



ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья

УДК 630*232.216

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-107-119

Влияние конструктивных параметров рабочих органов лесного плуга на профиль формируемого линейного микроповышения поверхности

М.В. Драпалюк, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAP-5563-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>

Д.Ю. Дручинин[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [M-8473-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

М.А. Попов, преподаватель; ResearcherID: [MSY-0206-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; michael1@yandex.ru,
druchinin.denis@rambler.ru[✉], popovmaxim98@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.25 / Одобрена после рецензирования 18.04.25 / Принята к печати 21.04.25

Аннотация. Восстановление лесов в бореальных широтах является важной задачей для лесного хозяйства РФ ввиду того, что насаждения северного лесного пояса, к которым относятся таежные леса, являются глобальным климатообразующим фактором. Технология создания лесных культур на среднесуглинистых или подзолистых таежных почвах с высокой степенью увлажнения предписывает создание микроповышений для дальнейшего проведения посадочных работ. Качественная обработка почвы в таких условиях нереализуема без использования эффективных технических средств. Цель исследования – оценка влияния конструктивных и технологических параметров рабочих органов предложенного лесного плуга на профиль создаваемого линейного микроповышения. На основе физико-математической модели перемещения почвенных масс по поверхностям рабочих органов плуга с применением специального программного комплекса выполнена серия вычислительных экспериментов по определению размерных параметров поперечного профиля микроповышения. Проведен базовый компьютерный эксперимент с типичными значениями входных параметров для моделирования создания лесным плугом линейных микроповышений на площадях с подзолистыми почвами, имеющими высокую степень увлажнения. Далее оцениваемые входные данные были сгруппированы по принципу принадлежности к элементам модели и влияния на выходные характеристики: параметры лемешно-отвальных корпусов, дисковых рабочих органов, а также физико-механические свойства почвы. Выполнен анализ результатов моделирования по сравнению с базовым экспериментом при поочередном варьировании входных параметров модели в заданном диапазоне по отношению к базовым значениям. Установлены закономерности воздействия конструктивных и технологических параметров лемешно-отвальных корпусов, сферических дисков и характеристик почвенной среды на высоту линейного гребня. Выявлено, что наибольшее влияние на



достижение требуемой высоты микроповышения оказывают параметры плужных корпусов. Полученные результаты применимы для процедуры оптимизации параметров рабочих органов лесного плуга.

Ключевые слова: восстановление лесов, микроповышение, лесной плуг, бореальные леса, почва с переувлажнением, рабочий орган, профиль микроповышения

Для цитирования: Драпалюк М.В., Дручинин Д.Ю., Попов М.А. Влияние конструктивных параметров рабочих органов лесного плуга на профиль формируемого линейного микроповышения поверхности // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 107–119. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-107-119>

Original article

The Influence of the Design Parameters of Working Bodies of a Forest Plow on the Profile of the Formed Linear Microhill on the Surface

Mikhail V. Drapalyuk, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAP-5563-2020](https://orcid.org/0000-0002-8029-2706),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>

Denis Yu. Druchinin✉, Candidate of Engineering, Assos. Prof.; ResearcherID: [M-8473-2016](https://orcid.org/0000-0003-2128-2687),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Maksim A. Popov, Lecturer; ResearcherID: [MSY-0206-2025](https://orcid.org/0009-0002-6356-5028),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; michael1@yandex.ru, druchinin.denis@rambler.ru✉, popovmaxim98@mail.ru

Received on February 26, 2025 / Approved after reviewing on April 18, 2025 / Accepted on April 21, 2025

Abstract. The restoration of forests in boreal latitudes is an important task for forestry in the Russian Federation due to the fact that the plantations of the northern forest belt, which include taiga forests, are a global climate-forming factor. The technology of creating forest plantations on medium-loamy or podzolic taiga soils with a high degree of moistening prescribes the creation of microhills for further planting. High-quality tillage in such conditions is impossible without the use of effective technical means. The aim of the study has been to evaluate the influence of the design and technological parameters of the working bodies of the proposed forest plow on the profile of the created linear microhill. Based on a physico-mathematical model of the movement of soil masses along the surfaces of the plow's working bodies, a series of computational experiments have been performed using a special software package to determine the dimensional parameters of the transverse profile of a microhill. A basic computer experiment has been carried out with typical values of input parameters to stimulate the creation of linear microhills by a forest plow in areas with podzolic soils that have a high degree of moistening. Further, the evaluated input data have been grouped according to the principle of belonging to the elements of the model and the influence on the output characteristics: the parameters of the moldboard bodies, disk working bodies, as well as the physico-mechanical properties of the soil. The simulation results have been analyzed in comparison with the baseline experiment with alternating variation of the model input parameters in a given range relative to the baseline values. The patterns of influence of design and technological parameters of moldboard bodies, spherical disks and character-

istics of the soil environment on the height of the linear ridge have been established. It has been revealed the greatest influence on achieving the required microhill height is exerted by the parameters of the plow bodies. The results obtained are applicable to the procedure of optimizing the parameters of the working bodies of a forest plow.

Keywords: reforestation, microhill, forest plow, boreal forests, water-logged soil, working body, microhill profile

For citation: Drapalyuk M.V., Druchinin D.Yu., Popov M.A. The Influence of the Design Parameters of Working Bodies of a Forest Plow on the Profile of the Formed Linear Microhill on the Surface. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 107–119. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-107-119>

Введение

В настоящее время учеными все чаще фиксируются негативные тенденции изменения климата на нашей планете. Мировым сообществом принимается комплекс мер различного характера, одним из важнейших направлений среди них является охрана и развитие лесных экосистем, оказывающих влияние на глобальные климатические условия. Бореальные леса, входящие в так называемый северный лесной пояс, обладают наибольшим климатообразующим потенциалом среди лесных ресурсов мира, т. к. поглощают из атмосферы Земли до 17 % углекислого газа, повышение концентрации которого ведет к ее разогреву [3, 14].

Вследствие того, что значительные таежные территории ежегодно уничтожаются природными возгораниями и большая часть бореальных лесов охвачена хозяйственной деятельностью человека [24], существует тенденция к уменьшению площади северного лесного пояса [10, 23].

Международная группа исследователей в работе [17] отмечает тот факт, что в последнее время в лесах бореальных широт участились антропогенные нарушения, а существующие методы управления не позволяют сохранить эти леса в полном объеме. Необходим поиск новых инструментов для сохранения бореального лесного покрова.

Значительная площадь бореального лесного сообщества приходится на территорию РФ, поэтому для лесного хозяйства нашей страны недопущение деградации и своевременное восстановление лесных насаждений субарктической и умеренной климатических зон являются одними из важных направлений деятельности.

Восстановление лесных массивов на подобных площадях относится к наиболее трудоемким работам в лесном хозяйстве, т. к. почвенный фон здесь часто имеет временное или избыточное переувлажнение [1]. В результате технологические требования к лесовосстановлению на подзолистых северных почвах предписывают создание микроповышений с дальнейшей посадкой в них лесных культур [19]. Подготавливаемые линейные гряды для обеспечения аэрации почвенной среды с целью снижения ее влажности должны иметь высоту не менее 20 см и ширину от 0,5 м [2].

Исследованиям в области улучшения продуктивности бореальных лесов посвящены работы А.М. Тараканова, Е.Н. Наквасиной, М.Д. Мерзленко, А.И. Соколова, О.П. Шепелевой и др. [8, 11].

Вопросы обработки лесной почвы в бореальных широтах рассматривают В.И. Казаков, Н.Е. Проказин, А.С. Ильинцев, А.Ф. Алябьев, А.М. Цыпук, А.В. Родионов, М. Löf, U. Sikström, L. Bedford, G. Örlander [6, 9, 15, 21–23]. Ученые анализируют различные способы предпосадочной подготовки почвы и отмечают, что создание благоприятных условий для укоренения саженцев и, как следствие, повышения эффективности процедуры лесовосстановления в целом невозможны без механической подготовки почвы перед посадкой на восстанавливаемом участке [16, 18]. Приживаемость и последующее развитие саженцев улучшаются за счет удаления верхнего слоя органической почвы и обнажения нижних почвенных слоев с образованием линейных или дискретных микроповышений из смеси органических веществ и минеральной почвы [23].

М.Д. Мерзленко [11] подчеркивает важность обеспечения высокого уровня агротехнического фона на этапе закладки лесных культур с унификацией параметров посадочного материала применительно к лесорастительным условиям восстанавливаемых площадей.

А.С. Ильинцев с соавт. [7] указывают на то, что в условиях Европейского Севера России наблюдается переизбыток атмосферной и почвенной влаги и при неверном выборе технологии обработки почвы может происходить вымывание семян.

Возможность получения в долгосрочной перспективе продуктивных лесных насаждений за счет механического предпосадочного воздействия на почву доказана по результатам исследований К. Johansson с соавт. [20].

Повышение производительности и качества, а также снижение себестоимости почвообработки в тяжелых лесных условиях нереализуемы без использования эффективных технических средств.

Микроповышения, создаваемых серийными лесными плугами ПЛМ-1,3, ПДВ-1,5 или ПШ-1, часто не соответствуют технологическому регламенту подготовки почвы по размерным характеристикам или плотности, что требует поиска новых технических и компоновочно-технологических решений в вопросе подготовки почвы на переувлажненных лесных участках.

Цель данной работы – оценка влияния конструктивных и технологических параметров рабочих органов предлагаемого лесного плуга на профиль создаваемого линейного микроповышения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является конструкция лесного плуга для образования линейных микроповышений. Особенность разработанного орудия заключается в наличии 2 свальных рабочих секций, в каждой из которых в качестве рабочих органов объединены лемешно-отвалный корпус и сферический диск. Их совместная работа позволяет обеспечивать равномерную укладку почвенных пластов в центр необработанной полосы, где формируется гребень [4]. Плужные корпуса при этом подрезают пласт и оборачивают его, после чего почвенные массы сходят на сферические диски, которые, работая по принципу бермоочистителя, дооборачивают пласты и сдвигают их для укладки в микроповышение (рис. 1). Назначение расположенного в задней части плуга катка – уплотнение и окончательное формирование профиля микроповышения.

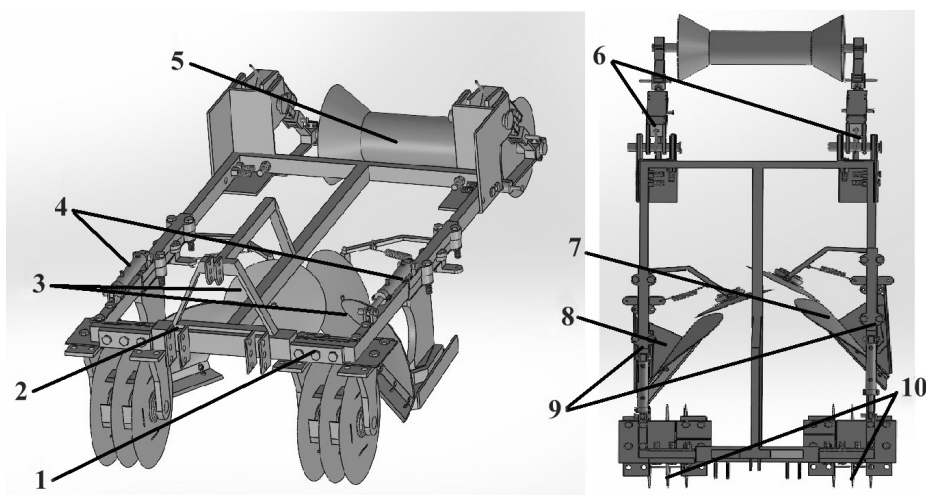


Рис. 1. Общий вид лесного плуга для образования микроповышений: 1 – рама; 2 – навеска; 3 – сферические диски; 4 – гидроцилиндры; 5 – уплотняющий каток; 6 – пружины; 7, 8 – левооборачивающий и правооборачивающий лемешные корпуса соответственно; 9 – подвижные брусья; 10 – ножевые батареи

Fig. 1. A general view of a forest plow for the formation of microhills: 1 – frame; 2 – hitch; 3 – spherical discs; 4 – hydraulic cylinders; 5 – sealing roller; 6 – springs; 7, 8 – left-turning and right-turning mouldboard bodies, respectively; 9 – movable bars; 10 – knife batteries

Ранее авторами для моделирования влияния параметров конструкции лемешно-отвалных корпусов и сферических дисков на процесс формирования микроповышения лесным плугом была разработана физико-математическая модель перемещения почвы по поверхностям рабочих органов [5].

Для реализации модели и проведения компьютерных исследований создан программный продукт, позволяющий варьировать входные независимые переменные, к которым относятся параметры рабочих органов лесного плуга, почвы и общие параметры агрегата [13]. В число основных выходных параметров моделирования входят высота микроповышения h , отсчитываемая от уровня поверхности почвы, и расстояние между вершинами холмиков укладываемых пластов L_m . При этом поперечный профиль гребня строится без учета глубины хода корпуса плуга.

Основным результатом вычислительных экспериментов является зависимость размерных параметров формируемого микроповышения в виде графика его поперечного профиля от соотношения заданных конструктивных и технологических параметров лесного плуга и свойств почвы.

Теоретическое исследование влияния параметров рабочих органов лесного плуга на профиль создаваемого микроповышения основано на методе так называемого базового эксперимента с поочередным изменением входных параметров модели F_i для оценки их влияния на выходные характеристики и построения закономерностей вида $h(F_i)$.

Первоначально реализованный базовый эксперимент включал наиболее типичные значения выбранных параметров. При этом входные модельные параметры обрабатываемой среды определялись с учетом факта эксплуатации орудия для создания линейных микроповышений на площадях с переувлажненными подзолистыми почвами (см. таблицу).

Параметры базового вычислительного эксперимента
The parameters of the basic computational experiment

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Глубина хода лемешного корпуса	—	250	Миллиметр
Угол между отвалом и стенкой борозды	θ	15	Градус
Ширина захвата корпуса	b	350	Миллиметр
Угол наклона лемеха ко дну борозды	—	20	Градус
Масса рабочей секции	—	150	Килограмм
Диаметр сферического диска	D	610	Миллиметр
Угол атаки сферического диска	α_d	45	Градус
Угол вертикального наклона диска	β_d	0	
Центральный угол дуги окружности сферического диска	φ_d	25	
Угол заострения кромки диска	i	15	
Задний угол резания	—	5	
Влажность почвы	—	54	Процент
Плотность почвы	—	0,98	Грамм на 1 см ³
Коэффициент трения	—	0,6	—
Липкость почвы	—	0,05	—
Расстояние между рабочими секциями	ΔS	1,4	Метр
Скорость агрегата	—	5	Километров в час
КПД трактора	—	0,98	—

Составление программы исследования было реализовано по принципу группирования значимых параметров модели, варьируемых в процессе реализации вычислительных экспериментов, с основными элементами конструкции лесного плуга:

параметры лемешных корпусов лесного плуга (угол между отвалом и стенкой борозды и ширина захвата корпуса);

параметры компоновки орудия (расстояние между рабочими секциями).

параметры сферических дисков (диаметр, угол атаки, угол вертикального наклона диска, центральный угол дуги окружности).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты базового вычислительного эксперимента по построению поперечного профиля микроповышения без учета глубины хода корпуса плуга приведены на рис. 2.

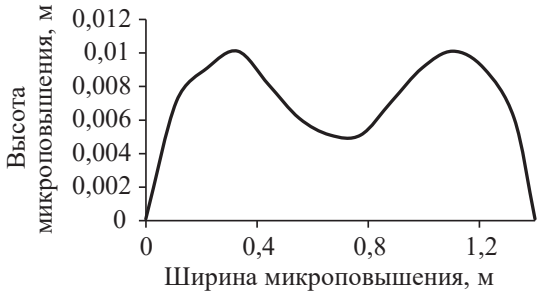


Рис. 2. Зависимость между высотой и шириной микроповышения для входных параметров базового компьютерного эксперимента

Fig. 2. The relationship between the height and width of the microhill for the input parameters of the basic computer experiment

Полученные результаты подтвердили планируемый функционал составленной физико-математической модели работы лесного плуга. Реализация ба-

зового вычислительного эксперимента показала, что формирование цельной поверхности микроповышения уплотняющим катком для поперечного расстояния между рабочими секциями $\Delta S = 1,4$ м усложняется вследствие укладки почвенных масс в 2 отдельных почвенных холмика с вершинами на расстоянии $L_m = 0,75$ м. Максимальная высота 2 гребней, образующихся после схода пластов со сферических дисков, равняется 10 см. Ширина микроповышения составляет примерно 1,4 м, т. е. фактически соответствует поперечному расстоянию ΔS между рабочими секциями.

Далее оценивали изменения результатов моделирования по сравнению с базовым экспериментом при варьировании входных модельных параметров в диапазоне вблизи базовых значений.

Каждый выбранный параметр изменялся по 5 уровням в пределах интервала $[F_{i\min}, F_{i\max}]$ с шагом ΔF_i , при этом другие базовые характеристики рабочего процесса оставались прежними.

Первоначально было изучено влияние параметров лемешного корпуса как основного рабочего органа лесного плуга на процесс образования микроповышения. Оказывая механическое воздействие на почву, он подрезает ее пласт, оборачивает его и направляет на сферические диски.

Для выявления связи угла между отвалом и стенкой борозды и высотой образуемого гребня проведена серия вычислительных экспериментов. Обнаружено, что вследствие увеличения площади рабочей поверхности корпусов за счет изменения угла в диапазоне $30...45^\circ$ с шагом 5° возрастает объем задействованной для образования гребня почвы (рис. 3, а). При постоянном значении ΔS 1,4 м это приводит к увеличению высоты образуемого микроповышения от 8 до 11 см (по вершинам гребней) и от 5 до 7 см (по центральной части микроповышения).

Серия экспериментов для установления зависимости ширины захвата корпуса и высоты микроповышения при постоянном расстоянии между рабочими секциями (1,4 м) подразумевала варьирование b в диапазоне 300...450 мм с шагом 50 мм (рис. 3, б). Расчетная высота h изменялась от 8 до 12 см (по вершинам микроповышения) и в пределах от 5 до 7 см (по центральной части гребня), что позволило сделать вывод о прямопропорциональности зависимости изменения высоты микроповышения от величины захвата корпуса.

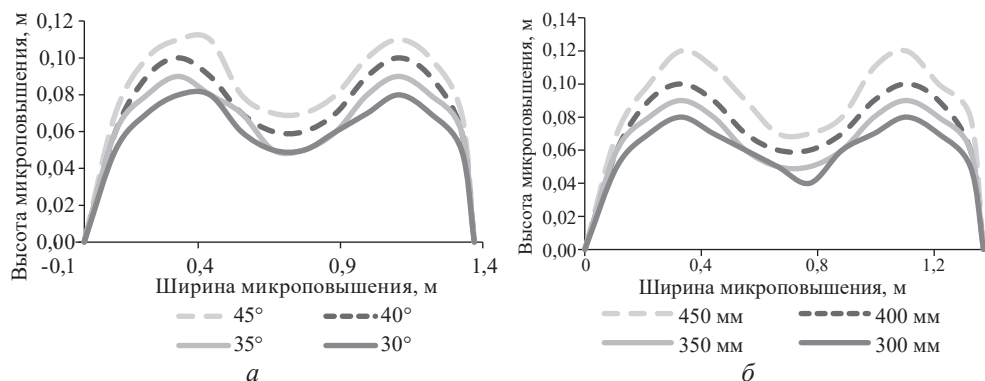


Рис. 3. Зависимость высоты микроповышения от величины угла θ (а) и от ширины захвата корпуса (б)

Fig. 3. The dependence of the microhill height on the value of the angle θ (а) and on the grip width of the body (б)

Для нахождения оптимального расстояния между рабочими секциями в расчетах этот параметр варьировался в пределах от 1 до 1,8 м. При анализе установленных закономерностей влияния расстояния ΔS на высоту h выявлена обратная зависимость между данными параметрами. Максимальная высота микроповышения, равная 23 см, достигается при расстоянии $\Delta S = 1$ м (рис. 4, а). При этом образуется однородный гребень без отдельных холмиков от сходящих с дисков пластов.

Резкое уменьшение высоты профиля микроповышения (до 12 см) с наличием 2 гребней с впадиной по его центру наблюдается при дальнейшем увеличении ΔS до 1,26 м (рис. 4, б). Увеличение параметра ΔS до максимальных значений из интервала варьирования приводит к плавному уменьшению высоты микроповышения h по вершинам гребней от 10 см (при $\Delta S = 1,4$ м) до 7 см (при $\Delta S = 1,8$ м) и образованию четких контуров двух гребней (рис. 4, в).

По итогам серии экспериментов установлено, что при увеличении ширины микроповышения расстояние между укладываемыми пластами становится больше, а значит, цельный профиль гряды не образуется.

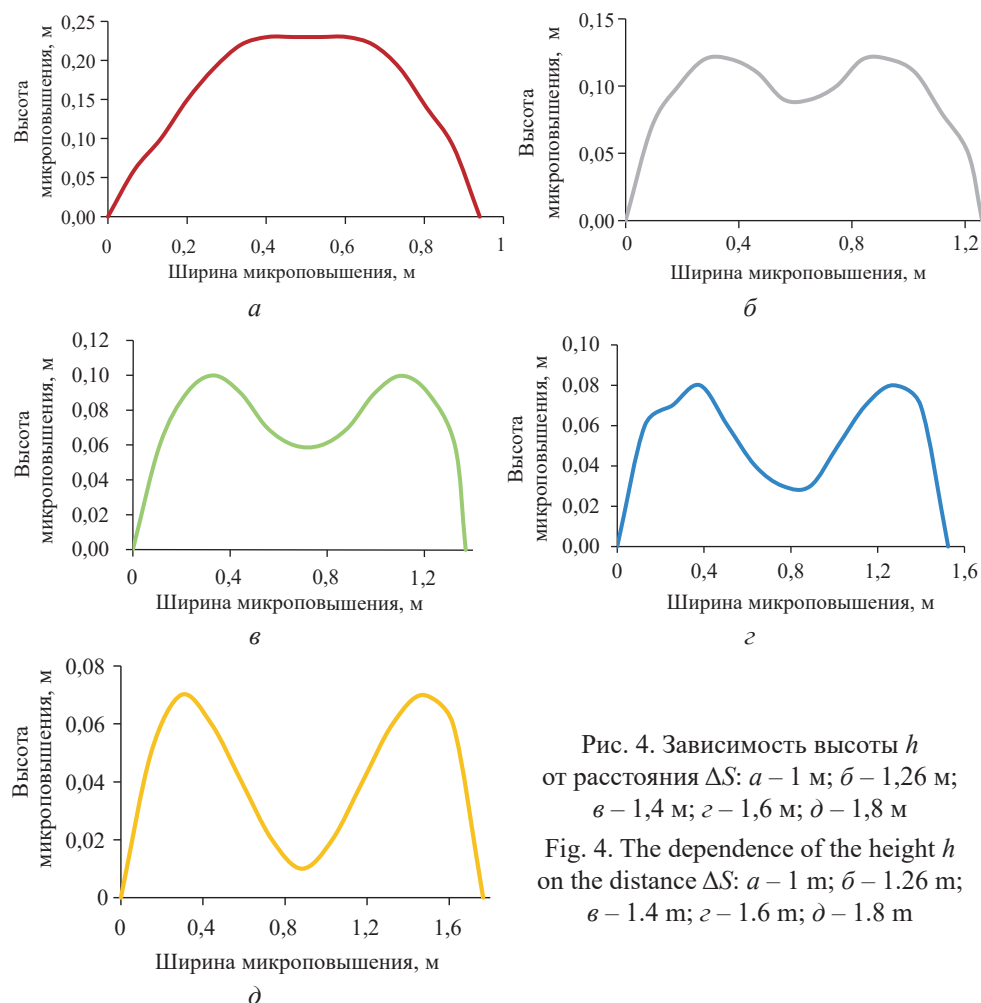


Рис. 4. Зависимость высоты h от расстояния ΔS : а – 1 м; б – 1,26 м; в – 1,4 м; г – 1,6 м; д – 1,8 м

Fig. 4. The dependence of the height h on the distance ΔS : а – 1 м; б – 1.26 м; в – 1.4 м; г – 1.6 м; д – 1.8 м

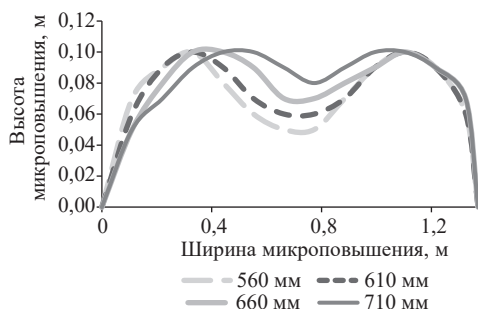
Характер влияния параметров сферического диска на процесс функционирования почвообрабатывающих орудий исследован П.С. Нартовым [12].

Однако для оценки степени этого влияния требуются дополнительные научные изыскания вследствие того, что сферический диск в составе рабочей секции орудия непосредственно не подрезает почвенный пласт, а, располагаясь после лемешного корпуса, лишь направляет его к центру создаваемого микроповышения.

Для выявления закономерностей между диаметром сферического диска, функционирующего совместно с лемешным корпусом, и высотой образуемого гребня проведена серия вычислительных экспериментов. Задаваемые в качестве модельных параметров диаметры дисков – стандартные. Диапазон варьирования – 560...710 мм с шагом 50 мм (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость высоты микроповышения от диаметра сферического диска

Fig. 5. The dependence of the microhill height on the diameter of the spherical disk



При увеличении радиуса сферического диска установлено явное возрастание поперечного сдвига почвы, т. к. после схода с отвала корпуса почвенные массы перемещаются к оси диска, а уже потом в направлении центра микроповышения. Это подтверждают полученные результаты: при неизменной ширине $\Delta S = 1,4$ м высота образуемого микроповышения в пределах вершин не изменяется и для всех выбранных значений D составляет 10 см, при этом h в центральной части гребня варьирует в пределах от 5 до 8 см.

Угол атаки и угол наклона в вертикальной плоскости – основные технологические параметры сферических дисков, непосредственно влияющие на результат рабочего процесса. Серия компьютерных расчетов поперечного профиля гряды позволила установить взаимосвязь между углами расположения диска α_d и β_d и высотой микроповышения. В экспериментах α_d варьировался от 45° до 60° с шагом 5° . Угол β_d изменялся от -15° до 15° : отрицательным угол β_d считается, когда диск наклонен к стойке, а положительным – когда диск завален в противоположную сторону.

Результаты экспериментов показывают минимальные различия в высоте h по вершинам образуемой гряды ($h = 10$ см) с увеличением угла атаки α_d при неизменных объеме перемещаемой почвы и ширине ΔS . Варьирование высоты в пределах от 5 до 7 см наблюдается лишь по центру микроповышения, что свидетельствует о формировании его более однородного профиля (рис. 6, а).

Представленные на рис. 6, б зависимости высоты микроповышения от различных углов наклона β_d показывают отсутствие изменений h на всем заданном диапазоне варьирования угла β_d : высота находится в пределах 10 см. Высота h , замеряемая по центру гребня, изменяется в пределах 4...8 см. Установлено, что размещение дисковых рабочих органов под положительными углами β_d позволяет добиться большего поперечного смещения почвы и сформировать цельный профиль микроповышения.

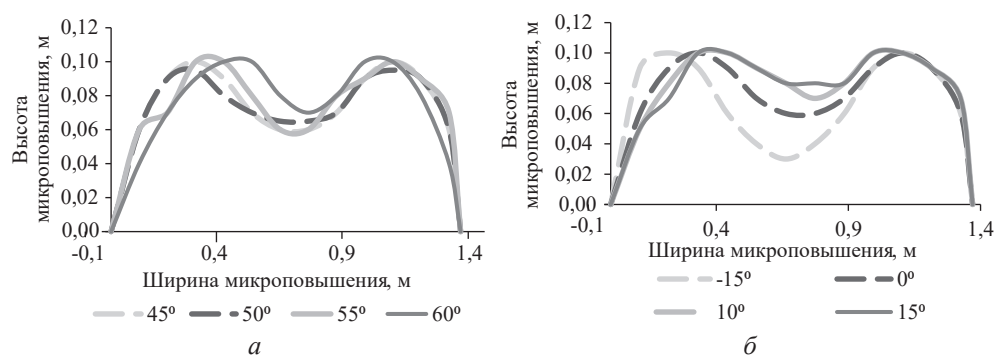


Рис. 6. Зависимость высоты микроповышения от угла атаки (а) и угла наклона (б) диска

Fig. 6. The dependence of the microhill height on the angle of attack (а) and the angle of inclination (б) of the disk

Угол φ_d образуется в результате сечения диска экваториальной плоскостью. Лесной плуг при создании микроповышения воздействует на почву по принципу отвальной обработки, с учетом чего угол схода пласта почвы с поверхности диска с его последующей укладкой на необработанную поверхность (т. е. сумма углов α_d и φ_d) не должен превышать $55...60^\circ$ [12]. В экспериментах с моделью угол φ_d варьировался от 25° до 40° . Анализ полученных зависимостей угла φ_d от высоты микроповышения показал, что при увеличении угла φ_d не происходит существенного изменения высоты h , которая находится в пределах 10 см (рис. 7).

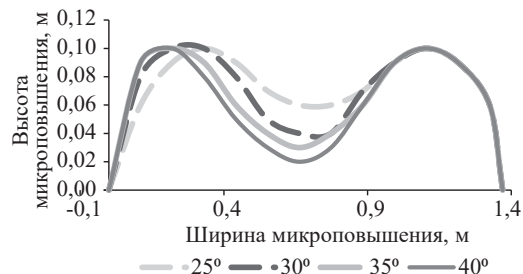


Рис. 7. Зависимость высоты микроповышения от величины центрального угла дуги окружности диска φ_d

Fig. 7. The dependence of the height of the microhill on the magnitude of the central angle of the arc of the disk φ_d

Выводы

1. Проведенные теоретические исследования в виде вычислительных экспериментов по расчету размеров поперечного профиля микроповышения показали, что на высоту образуемого гребня значительное влияние оказывают параметры корпуса, а именно угол между отвалом и стенкой борозды и ширина захвата лемешно-отвального корпуса. При этом установлена преобладающая степень влияния ширины захвата на высоту гребня вследствие непосредственного воздействия данного параметра на объем подрезаемой и оборачиваемой почвы, задействуемой впоследствии для образования микроповышения.

2. Расстояние между рабочими секциями лесного плуга, формируя ширину создаваемого микроповышения, непосредственно влияет и на высоту гребня: с уменьшением данного параметра происходит увеличение его высоты. При распределении подрезаемого и оборачиваемого рабочими органами объема почвы на меньшую ширину (около 1 м) наблюдается образование единого гребня. Увеличение ширины гребня ухудшает условия работы уплотняющего катка при

создании качественного микроповышения в виде цельного уплотненного массива почвы.

3. Выявленные закономерности показывают отсутствие существенного влияния параметров дисковых рабочих органов на высоту линейного гребня. В то же время установлено, что от параметров дисков в значительной мере зависит расстояние между вершинами холмиков 2 почвенных пластов, формирующих профиль микроповышения: при использовании дисков большего диаметра пласты укладываются ближе друг к другу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляев В.В. Восстановление лесов Европейского Севера России: Эколого-лесохозяйственные аспекты. Архангельск: Помор. ун-т, 2011. 325 с.

Belyaev V.V. *Restoration of Forests in the European North of Russia: Ecological and Forestry Aspects*. Arkhangelsk, Pomor State University, 2011. 325 p. (In Russ.).

2. Винокуров В.Н., Силаев Г.В. Лесохозяйственные машины и их применение: тексты лекций. М.: МГУЛ, 1999. 234 с.

Vinokurov V.N., Silaev G.V. *Forestry Machines and Their Applications: Lecture Texts*. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 1999. 234 p. (In Russ.).

3. Готье С., Бернье П., Куулувайнен Т., Швиденко А., Щенащенко Д. Бореальные леса и глобальные изменения // Уст. лесопользование. 2016. № 2(46). С. 2–7.

Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A., Shchepashchenko D. Boreal Forests and Global Change. *Ustojchivoe lesopol'zovanie* = Sustainable Forest Management, 2016, no. 2(46), pp. 2–7. (In Russ.).

4. Дручинин Д.Ю., Попов М.А. К вопросу создания микроповышений при проведении лесовосстановления в условиях временно переувлажняемых почв // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГУ, 2021. С. 48–53.

Druchinin D.Yu., Popov M.A. On the Issue of Creating Microhills during Reforestation in Conditions of Temporarily Waterlogged Soils. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa*: Proceedings of the XIX International Scientific and Technical Conference. Vologda, Vologda State University Publ., 2021, pp. 48–53. (In Russ.).

5. Дручинин Д.Ю., Камалова Н.С., Попов М.А. Формализованная модель перемещения почвы по поверхностям рабочих органов лесного плуга для образования микроповышений // Изв. СПбГЛТА. 2023. № 245. С. 200–214.

Druchinin D.Yu., Kamalova N.S., Popov M.A. A Formalized Model of Soil Movement on the Surfaces of the Working Bodies of a Forest Plow for the Formation of Microhill. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, no. 245, pp. 200–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.245.200-214>

6. Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Богданов А.П., Парамонов А.А. Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 2. С. 5–16.

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P., Paramonov A.A. Forest Crops at Spot Mounds after Excavator Soil Cultivation. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-2-5-16>

7. Ильинцев А.С., Романов Е.М., Воронин В.В., Богданов А.П. Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 52–64.

Ilintsev A.S., Romanov E.M., Voronin V.V., Bogdanov A.P. Modern Practice of Artificial Reforestation in the Taiga Zone of the European Part of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 52–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-52-64>

8. Ильинцев А.С., Романов Е.М., Наквасина Е.Н., Богданов А.П. Влияние параметров агротехнических мероприятий при лесовосстановлении на свойства почвы в условиях Европейского Севера России // Инженеры России и Беларуси: сила в сотрудничестве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2024. С. 91–94.

Ilintsev A.S., Romanov E.M., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P. The Influence of Agrotechnical Measures Parameters during Forest Restoration on Soil Properties in the Conditions of the European North of Russia. *Inzheneriy Rossii i Belarusi: sila v sotrudnichestve*: Materials of the International Scientific and Practical Conference. Arkhangel'sk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Publ., 2024, pp. 91–94. (In Russ.).

9. Казаков В.И., Проказин Н.Е., Лобанова Е.Н. Особенности создания и роста культур ели на вырубках с влажными и временно переувлажненными почвами // Лесотехн. журн. 2013. № 1(9). С. 32–42.

Kazakov V.I., Prokazin N.E., Lobanova E.N. Features of the Creation and Growth of Spruce Crops in Clearings with Moist and Temporarily Waterlogged Soils. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2013, no. 1(9), pp. 32–42. (In Russ.).

10. Луганский Н.А., Азаренок В.А., Залесов С.В., Луганский В.Н., Исаева Р.П., Терехов Г.Г., Фрейберг И.А. Основные технические направления совершенствования лесовосстановления и лесообразования // Леса России и хозяйство в них. 2008. № 2(30). С. 1–18.

Lougansky N.A., Azarenok V.A., Zalesov S.V., Lougansky V.N., Isaeva R.P., Terekhov G.G., Freiberg I.A. The Main Technical Trends to Improve Reforestation and Forest Formation. *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih* = Forests of Russia and the Economy in Them, 2008, no. 2(30), pp. 1–18. (In Russ.).

11. Мерзленко М.Д. Актуальные аспекты искусственного лесовосстановления // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 22–30.

Merzlenko M.D. Relevant Aspects of Artificial Reforestation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 3, pp. 22–30. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.22>

12. Нартов П.С. Дисковые почвообрабатывающие орудия. Воронеж: ВГУ, 1972. 184 с.

Nartov P.S. *Disk Tillage Implements*. Voronezh, Voronezh State University Publ., 1972. 184 p. (In Russ.).

13. Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023680553 РФ. Программный комплекс для моделирования профиля микроповышения, образуемого на вырубках с временным переувлажнением почвы при работе лесного плуга: № 2023680048: заявл. 03.10.2023: опубли. 03.10.2023 / Д.Ю. Дручинин, Н.С. Камалова, М.А. Попов.

Druchinin D.Yu., Kamalova N.S., Popov M.A. *A Software Package for Modeling the Profile of Microhill Formed in Cuttings with Temporary Waterlogging of the Soil during the Operation of a Forest Plow*. Certificate RF of State Registration of a Computer Program, no. 2023680553, 2023.

14. Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Югов А.Н. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата // Лесхоз. информ. 2020. № 1. С. 92–114.

Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Zolina T.A., Yugov A.N. The Boreal Forest of Russia: Opportunities for the Effects of Climate Change Mitigation. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2020, no. 1, pp. 92–114. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10>

15. Цыпук А.М., Родионов А.В., Пекки Л.П. Перспективные машины для дискретной подготовки почвы под лесные культуры // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2020. № 56. С. 90–93.

Tsybouk A.M., Rodionov A.V., Pekki L.P. Perspective Machines for Discrete Soil Preparation for Artificial Reforestation. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2020, no. 56, pp. 90–93. (In Russ.).

16. Bedford L., Sutton R.F. Site Preparation for Establishing Lodgepole Pine in the Sub-Boreal Spruce Zone of Interior British Columbia: the Bednesti Trial, 10-Year Results. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 126, iss. 2, pp. 227–238.

[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00090-0)

17. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G., Sodhi N.S. Urgent Preservation of Boreal Carbon Stocks and Biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, vol. 24, iss. 10, pp. 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.019>

18. Chantal de M., Leinonen K., Ilvesniemi H., Westman C.J. Combined Effects of Site Preparation, Soil Properties, and Sowing Date on the Establishment of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* from Seeds. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, no. 5, pp. 931–945. <https://doi.org/10.1139/x03-011>

19. Hallsby G., Örlander G. A Comparison of Mounding and Inverting to Establish Norway Spruce on Podzolic Soils in Sweden. *Forestry*, 2004, vol. 77, iss. 2, pp. 107–117. <https://doi.org/10.1093/forestry/77.2.107>

20. Johansson K., Nilsson U., Örlander G. A Comparison of Long-Term Effects of Scarification Methods on the Establishment of Norway Spruce. *Forestry*, 2013, vol. 86, iss. 1, pp. 91–98. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps062>

21. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical Site Preparation for Forest Restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>

22. Örlander G., Nordborg F., Gemmel P. Effects of Complete Deep-Soil Cultivation on Initial Forest Stand Development. *Studia Forestalia Suecica*, 2002, no. 213. 20 p.

23. Sikström U., Hjelm K., Holt Hanssen K., 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, no. 2, art. no. 10172. <https://doi.org/10.14214/sf.10172>

24. Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S.A., Ge X., Onuchin A., Li Q., Burenina T., Pliintsev A., Hou Y. Forest Harvesting and Hydrology in Boreal Forests: Under an Increased and Cumulative Disturbance Context. *Forest Ecology and Management*, 2022, vol. 522, art. no. 120468. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120468>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest