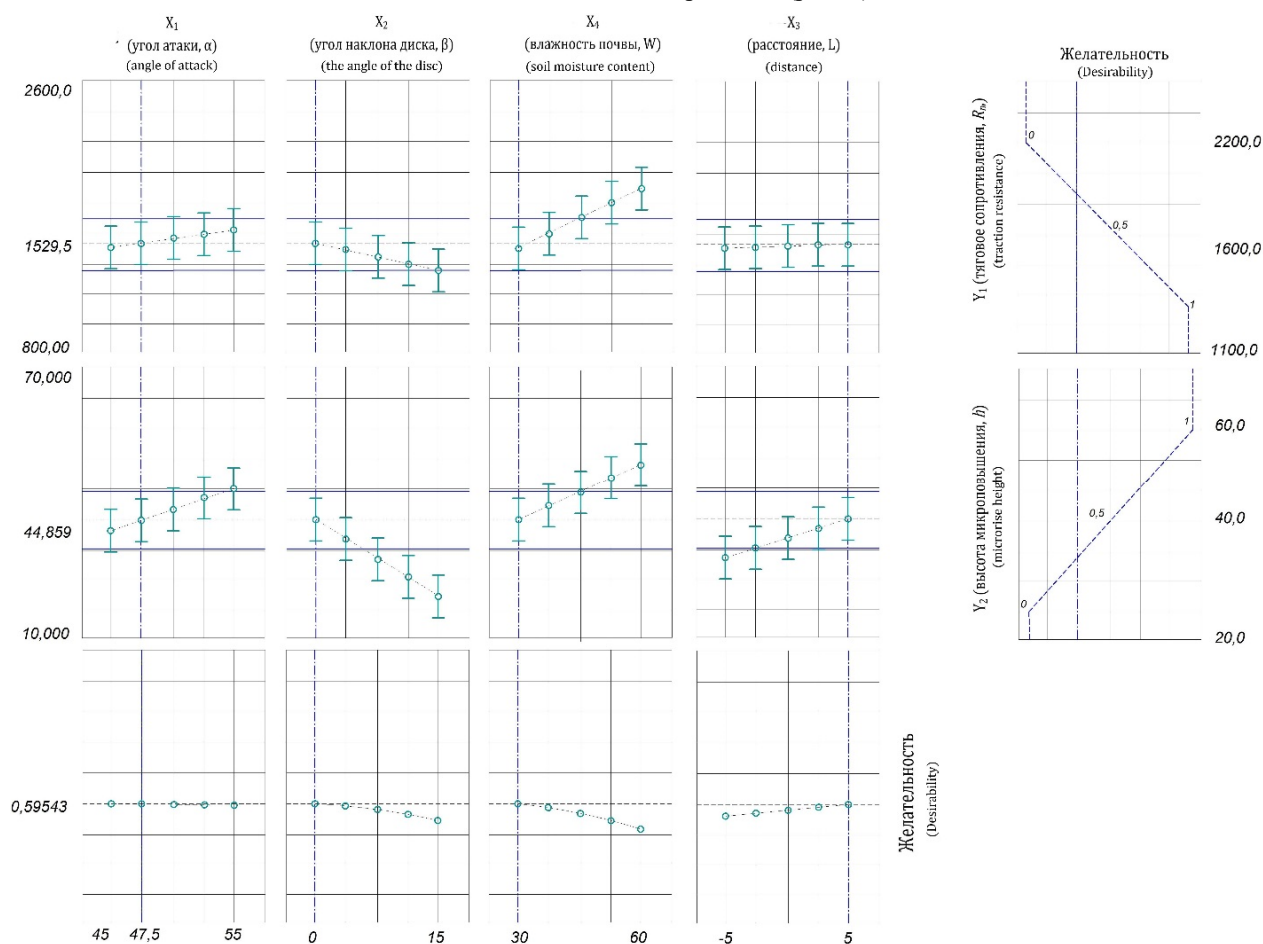


Рисунок 8. Профили желательности входных факторов для предсказанных значений зависимых переменных Y

Figure 8. Desirability profiles of input factors for predicted values of dependent variables Y

Источник: собственные результаты авторов / Source: authors' own scheme

Заключение

По результатам оптимизации установлено, что одновременное достижение наименьшего значения тягового сопротивления лесного плуга с комбинированными рабочими органами и наибольшей высоты образуемого в процессе его работы микроповышения возможно при угле атаки α сферических дисков около 48° (стандартно задаваемое значение при установке дисковых рабочих органов в конструкции плугов – 45°), угле его установки в вертикальной плоскости $\beta = 0^\circ$ и расстоянии L от оси диска до кромки отвала, равном 50 мм.

Влажность почвы в реальных условиях работы лесных почвообрабатывающих орудий является неуправляемым воздействующим фактором. Установленное оптимальное значение влажности – 30 % – необходимо для достижения обозначенного соотношения показателей эффективности ($R_n \rightarrow \min, h \rightarrow \max$). Это подтверждает тот факт, что обработка переувлажненных почв является энергоемким процессом и для агрегатирования плугов, работающих в таких условиях, требуются энергонасыщенные тяговые средства.

Список литературы

1. Семенов М. А., Комарова О. В. Оценка уязвимости лесного хозяйства лесостепной и степной зон Европейской части России к наиболее вероятным изменениям климата. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2022, 3: 76-85. DOI: <https://10.17308/geo/1609-0683/2022/3/76-85>.
2. Проняева Л. И., Павлова А. В., Федотенкова О. А. Развитие лесного комплекса страны: тенденции и перспективы. Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2020, 10(391): 1834-1856. DOI <https://10.24891/ni.16.10.1834>.
3. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change. Science. 2015; 349(6250): 819-22. DOI: <https://doi:10.1126/science.aaa9092>.
4. Ильинцев А. С., Шамонтьев И. Г., Третьяков С. В. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области). Лесотехнический журнал. 2021, 3: 45-62. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4>.
5. Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S., Ge X., Onuchin A., Li Q., Burenina T., Ilintsev A., Hou Y. Forest harvesting and hydrology in boreal Forests: Under an increased and cumulative disturbance context. Forest Ecology and Management. 2022, 522: 120468. DOI: <https://10.1016/j.foreco.2022.120468>.
6. Дымов А. А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор). Почвоведение. 2017, 7: 787-798. DOI: <https://10.7868/S0032180X17070024>.
7. Казаков В. И., Проказин Н. Е., Лобанова Е. Н. Особенности создания и роста культур ели на вырубках с влажными и временно переувлажненными почвами. Лесотехнический журнал. 2013, 1(9): 32-42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20164086>.
8. Ramantswana M., Guerra S. P. S., Ersson B. T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. Current Forestry Reports. 2020, 6 (2): 143–158. DOI: <https://10.1007/s40725-020-00114-7>.
9. Löf M., Dey D., Navarro R., Jacobs D. Mechanical site preparation for forest restoration. New Forests. 2012, 43: 825–848. DOI: <https://10.1007/s11056-012-9332-x>.
10. Uotila K., Rantala J., Saksa T., Hartstela P. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. Silva Fennica. 2010, 44 (3): 511–524. URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf443511.pdf>.
11. Дручинин Д. Ю., Попов М. А. К вопросу создания микроповышений при проведении лесовосстановления в условиях временно переувлажняемых почв. Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Вологда, 2021: 48-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47901595>.
12. Дручинин Д. Ю., Камалова Н. С., Попов М. А. Формализованная модель перемещения почвы по поверхностям рабочих органов лесного плуга для образования микроповышений. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245: 200-214. DOI: <https://10.21266/2079-4304.2023.245.200-214>.

13. Новиков А. И., Новикова Т. П. Априорное ранжирование факторов в моделировании технических систем. Моделирование систем и процессов. 2016, 9-1: 37-40. DOI: <https://10.12737/21625>.
14. Тишанинов Н. П. Особенности решения задач с применением методов интегрирования мнения. Наука в центральной России. 2020, 1(43): 21-27. DOI: <https://10.35887/2305-2538-2020-1-21-27>.
15. Борисова Л. В., Димитров В. П., Зубрилина Е. М. О задаче выбора сельхозмашин на основе многокритериального анализа. От модернизации к опережающему развитию: обеспечение конкурентоспособности и научного лидерства АПК. Екатеринбург, 2022: 23-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49870568>.
16. Слепенков А. Е., Кулинченко С. Н., Щитов С. В. [и др.]. Регрессионно-дисперсионный анализ экспериментальных данных процесса боронования опытным машинно-тракторным агрегатом. Евразийское Научное Объединение. 2020, 11-2(69): 136-140. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44448045>.
17. Saeed R., Askari M., Jannatkah J. Performance of Tractor and Tillage Implements in Clay Soil. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2017, 16: 154–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>.
18. Бабицкий Л. Ф., Белов А. В., Дудченко П. С., Шиков Д. К. Использование функции Харрингтона при экспериментальных исследованиях рабочих органов культиваторов. Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2022, 32(195): 172-184. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50252868>.
19. Пичкалев А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств. Исследования наукограда. 2012, 1(1): 25-28. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17848548>.
20. Маслов Г. Г., Трубилин Е. И., Цыбулевский В. В., Василенко Н. Б. Функция Харрингтона в исследованиях сельскохозяйственной техники. Таврический вестник аграрной науки. 2022, 3(31): 116-124. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49865414>.

References

1. Semenov M. A., Komarova O. V. Ocenka uyazvimosti lesnogo hozyajstva lesostepnoj i stepnoj zon Evropejskoj chasti Rossii k naibolee vero-yatnym izmeneniyam klimata. [Assessment of the vulnerability of forestry in the forest-steppe and steppe zones of the European part of Russia to the most likely climate changes]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology. 2022; 3: 76-85. (In Russ.). DOI: <https://10.17308/geo/1609-0683/2022/3/76-85>
2. Pronyaeva L. I., Pavlova A. V., Fedotenkova O. A. Razvitie lesnogo kompleksa strany: tendencii i perspektivy` [Development of the country's forest complex: trends and prospects]. National interests: priorities and security. 2020; 10(391): 1834-1856. DOI: <https://10.24891/ni.16.10.1834>.
3. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change. Science. 2015; 349(6250): 819-22. DOI: <https://doi:10.1126/science.aaa9092>.
4. Ilyintsev A. S., Shamontyev I. G., Tretyakov S. V. Sovremennaya dinamika lesopol'zovaniya v boreal'ny`x lesax Rossii (na primere Arxangel'skoj oblasti). [Modern dynamics of forest management in boreal forests of Russia (on the example of the Arkhangelsk region)]. Forestry Engineering Journal. 2021; 3: 45-62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4>.
5. Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S., Ge X., Onuchin A., Li Q., Burenina T., Ilintsev A., Hou Y. Forest harvesting and hydrology in boreal Forests: Under an increased and cumulative disturbance context. Forest Ecology and Management. 2022, 522: 120468. DOI: <https://10.1016/j.foreco.2022.120468>.
6. Dymov A. A. Vliyanie sploshny`x rubok v boreal'ny`x lesax Rossii na pochvy` (obzor) [The effect of continuous logging in boreal forests of Russia on soils (review)]. Soil science. 2017; 7: 787-798. (In Russ.) DOI: <https://10.7868/S0032180X17070024>.
7. Kazakov V. I., Prokazin N. E., Lobanova E. N. Osobennosti sozdaniya i rosta kul'tur eli na vy`rubkax s vlazhny`mi i vremenno pereuvlazhnenny`mi pochvami. [Features of the creation and growth of spruce crops in cuttings

with moist and temporarily waterlogged soils]. *Forestry Engineering Journal*. 2013;1(9):32-42. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20164086>.

8. Ramantswana M., Guerra S. P. S., Ersson B. T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. *Current Forestry Reports*. 2020; 6(2): 143–158. DOI: <https://10.1007/s40725-020-00114-7>.

9. Löf M., Dey D., Navarro R., Jacobs D. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*. 2012, 43: 825–848. DOI: <https://10.1007/s11056-012-9332-x>.

10. Uotila K., Rantala J., Saksa T., Hartstela P. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. *Silva Fennica*. 2010; 44(3): 511–524. URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf443511.pdf>.

11. Druchinin D. Yu., Popov M. A. K voprosu sozdaniya mikropovy`shenij pri provedenii lesovosstanovleniya v usloviyax vremenno pereuvlazhnyaemy`x pochv [On the issue of creating micro-elevations during reforestation in conditions of temporarily waterlogged soils]. *Actual problems of the development of the forest complex*. Vologda, 2021:48-53. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47901595>.

12. Druchinin D. Yu., Kamalova N. S., Popov M. A. Formalizovannaya model` peremeshheniya pochvy` po poverxnostyam rabochix organov lesnogo pluga dlya obrazovaniya mikropovy`shenij [A formalized model of soil movement on the surfaces of the working parts of a forest plow for the formation of microhills]. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2023; 245: 200-214. (In Russ.). DOI: <https://10.21266/2079-4304.2023.245.200-214>.

13. Novikov A. I., Novikova T. P. Apriornoe ranzhirovanie faktorov v modelirovanii tekhnicheskix system. [A priori ranking of factors in the modeling of technical systems]. *Modeling of systems and processes*. 2016; 9-1: 37-40. (In Russ.). DOI: <https://10.12737/21625>.

14. Tishaninov N. P. Osobennosti resheniya zadach s primeneniem metodov integrirovaniya mneniya [Features of solving problems using methods of integrating opinions]. *Science in central Russia*. 2020; 1(43): 21-27. (In Russ.). DOI: <https://10.35887/2305-2538-2020-1-21-27>.

15. Borisova L. V., Dimitrov V. P., Zubrilina E. M. O zadache vy`bora sel`hozmashin na osnove mnogokriterial`nogo analiza. [On the task of selecting agricultural machinery based on a multi-criteria analysis]. *From modernization to advanced development: ensuring the competitiveness and scientific leadership of the agro-industrial complex*. Yekaterinburg, 2022: 23-27. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49870568>.

16. Slepnev A. E., Kulinchenko S. N., Shchitov S. V. [et al.]. Regressionno-dispersionny`j analiz e`ksperimental`ny`x danny`x processa boronovaniya opy`tny`m mashinno-traktorny`m agregatom. [Regression and dispersion analysis of experimental data of the harrowing process by an experimental machine-tractor unit]. *Eurasian Scientific Association*. 2020; 11-2(69): 136-140. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44448045>.

17. Saeed R., Askari M., Jannatkah J. 'Performance of Tractor and Tillage Implements in Clay Soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2017; 16: 154–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>.

18. Babitsky L. F., Belov A. V., Dudchenko P. S., Shishkov D. K. Ispol`zovanie funkcii Xarringtona pri e`ksperimental`ny`x issledovaniyax rabochix organov kul`tivatorov. [The use of the Harrington function in experimental studies of the working organs of cultivators]. *Proceedings of the agricultural science of Taurida*. 2022; 32(195): 172-184. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50252868>.

19. Pichkalev A. V. Obobshhennaya funkciya zhelatel`nosti Xarringtona dlya sravnitel`nogo analiza tekhnicheskix sredstv [Generalized Harrington desirability function for comparative analysis of technical means]. *Research of the science city*. 2012;1(1):25-28. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17848548>.

20. Maslov G. G., Trubilin E. I., Tsybulevsky V. V., Vasilenko N. B. Funkciya Xarringtona v issledovaniyax sel`skozhnyaystvennoj tekhniki [The Harrington function in agricultural machinery research]. *Tauride Bulletin of Agrarian Science*. 2022; 3(31): 116-124. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49865414>.

Сведения об авторах

✉ *Дручинин Денис Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

Попов Максим Александрович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6356-5028>, e-mail: popovmaxim98@mail.ru.

Зимарин Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6822-624X>, e-mail: sezimarin@yandex.ru.

Третьяков Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-5834-1010>, e-mail: tretyakov-ai@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Denis Yu. Druchinin* – Cand. Sci. (Technical), Docent, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

Maksim A. Popov – Postgraduate student (Tech.), Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>, e-mail: popovmaxim98@mail.ru.

Sergei V. Zimarin – Cand. Sci. (Technical), Docent, Associate professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>, e-mail: sezimarin@yandex.ru.

Alexander I. Tretyakov – Cand. Sci. (Technical), Associate professor of the Chair of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5834-1010>, e-mail: tretyakov-ai@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author