

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 631.312.3

DOI: 10.18324/2077-5415-2026-1-81-90

Анализ конструкций, массомощностных и технологических параметров лесных плугов

М.А. Гнусов^a, Д.Ю. Дручинин^b, Д.С. Черенков^c, М.А. Попов^d, В.Р. Фатхулин^e

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

^a mgnusov@yandex.ru, ^b druchinin.denis@rambler.ru, ^c chierienkov1999@mail.ru, ^d popovmaxim98@mail.ru, ^e injener25776@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>,^c <https://orcid.org/0009-0000-1257-6902>, ^d <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>,^e <https://orcid.org/0009-0008-6240-4832>

Статья поступила 22.12.2025, принята 27.01.2026

Проанализированы конструкции и параметры рабочего процесса лемешных и дисковых почвообрабатывающих орудий для основной обработки почвы на лесных площадях. Предложено разделение выбранных орудий на два кластера: к первому кластеру отнесены орудия для выполнения обработки почвы на небольших глубинах с минимально необходимой шириной борозды, агрегируемые с тракторами класса тяги до 1,4; во втором – массивные орудия для выполнения обработки почвы с любыми требуемыми параметрами по ширине и глубине борозды, агрегируемые с тракторами класса тяги не менее 3. При проведении факторного анализа установлено, что первая главная компонента определяет массогабаритные характеристики орудий, при этом эти же характеристики являются базовыми параметрами кластеров, вторая главная компонента определяет технологические параметры обработки. Также установлено, что наиболее информативными характеристиками орудий являются минимальный тяговый класс трактора, с которым агрегируется орудие и ширина борозд под посадку лесных культур, которую оно обеспечивает. Предложена новая конструкция лесного плуга, дисковые корпуса которого оснащены гиперболическими отвалами для обеспечения качественной обработки почвы в условиях нераскорчёванных вырубков. Это позволяет избежать материально затратной операции по корчёвке пней и наряду с этим снизить отрицательное воздействие на почву и повысить приживаемость высаживаемых растений. Выполнен дискриминантный анализ, по результатам которого построены линейные классификационные функции, позволяющие отнести любое орудие к предложенным кластерам. Данный анализ подтвердил правильность нахождения орудий в соответствующем кластере и позволил отнести разрабатываемый плуг с гиперболическими отвалами к первому кластеру орудий.

Ключевые слова: лесное хозяйство; обработка почвы; борозда; лесной плуг; рабочий орган; технологические параметры; кластерный анализ.

Analysis of designs, mass-capacity and technological parameters of forest ploughs

М.А. Gnusov^a, D.Yu. Druchinin^b, D.S. Cherenkov^c, M.A. Popov^d, V.R. Fatkhulin^e

Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

^a mgnusov@yandex.ru, ^b druchinin.denis@rambler.ru, ^c chierienkov1999@mail.ru, ^d popovmaxim98@mail.ru, ^e injener25776@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>,^c <https://orcid.org/0009-0000-1257-6902>, ^d <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>,^e <https://orcid.org/0009-0008-6240-4832>

Received 22.12.2025, accepted 27.01.2026

The designs and parameters of the working process of ploughshares and disk tillage tools for basic tillage in forest areas are analyzed. The cluster, factorial and discriminant analyses of the tools selected for the study are presented. It is proposed to divide the selected tools into two clusters: the first cluster includes tools for performing tillage at shallow depths with the minimum required ridge width, aggregated with drawbar category tractors up to 1,4; the second cluster includes massive tools for performing tillage with any required parameters in width and depth of ridge, aggregated with drawbar category tractors at least 3. During the factor analysis, it is found that the first main component determines the mass-dimensional characteristics of the tools, while these same characteristics are the basic parameters of the clusters, the second main component determines the technological parameters of processing. It is also established that the most informative characteristics of the tools are the minimum drawbar category of the tractor with which the tool is aggregated and the width of the ridges for planting forest plantation, which it provides. A new design of a forest plough has been proposed, the disk plow bottom of which are equipped with hyperboloid earthboards to ensure high-quality tillage in conditions of non-grubbing cutting-downs. This allows one to avoid the financially costly operation of grubbing and at the same time reduce the negative impact on the soil and increase the survival rate of the planted plants. A discriminant analysis is performed, based on the results of which linear classification functions are constructed that make

it possible to assign any tool to the proposed clusters. This analysis confirms the correctness of the location of the tools in the relevant cluster and makes it possible to assign the developed plough with hyperboloid earthboards to the first cluster of tools.

Keywords: forestry; cultivation; ridge; forest plough; working part; technological parameters; clustering analysis.

Введение. Возделывание почвы при выращивании растений является одной из основных для их качественного роста и развития, но в то же время трудоёмких операций. В лесном хозяйстве за весь период развития средств механизации отрасли разработаны различные орудия для обработки лесной почвы. Среди активно используемых серийных образцов можно выделить модели плугов ПКЛ-70, ПЛ-1, ПД-0,7 и другие [1]. Однако существующие конструкции лесных орудий часто низкоэффективны при работе на нераскорчёванных вырубках, так как плохо преодолевают препятствия и испытывают большие ударные нагрузки при встрече с ними, что приводит к выходу из строя их рабочих органов. Дисковые орудия не обеспечивают требуемого качества обработки лесных почв в плане оборота и сохранности почвенного пласта, что подтверждают исследования, проводимые целым рядом авторов.

Проблема неудовлетворительной работы почвообрабатывающих орудий в лесных условиях рассмотрена в работах С.В. Зимарина и Д.Ю. Дручинина с соавторами [2, 3]. Подробный анализ условий эксплуатации лесных почвообрабатывающих агрегатов с пассивными рабочими органами сделан В.И. Посметьевым и В.А. Зеликовым [4].

Вырубка, особенно нераскорчёванная, как объект последующего лесовосстановления является сложной территорией для ведения механизированных работ из-за наличия большого числа различных препятствий [5]. С учётом этого С.Н. Долматов и Н.В. Сухенко в работе [6] проанализировали влияние параметров дисковых рабочих органов на эффективность нарезки борозд в лесных условиях и сформировали требования к работе дисковых плугов на вырубках.

В статье [7] М.Н. Лысич сделал вывод об эффективности эксплуатации сферических дисков в тяжёлых условиях каменистых почв и вырубков, причём форма рабочих органов будет зависеть от условий применения.

S. Almaliki на основе выполненных экспериментальных исследований тягового сопротивления различных почвообрабатывающих рабочих органов установил, что наименьшим сопротивлением обработки обладают сферические диски [8].

В то же время, в статье [9] по итогам оценки характеристик современных орудий для нарезки борозд при лесовосстановлении представлены достоинства и недостатки конструкций лемешных и дисковых плугов, где среди прочего отмечены сложности оборота подрезанных почвенных масс дисковыми рабочими органами. Для улучшения оборота пласта и заделки дернины В.Н. Коротких по результатам своих исследований рекомендует дооснащать рабочие органы дискового плуга дополнительным отвалом [10].

Коллектив учёных под руководством С.В. Малюкова в работе [11], оценив достоинства и недостатки применения дисковых рабочих органов на лесных почвах, рекомендовал к разработке орудия с комбинированными рабочими органами.

Зарубежными специалистами в области восстановления природных насаждений также реализуются исследования касаются повышения эффективности обработки лесной почвы на вырубках и интенсификации

процессов лесовосстановления [12]. В работе М. Puyal отмечается, что в основных лесных странах мира с учётом их конкретных природно-производственных условий для соответствия характеристикам участка и целям лесоводства разработаны различные методы механической подготовки почвы, которые отличаются используемым оборудованием и подходами к их реализации [13].

В частности, М. Löf с соавторами в статье [14] приходят к выводу о положительном влиянии интенсивной механической подготовки почвы на продуктивность развития лесных культур, для выполнения которой требуются современные средства механизации. Схожие данные об эффективности применения пяти различных способов механической обработки почвы на восстанавливаемых участках в бореальной зоне собраны группой учёных под руководством U. Sikström [15].

Ряд иностранных авторов рассматривают вопрос подготовки лесной почвы в совокупности с показателями экономической эффективности процесса лесовосстановления в целом, где технология механического воздействия на почву играет важную роль в общих затратах [16, 17, 18].

На основе обобщения результатов ранее выполненных исследований и производственного опыта отрасли можно сделать вывод о перспективности использования для обработки почвы в лесном хозяйстве комбинированных ресурсосберегающих орудий, способных эффективно работать на нераскорчёванных вырубках. В основе конструкции таких орудий лежит сферический диск, оснащённый дополнительным отвалом. Рассматриваемые орудия способны преодолевать препятствия в виде пней и порубочных остатков, перекатываясь через них, и обеспечивать требуемую технологию обработки почвы.

Предлагается для обеспечения качественной обработки почвы сферические диски оснастить гиперболоидными отвалами.

Корпус комбинированного типа (рис. 1) состоит из стойки 1, на оси 4 которой свободно установлен на подшипниках сферический диск 2 и гиперболоидный отвал 3. В процессе работы корпуса сферический диск подрезает почву, которая затем под воздействием гиперболоидного отвала оборачивается и укладывается рядом с бороздой, сохраняя свою целостность.

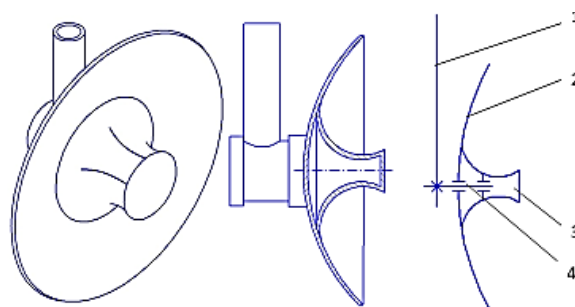


Рис. 1. Дисковый корпус плуга с гиперболоидным отвалом: 1 – стойка; 2 – сферический диск; 3 – гиперболоидный отвал; 4 – ось

Разрабатываемая в ВГЛТУ конструкция лесного плуга, оснащённая представленными корпусами 1, показана на рис. 2. Помимо дисковых рабочих органов она включает сварную раму треугольной формы 2 с системой навески на трактор 3 и опорное колесо 4 для регулировки глубины создаваемой борозды.

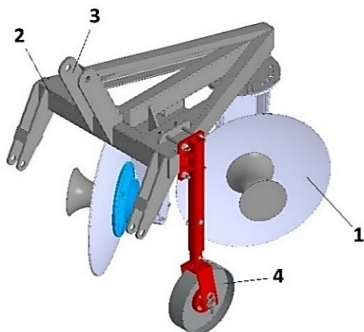


Рис. 2. Дисковый плуг с гиперболоидными отвалами

Таблица 1. Характеристики лесных орудий

Орудие	Минимальный тяговый класс трактора	Максимальная ширина минерализованной полосы, мм	Ширина борозды под посадку лесных культур, мм	Максимальная глубина борозды под посадку лесных культур, мм	Масса, кг
ПКЛ-700А	1,4	1400	700	120	400
ПЛ-1	2	1400	1000	150	550
ПЛЛ-1,4	0,9	1400	500	150	150
ППН-50	3	1200	400	120	615
ПЛП-135	3	1800	700	150	850
ПНД-4-30	3	1200	700	200	770
ПДП-1,2	1,4	1200	700	120	295
ПД-0,7	0,9	1200	700	180	250
ПЛД-1,2	3	1400	1200	250	930
ПДВ-1,5	3	1500	700	150	950

Результаты исследований. Для сравнения характеристик орудий выполнен кластерный анализ выбранных орудий с использованием компьютерных средств

Для определения требований к технологическим параметрам, достигаемым в процессе эксплуатации проектируемого плуга, требуется оценка рабочих характеристик существующих конструкций. Целью работы является проведение статистического анализа серийно выпускаемых лесных почвообрабатывающих орудий для установления исходных лесотехнических требований к разрабатываемому плугу для нераскорчёванных вырубков.

Материалы и методы. Анализ технологических параметров лесных плугов был реализован с использованием иерархического агломеративного метода, который широко применяется в науке и технике [19, 20]. К исследованию представлена группа серийно выпускаемых лесных орудий для основной обработки почвы, параметры технологического процесса и массомощностные характеристики которых представлены в табл. 1.

статистической обработки данных. Первоначально проведена стандартизация данных (табл. 2).

Таблица 2. Стандартизированные характеристики орудий

Орудие	Минимальный тяговый класс трактора	Максимальная ширина минерализованной полосы	Ширина борозды под посадку лесных культур	Максимальная глубина борозды под посадку лесных культур	Масса
ПКЛ-700А	-0,725	-0,249	-0,163	-1,021	-0,527
ПЛ-1	0,932	0,999	2,277	-0,527	0,195
ПЛЛ-1,4	-1,242	-0,666	-1,789	-0,527	-1,429
ПЭ-01	-0,725	-0,249	-0,163	-0,527	-0,346
ПЛП-135	0,932	2,457	-0,163	1,944	1,097
ПНД-2	-0,725	-0,666	-0,163	1,120	-0,797
ПД-0,7	-1,242	-0,666	-0,163	-0,527	-1,104
ПЛТ-1	0,932	-0,249	-0,163	-0,527	0,357
ПЛД-1,2	0,932	-0,666	-0,163	1,120	1,097
ПДВ-1,5	0,932	-0,0416	0,651	-0,527	1,458

Иерархический кластерный анализ был реализован с использованием агломеративного метода, что позволило построить дендрограмму на рис. 3. В качестве способа иерархического объединения принят метод Варда, а в качестве меры близости – евклидово расстояние.

После чего была построена диаграмма рассеяния для рассматриваемых лесных плугов (рис. 3): на основании полученных данных были намечены два кластера орудий, после чего разведочный анализ был завершён.

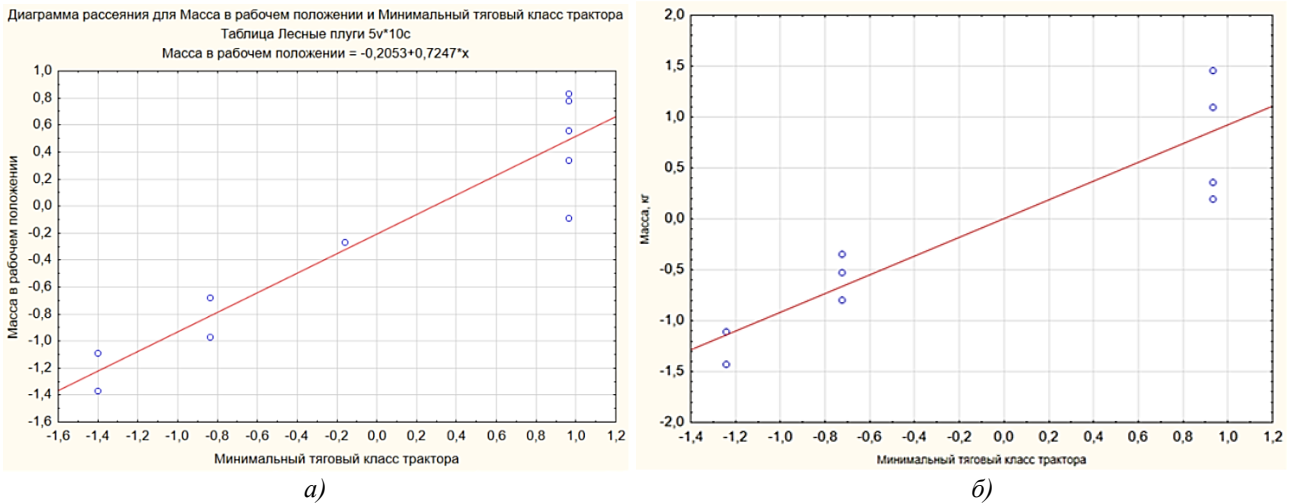


Рис. 3. Дендрограмма для десяти моделей рассматриваемых лесных плугов (а) и диаграмма рассеяния (б)

Проведённый кластерный анализ k-средних позволил найти евклидовы расстояния между кластерами (табл. 3), составить таблицы разделения орудий на кластеры (табл. 4) и построить графики средних для кластеров (рис. 4). Графики средних существенно разнятся, что свидетельствует о правильном разбиении на кластеры.

Таблица 3. Евклидовы расстояния между кластерами

Номер кластера	Евклидовы расстояния между кластерами	
	Но. 1	Но. 2
Но. 1	0,000	1,721
Но. 2	1,312	0,000

Таблица 4. Итоговое распределение орудий по кластерам

Орудие	Минимальный тяговый класс трактора	Максимальная ширина минерализованной полосы	Ширина борозды под посадку лесных культур	Максимальная глубина борозды под посадку лесных культур	Масса в рабочем положении	КЛАСТЕР
ПКЛ-700А	-0,725	-0,249	-0,163	-1,021	-0,527	1
ПЛ-1	0,932	0,999	2,277	-0,527	0,195	2
ПЛЛ-1,4	-1,242	-0,666	-1,789	-0,527	-1,429	1
ПЭ-01	-0,725	-0,249	-0,163	-0,527	-0,346	1
ПЛП-135	0,932	2,457	-0,163	1,944	1,097	2
ПНД-2	-0,725	-0,666	-0,163	1,120	-0,797	1
ПД-0,7	-1,242	-0,666	-0,163	-0,527	-1,104	1
ПЛТ-1	0,932	-0,249	-0,163	-0,527	0,357	2
ПЛД-1,2	0,932	-0,666	-0,163	1,120	1,097	2
ПДВ-1,5	0,932	-0,0416	0,651	-0,527	1,458	2

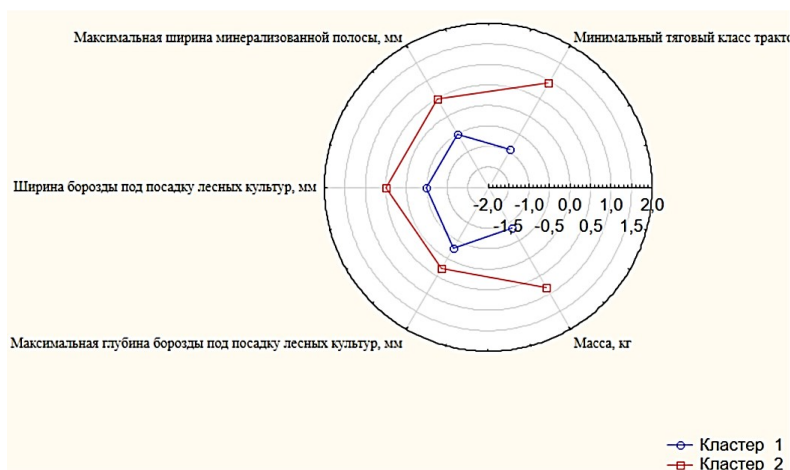


Рис. 4. Графики средних для полученных кластеров

На основании полученных данных был выполнен факторный анализ принятых к рассмотрению орудий. В результате построена матрица корреляций с определением собственных значений главных компонент

(табл. 5), оценено влияние характеристик орудий на главные компоненты (табл. 6) и построен график «каменистой осыпи» (рис. 5).

Таблица 5. Матрица корреляций

Номер значения	Собственные значения матрицы корреляций			
	Собственные значения	Процент общей дисперсии	Кумулятивные собственные значения	Кумулятивные значения в процентах
1	2,876	57,526	2,876	57,526
2	1,123	22,468	3,999	79,995
3	0,602	12,059	4,602	92,054
4	0,328	6,562	4,931	98,615
5	0,069	1,384	5,00	100,00

Таблица 6. Вклад переменных на основе корреляций

Переменная	Вклад переменных на основе корреляций				
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Минимальный тяговый класс трактора	0,301	0,014	0,123	0,015	0,545
Максимальная ширина минерализованной полосы	0,195	0,033	0,536	0,233	0,001
Ширина борозды под посадку лесных культур	0,134	0,382	0,106	0,363	0,013
Максимальная глубина борозды под посадку лесных культур	0,085	0,569	0,0005	0,343	0,0001
Масса в рабочем положении	0,283	0,0003	0,232	0,043	0,440

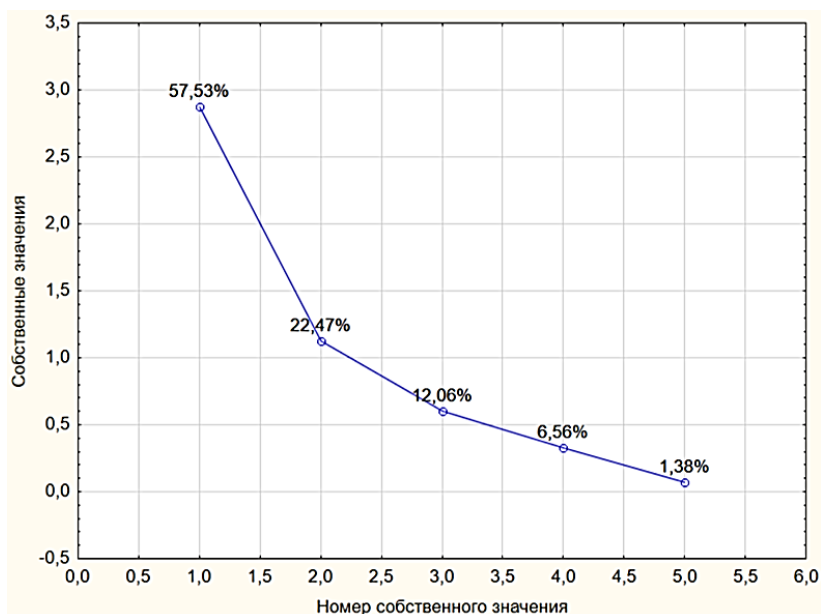


Рис. 5. График «каменистой осыпи»

Из факторного анализа следует, что три первых фактора покрывают дисперсию на 92 %, при этом в рассмотрение по критерию Кайзера принимаем первые два фактора для которых собственные числа ковариацион-

ной матрицы больше 1 и соответственно составляют 2,648 и 1,263. Рассчитаем факторные нагрузки (табл. 7) и построим график факторных нагрузок (рис. 6).

Таблица 7. Факторные нагрузки

Переменная	Фактор нагрузки	
	Фактор 1	Фактор 2
Минимальный тяговый класс трактора	0,867	0,361
Максимальная ширина минерализованной полосы	0,549	0,546
Ширина борозды под посадку лесных культур	0,867	-0,251
Максимальная глубина борозды под посадку лесных культур	0,024	0,941
Масса	0,789	0,438

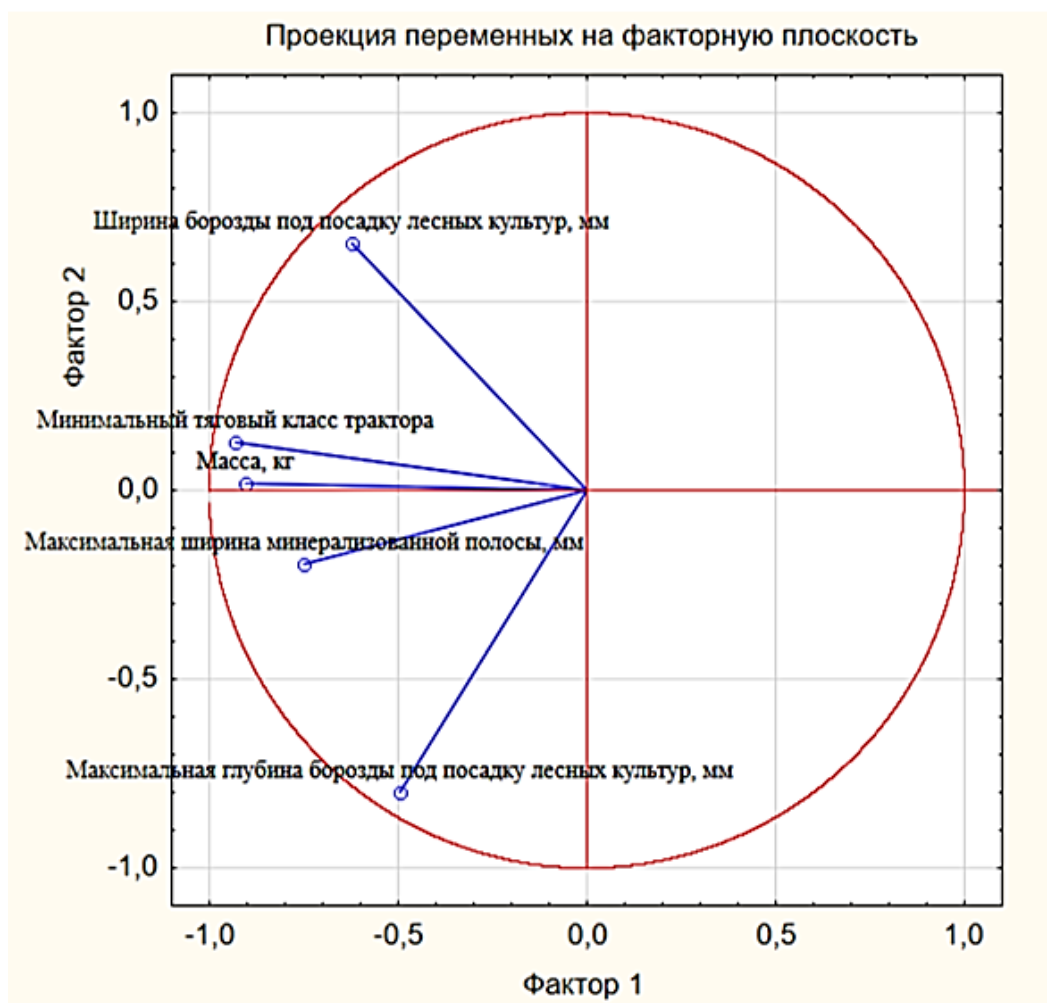


Рис. 6. Факторные нагрузки

Таким образом, на первую главную компоненту наиболее сильно влияют масса орудия и тяговый класс агрегируемого с ним трактора, на вторую – глубина и ширина борозды под посадку лесных культур, следовательно, первая главная компонента определяет массо-мощностные характеристики орудий, а вторая – технологические параметры обработки.

Далее было определено влияние орудий на главные компоненты (табл. 8, рис. 7): можно отметить, что на первую и вторую главные компоненты определяющим

образом влияет орудие ПЛП-135, существенно влияют на первую главную компоненту орудие ПЛЛ-1,4, на вторую – орудие ПЛ-1.

На основании рассмотрения связей между характеристиками орудий (рис. 8) установлено, что с возрастанием ширины борозды под посадку лесных культур увеличивается и ширина минерализованной полосы, при этом с одновременным уменьшением глубины обработки снижается и ширина минерализованной полосы.

Таблица 8. Влияние орудий на главные компоненты

Орудия	Влияние орудий на главные компоненты				
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
ПКЛ-700А	5,086	3,800	1,154	4,799	4,769
ПЛ-1	11,656	29,876	19,999	6,119	10,702
ПЛЛ-1,4	25,064	5,737	0,034	12,797	10,117
ПЭ-01	3,175	0,619	0,559	0,522	13,085
ПЛП-135	27,983	35,162	16,010	8,149	0,869
ПНД-2	2,780	8,477	0,283	43,762	0,390
ПД-0,7	12,215	0,619	3,209	3,029	3,677
ПЛТ-1	0,549	2,099	10,315	7,690	35,498
ПЛД-1,2	4,416	4,746	34,755	9,762	0,033
ПДВ-1,5	7,072	8,860	13,676	3,367	20,855

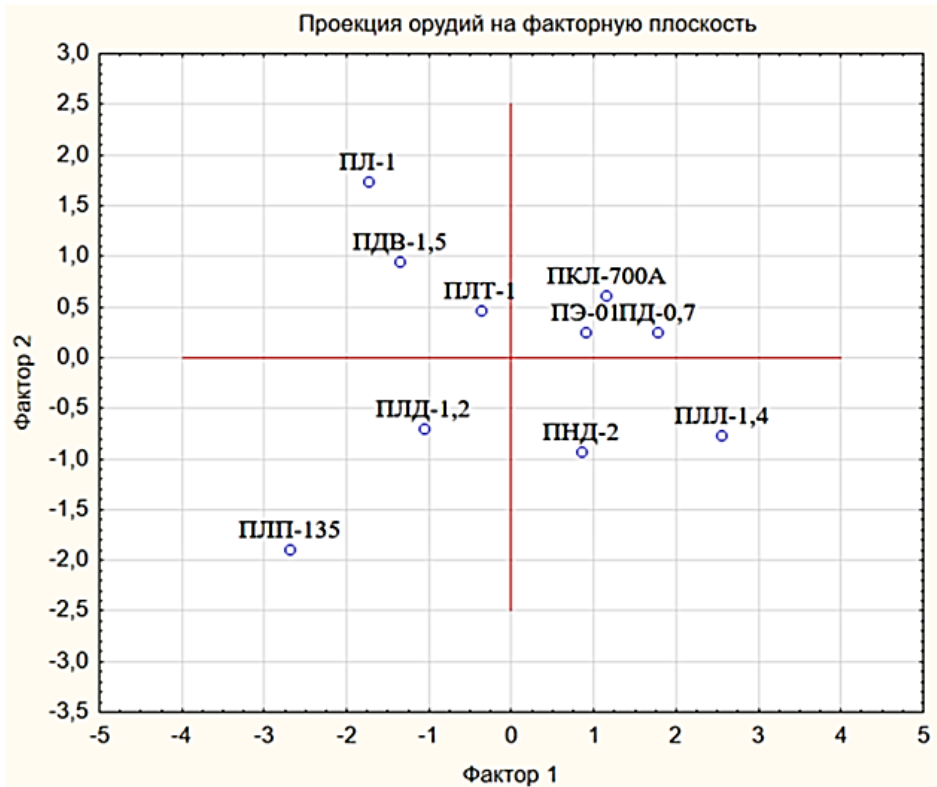


Рис. 7. Проекция орудий на факторную плоскость

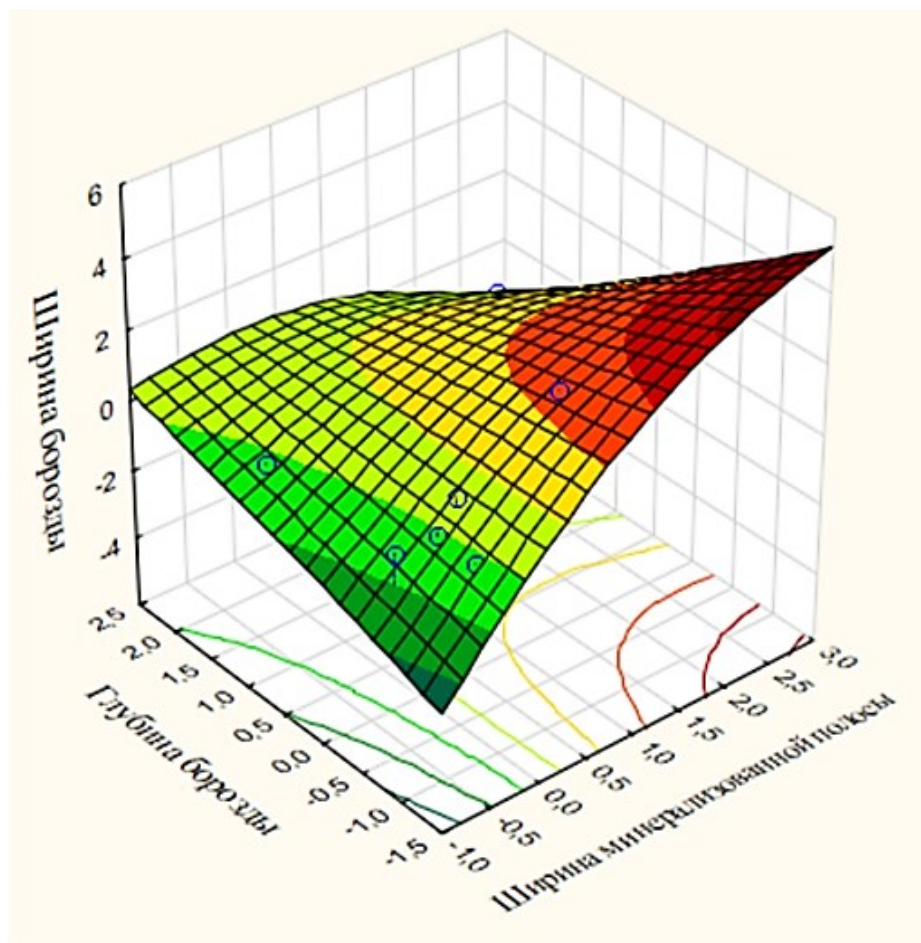


Рис. 8. Связь между шириной борозды, глубиной обработки и максимальной шириной минерализованной полосы

Следующим был выполнен дискриминантный анализ выбранного перечня лесных орудий, разделённых на два кластера.

Линейная дискриминантная (классификационная) функция получена в виде многочлена:

$$F = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

Задача реализуемого дискриминантного анализа – найти коэффициенты (a, b_1, \dots, b_n) линейной дискриминантной функции (F), с помощью которой можно максимально чётко обосновать разделение объектов по исходным группам и определить вес каждой дискриминантной переменной (X_1, \dots, X_n).

Расчётное значение критерия Фишера – $F_{\text{расч}}(k, n - k - 1) = F_{\text{расч}}(5, 4) = 26,05$ (где $k = 5$ – количество независимых переменных, $n = 10$ – количество орудий). Табличное значение критерия Фишера – $F_{\text{табл}}(5, 4) = 4,05$ (принимая $f_1 = 5, f_2 = 4$) при уровне значимости $p = 0,01$.

$F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$ – следовательно, отвергаем нулевую гипотезу, дискриминантный анализ возможен.

Расчётное значение лямбды Уилкса, равное 0,03, свидетельствует о точной дискриминации.

Из табл. 9 следует, что наиболее информативным признаком является X_1 – минимальный тяговый класс трактора, так как он имеет наибольшее значение F -исключ., менее информативными – X_3 – ширина борозд под посадку лесных культур и X_5 – масса орудия.

Таблица 9. Характеристики дискриминантных функций

N = 10	Итоги анализа дискриминантных функций					
	Уилкса Лямбда	Частная Лямбда	F -исключ. (1,4)	p -уров.	Толер.	1-толер. (R-кв.)
Минимальный тяговый класс трактора	0,189	0,157	21,453	0,009	0,533	0,466
Максимальная ширина минерализованной полосы	0,030	0,986	0,053	0,828	0,796	0,203
Ширина борозды под посадку лесных культур	0,033	0,878	0,552	0,498	0,641	0,358
Максимальная глубина борозды под посадку лесных культур	0,030	0,965	0,143	0,724	0,673	0,326
Масса орудия	0,032	0,927	0,312	0,606	0,621	0,378

Табл. 10 отражает квадраты расстояний Махаланобиса от объектов (орудий) до центров кластеров: чем меньше квадрат расстояния Махаланобиса от объекта до центра кластера, тем точнее определено его место в группе. Таким образом, установлено, что ближе к цен-

тру первого кластера находится плуг ПЭ-01, к центру второго – ПЛД-1,2. В целом табл. 10 свидетельствует, что распределение орудий по кластерам выполнено правильно.

Таблица 10. Оценка классификации орудий

Орудие	Квадраты расстояний Махаланобиса от объектов (орудий) до центров кластеров		
	Орудие. Кластер.	Кластер 1	Кластер 2
ПКЛ-700А	G_1:1	2,399	83,345
ПЛ-1	G_2:2	106,674	5,560
ПЛЛ-1,4	G_1:1	4,037	126,648
ПЭ-01	G_1:1	1,719	87,570
ПЛП-135	G_2:2	111,356	6,266
ПНД-2	G_1:1	4,510	92,761
ПД-0,7	G_1:1	4,037	147,459
ПЛТ-1	G_2:2	123,279	4,018
ПЛД-1,2	G_2:2	103,317	3,636
ПДВ-1,5	G_2:2	99,749	3,813

Из табл. 11 виден процент правильного отнесения объектов к группам при проверке линейными класси-

фикационными функциями (правильность разнесения объектов по кластерам 1 и 2 – 100 %).

Таблица 11. Матрица классификаций

Группа	Матрица классификации		
	Процент Правиль.	G_1:1 P=,50000	G_2:2 P=,50000
G_1:1	100,0000	5	0
G_2:2	100,0000	0	5
Всего	100,0000	5	5

Исходя из табл. 12, составлены линейные классификационные функции (ЛКФ):

$$F_1 = -34,8143 + 20,855X_1 + 0,0005X_2 + 0,0509X_3 + 0,0651X_4 - 0,0057X_5 \quad (1)$$

$$F_2 = -130,544 + 88,125X_1 + 0,004X_2 + 0,011X_3 + 0,027X_4 - 0,032X_5. \quad (2)$$

Таблица 12. Коэффициенты линейных классификационных функций

Переменная	Коэффициенты линейных классификационных функций	
	F_1	F_2
Минимальный тяговый класс трактора	20,8550	88,125
Максимальная ширина минерализованной полосы	0,0005	0,004
Ширина борозды под посадку лесных культур	0,0509	0,011
Максимальная глубина борозды под посадку лесных культур	0,0651	0,027
Масса в рабочем положении	-0,0057	-0,032
Константа	-34,8143	-130,544

Для разработанного лесного плуга с гиперболюидными отвалами независимые переменные в нормализованных (натуральных) значениях составят:

$X_1 = 0,9$ – тяговый класс трактора;

$X_2 = 1200$ (мм) – ширина минерализованной борозды;

$X_3 = 700$ (мм) – ширина борозд под посадку лесных культур;

$X_4 = 180$ (см) – максимальная глубина обработки под посадку лесных культур;

$X_5 = 250$ (кг) – масса орудия.

После подставки переменных в ЛКФ (1) и (2) первая классификационная функция будет равна – $F_1 = 30,56$; вторая – $F_2 = -42,56$. Отнесение объекта к определённой группе выполняется по максимальному значению ЛКФ после их расчёта по набору переменных для каждой группы: $F_1 > F_2$, следовательно, предлагаемое орудие следует отнести к первому кластеру орудий.

Заключение. В результате кластерного анализа выполнено разделение выбранных орудий на два кластера. Анализ кластеров показал, что к первому кластеру отнесены орудия для выполнения обработки лесной почвы на небольших глубинах с минимально необходимой шириной борозды; во втором – громоздкие орудия для выполнения обработки почвы с любыми требуемыми параметрами по ширине и глубине борозды. При этом орудия 1-го кластера агрегируются с трак-

торами класса тяги 0,9 и 1,4; плуги 2-го кластера – с более мощными тракторами 3-го класса тяги.

Проведённый факторный анализ установил, что первая главная компонента определяет массомощностные характеристики орудий: при этом эти же характеристики являются базовыми параметрами кластеров. Вторая главная компонента определяет технологические параметры обработки. Также установлено, что наиболее информативными характеристиками орудий являются минимальный тяговый класс трактора, с которым орудие агрегируется, и ширина борозд под посадку лесных культур, которую плуг способен обеспечить.

Выполненный дискриминантный анализ подтвердил точность разбиения группы принятых к рассмотрению орудий на два кластера, а также правильность нахождения орудий в соответствующем кластере, и позволил отнести разрабатываемый плуг с гиперболюидными отвалами к первому кластеру орудий. Предлагаемое орудие имеет низкую металлоёмкость и способно эффективно выполнять основную обработку лесной почвы в виде нарезки борозд по ресурсосберегающей технологии шириной 700 мм.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Литература

1. Казаков И.В., Зинин В.Ф., Казаков В.И., Проказин Н.Е., Родин С.А., Климов О.Г. Механизация лесохозяйственных работ : учебник для вузов / под ред. В.И. Казакова. – М. : Изд-во Юрайт, 2025. 342 с.
2. Зимарин С.В., Попиков П.И., Сердюкова Н.А. Анализ способов повышения эффективности лесных дисковых почвообрабатывающих орудий на вырубках // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 2–2 (7–2). С. 219–224. DOI: 10.12737/3139.
3. Лягоскин М.А., Алиев Н.В., Дручинин Д.Ю. Особенности выполнения основной обработки почвы на вырубках // Молодой учёный. 2017. № 14 (148). С. 92–96.
4. Посметьев В.И., Зеликов В.А. Состояние и пути повышения эффективности почвообрабатывающих агрегатов при лесовосстановлении на вырубках : монография. Воронеж : ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2015. 236 с.
5. Зеликов В.А. Состояние и особенности нераскорчёванных вырубков как объектов лесовосстановления // Проблемы и мониторинг природных экосистем : Сборник статей VI Всерос. науч.-практ. конф. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2019. С. 83–85.
6. Долматов С.Н., Сухенко Н.В. Влияние параметров рабочего органа дискового рыхлителя на технологический процесс нарезки борозд при лесовосстановлении // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 6. С. 529–537. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-529-537.
7. Лысыч М.Н. Анализ конструкций дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий и возможностей их применения в условиях лесных вырубок // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 209.
8. Almaliki S. Simulation of draft force for three types of plow using response surface method under various field conditions. Iraqi Journal of Agricultural Sciences. 2018; 49 (6). pp. 1123–1124. DOI: 10.36103/ijas.v49i6.151.
9. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Никулин С.Н. Современные

- орудия для нарезки посадочных борозд и создания противопожарных полос // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9–2 (20–2). С. 55–59. DOI: 10.12737/16430.
10. Коротких В.Н., Попиков П.И., Титов П.И. Влияние принудительного вращения комбинированного рабочего органа лесного дискового плуга на энергетические и качественные показатели // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2 (41). С. 102–106.
 11. Малуков С.В., Лысыч М.Н., Бухтояров Л.Д., Поздняков Е.В., Гнусов М.А., Шавков М.В., Петков А.Ф. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 2 (50). С. 128–141.
 12. Elfving B. Effects of intensity of forest regeneration measures on stand development in a nationwide Swedish field experiment // Forestry. 2015. 88, pp. 441–453. DOI: 10.1093/forestry/cpv010
 13. Puyal M. Mechanical site preparation severity mediates one-year-survival response to summer drought in planted tree seedlings. 2024. DOI: 10.21203/RS.3.RS-3796037/V1.
 14. Löf M., Dey D., Navarro R., Jacobs D. Mechanical site preparation for forest restoration // New Forests. 2012, 43. pp. 825–848. DOI: 10.1007/s11056-012-9332-x.
 15. Sikström, U., Hjelm, K., Hanssen, K.H., Saksa, T., & Wallertz, K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in fennoscandia – A review // Silva Fennica. 2020. Vol. 54, Issue 2. DOI: 10.14214/sf.10172
 16. Uotila K., Rantala, J., Saksa T., Harstela P. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain // Silva Fennica. 2010. Vol. 44, no. 3. pp. 511–524. DOI: 10.14214/sf.146.
 17. Hawkins C. BD., Steele T.W., Letchford T. The economics of site preparation and the impacts of current forest policy: evidence from central British Columbia // Canadian Journal of Forest Research. 2006. 36 (2). pp. 482–494. DOI: 10.1139/x05-262
 18. Örländer. G., Nordboru. F. & Gemmel. P. Effects of complete deen-soil cultivation on initial forest stand development. Studia Forestalia Suecica 213. 2002. 20 p.
 19. Конопацкий Е.В., Попов Е.В. Методы анализа многофакторных процессов в науке и технике : монография. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. 164 с.
 20. Дронов С.В. Методы и задачи многомерной статистики : монография. Барнаул: Алтайский государственный университет, 2015. 275 с.
 5. Zelikov V.A. Status and features of undisturbed felling as objects of reforestation // Problems and monitoring of natural ecosystems : Collection of articles of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference. Penza : Penza State Agrarian University, 2019. pp. 83–85.
 6. Dolmatov S.N., Sukhenko N.V. Influence of the parameters of the working body of the disc ripper on the technological process of cutting furrows during reforestation // Conifers of the boreal zone. 2022. Vol. 40, No. 6. pp. 529–537. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-529-537.
 7. Lysych M.N. The analysis of designs of disk soil-cultivating working bodies and possibilities of their application in the conditions of wood cutting areas // Modern problems of science and education. 2014. No. 6. p. 209.
 8. Almaliki S. Simulation of draft force for three types of plow using response surface method under various field conditions // Iraqi Journal of Agricultural Sciences. 2018; 49 (6). pp. 1123–1124. DOI: https://doi.org/10.36103/ijas.v49i6.151.
 9. Lysych M.N., Shabanov M.L., Nikulin S.N. Modern tools for cutting of furrows and creating fire protection strips // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3, No. 9–2 (20–2). pp. 55–59. DOI: 10.12737/16430.
 10. Korotkikh V.N., Popikov P.I., Titov P.I. influence of forced rotation of the forest disk plough combined working element on power and quality indicators // Bulletin of KrasGAU. 2010. № 2 (41). pp. 102–106.
 11. Malyukov S.V., Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Pozdnyakov E.V., Gnusov M.A., Shavkov M.V., Petkov A.F. Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements // Forestry Engineering Journal. 2023. Vol. 13, No. 2 (50). pp. 128–141.
 12. Elfving B. Effects of intensity of forest regeneration measures on stand development in a nationwide Swedish field experiment // Forestry. 2015. 88 (4), pp. 441–453. DOI: 10.1093/forestry/cpv010
 13. Puyal M. Mechanical site preparation severity mediates one-year-survival response to summer drought in planted tree seedlings. 2024. DOI: 10.21203/RS.3.RS-3796037/V1.
 14. Löf M., Dey D., Navarro R., Jacobs D. Mechanical site preparation for forest restoration // New Forests. 2012, 43. pp. 825–848. DOI: 10.1007/s11056-012-9332-x.
 15. Sikström, U., Hjelm, K., Hanssen, K. H., Saksa, T., & Wallertz, K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in fennoscandia – A review // Silva Fennica. 2020. Vol. 54, Issue 2. DOI: 10.14214/sf.10172
 16. Uotila K., Rantala, J., Saksa T., Harstela P. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain // Silva Fennica. 2010. Vol. 44, no. 3. pp. 511–524. DOI: 10.14214/sf.146.
 17. Hawkins C. BD., Steele T.W., Letchford T. The economics of site preparation and the impacts of current forest policy: evidence from central British Columbia // Canadian Journal of Forest Research. 2006. 36(2). pp. 482–494. DOI: 10.1139/x05-262
 18. Örländer. G., Nordboru. F. & Gemmel. P. Effects of complete deen-soil cultivation on initial forest stand development. Studia Forestalia Suecica 213. 2002. 20 p.
 19. Konopatsky E.V., Popov E.V. Methods of analysis of multifactorial processes in science and technology : monograph. Nizhny Novgorod : Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2024. 164 p.
 20. Dronov S.V. Methods and tasks of multidimensional statistics : monograph. Barnaul : Altai State University, 2015. 275 p.

References

1. Kazakov I.V., Zinin V.F., Kazakov V.I., Prokazin N.E., Rodin S.A., Klimov O.G. Mechanization of forestry work : a textbook for universities / edited by V.I. Kazakov. M. : Yurait Publishing House, 2025. 342 p.
2. Zimarin S.V., Popikov P.I., Serdyukova N.A. Analysis of ways to increase the efficiency of forest disk tillage tools in logging // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2014. Vol. 2, No. 2–2 (7–2). pp. 219–224. DOI 10.12737/3139.
3. Lyagoskin M.A., Aliev N.V., Druchinin D.Yu. Particularities of basic soil cultivation on cutting-down. Young scientist, 2017, no. 14 (148), pp. 92–96.
4. Posmetyev V.I., Zelikov V.A. The state and ways of increasing the efficiency of tillage units during reforestation in cuttings : monograph. Voronezh : VSUFT named after G.F. Morozov, 2015. 236 p.