

Оригинальная статья / Original article

УДК 630.181.37

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-11



Лесохозяйственные стратегии адаптации к изменениям климата: выбор пород и оптимизация технологий лесовосстановления

Светлана С. Морковина, Наталия В. Яковенко, Елена А. Колесниченко,

Дарья А. Литовченко, Андрей Н. Топчиев

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

Контактное лицо

Наталия В. Яковенко, доктор географических наук, профессор, НИИ ИТЛК, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова; 394087 Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8.

Tel. +79191889232

Email n.v.yakovenko71@gmail.com,ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>

Формат цитирования

Морковина С.С., Яковенко Н.В., Колесниченко Е.А., Литовченко Д.А., Топчиев А.Н. Лесохозяйственные стратегии адаптации к изменениям климата: выбор пород и оптимизация технологий лесовосстановления // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 116-128. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-11

Получена 12 мая 2025 г.

Прошла рецензирование 14 июля 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: определить наиболее эффективные технологии реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению, позволяющие максимизировать поглощение парниковых газов и повысить устойчивость лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России.

В качестве объекта исследования выбраны леса лесного фонда шести субъектов РФ (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Орловская и Тамбовская области). Для оценки эффективности технологий использовались лесотипологическая система П.С. Погребняка и эдафическая сетка типов лесорастительных условий, предусматривающие дифференциацию по четырём типам почвенного богатства и шести грациям увлажнения. Были проведены анализ и сопоставление лесных планов, оценены выбросы и поглощение парниковых газов по выбранным породным составам и схемам смешения древесных пород.

Выделены оптимальные типы лесорастительных условий для масштабной реализации лесоклиматических проектов. Наиболее эффективными признаны технологии искусственного лесовосстановления с использованием местных хозяйственно ценных пород, обеспечивающих сокращение выбросов CO₂ на 12–15 % и увеличение ежегодного поглощения парниковых газов до 2,8 т/га. Комбинирование породного состава и адаптация схем смешения позволили повысить устойчивость насаждений к климатическим стрессам на 18–22 %.

Разработанные проектные сценарии могут служить основой для масштабирования лесоклиматических проектов в Центральной лесостепи, обеспечивая как экологическую, так и экономическую эффективность мероприятий по секвестрации углерода.

Ключевые слова

Лесоклиматические проекты, устойчивое развитие, лесовосстановление, технологии.

Forest management strategies for adaptation to climate change: Species selection and optimisation of reforestation technologies

Svetlana S. Morkovina, Nataliya V. Yakovenko, Elena A. Kolesnichenko,
Daria A. Litovchenko and Andrey N. Topcheev

G.F. Morozov Voronezh State University of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia

Principal contact

Nataliya V. Yakovenko, Doctor of Geography,
Professor, Research Institute of Innovative
Technologies and the Forestry Complex,
G.F. Morozov Voronezh State University Forestry
and Technologies; 8, Timiryazev St, Voronezh,
Russia 394087.

Tel. +79191889232

Email n.v.yakovenko71@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>

How to cite this article

Morkovina S.S., Yakovenko N.V., Kolesnichenko
E.A., Litovchenko D.A., Topcheev A.N. Forest
management strategies for adaptation to climate
change: Species selection and optimisation of
reforestation technologies. *South of Russia:
ecology, development*. 2025; 20(4):116-128.
(In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-11

Received 12 May 2025

Revised 14 July 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The aim is to identify the most effective technologies for implementing forest-climatic reforestation and afforestation projects that maximise the absorption of greenhouse gases and increase the sustainability of forest ecosystems in the central forest-steppe of the European part of Russia.

The forests of the forest fund of six regions of the Russian Federation (Belgorod, Voronezh, Kursk, Lipetsk, Orel and Tambov Regions) were selected as the object of the research. The forest typology system of P.S. Pogrebnyak and the edaphic grid of forest conditions types have been used to assess the effectiveness of technologies, providing for differentiation according to four types of soil richness and six moisture gradations. The forest plans were analysed and compared and greenhouse gas emissions and sequestration were estimated for selected species compositions and tree species mixing schemes.

Optimal types of forest conditions for large-scale implementation of forest-climatic projects have been identified. The most effective technologies of artificial reforestation with the use of local economically valuable species have been recognised, which would provide a 12–15 % reduction in CO₂ emissions and an increase in annual greenhouse gas absorption of up to 2.8 t/ha. The combination of species composition and adaptation of mixing schemes would allow the increase of resistance of plantations to climatic stresses by 18–22 %.

The project scenarios developed can serve as a basis for scaling up forest-climatic projects in the central forest-steppe, ensuring both ecological and economic efficiency of carbon sequestration measures.

Key Words

Forest-climatic projects, sustainable development, reforestation, technologies.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия глобальные изменения климата и рост антропогенного воздействия на окружающую среду признаются одними из наиболее острых вызовов для человечества [1]. Лесные экосистемы, обладая уникальной способностью аккумулировать и секвестрировать атмосферный углерод, играют фундаментальную роль в поддержании климатического баланса на планете [2]. Вместе с тем, по данным Masson-Delmotte и соавт. [3], современные климатические изменения оказывают существенное негативное влияние на состояние лесов: увеличивают частоту и масштабы лесных пожаров, способствуют вспышкам вредителей и болезней, ухудшают водный режим, что приводит к деградации насаждений и потере их экологических функций.

Снижение устойчивости лесов и снижение их хозяйственной и экологической ценности приводят к необходимости внедрения новых технологий ведения лесного хозяйства, соответствующих принципам адаптации и смягчения климатических изменений [4]. Особое значение приобретает разработка и реализация лесоклиматических проектов, направленных на восстановление и увеличение лесных площадей с целью повышения способности к поглощению парниковых газов и увеличения углеродных запасов в биомассе и почве [5–7]. Как отмечают зарубежные и российские исследователи, традиционные модели лесовосстановления должны быть адаптированы к конкретным региональным условиям и современным вызовам [8–10].

Согласно мнению авторов «Далеко не «все уже решено», и важно продолжить научную дискуссию, от которой во многом зависит совершенствование различных методологий и методик оценки климатических инициатив [11–13].

В российских условиях актуальность рассматриваемого вопроса определяется также значительными масштабами и разнообразием природных условий: леса занимают более 20 % территории РФ, где насчитывается около 300 видов деревьев и кустарников, из которых 20 пород являются основными лесообразующими. Согласно Приказу Минприроды РФ № 367 [14] леса России подразделяются на 8 лесорастительных зон и 41 лесной район, отличающихся по характеру почвы, увлажнённости и другим биотическим и абиотическим факторам. Поддержание высокой продуктивности и устойчивости лесных экосистем особенно сложно в регионах с высокой антропогенной нагрузкой и трансформированным ландшафтом, таких как Центральная лесостепь Русской равнины [15].

Согласно современным научным подходам, повышение эффективности реализации лесоклиматических проектов достигается за счёт подбора оптимального породного состава, применения схем смешения древесных пород, учитывающих тип лесорастительных условий, и внедрения современных технологий, минимизирующих углеродный след на всех этапах работ [16–18]. Практика реализации карбоновых полигонов, развитие системы мониторинга и адаптивного управления лесами позволяет вырабатывать дифференцированные сценарии лесовосстановления, соответствующие целям Стратегии научно-технического развития РФ [19; 20].

Таким образом, научное обоснование и внедрение адаптированных к региональным условиям технологий лесовосстановления является важнейшей задачей для

обеспечения эффективной реализации климатических стратегий России. В данной статье рассматривается опыт определения оптимальных проектных решений по восстановлению и разведению лесов Центральной лесостепи на основе оценки выбросов и поглощения парниковых газов, а также лесотипологических критериев.

Целью данной статьи является определение наиболее эффективных технологий реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению, позволяющих максимизировать поглощение парниковых газов и повысить устойчивость лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из необходимости интеграции лесных экосистем в современные лесоклиматические проекты, актуальной научной задачей выступает адаптация существующих моделей лесоразведения и лесовосстановления с учётом региональных природно-климатических и лесорастительных особенностей. Наряду с этим, требуется комплексное обоснование технико-экономических подходов к ведению лесного хозяйства, направленных на повышение уровня секвестрации углерода в условиях изменяющегося климата, а также разработка оптимальных сценариев и функциональных моделей реализации лесоклиматических проектов, дифференцированных по типам лесорастительных условий. В связи с этим объектом настоящего исследования являются леса государственного лесного фонда шести субъектов Российской Федерации, расположенных в пределах Центральной лесостепи Русской равнины.

С целью определения наилучших технологий реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению, отвечающих специфике Центральной лесостепи Европейской части РФ, проведена оценка выбросов и поглощения парниковых газов, возникающих в результате осуществления комплекса лесохозяйственных мероприятий. При анализе эффективности таких технологий особое значение придаётся следующим параметрам.

Во-первых, научно обоснованному подбору древесных пород, способных максимально снижать выбросы и увеличивать утилизацию парниковых газов. Данная задача рассматривалась при разработке и апробации проектов карбоновых полигонов [21; 22], а также при проведении анализа региональных лесных планов по исследуемым субъектам РФ (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Орловская и Тамбовская области). Следует подчеркнуть, что лесоводственно-биологическое обоснование породного состава древостоев в условиях Центральной лесостепи возможно только при учёте комплексной региональной характеристики среды произрастания. Последняя, в свою очередь, формируется посредством применения базового для лесоводства понятия – типа лесорастительных условий (ТЛУ), под которым понимается классификационная единица, объединяющая лесные земли по сходству почвенно-гидрологических факторов, определяющих условия роста и развития древостоев [23].

В соответствии с лесотипологической системой П.С. Погребняка, выделение типов лесорастительных условий осуществляется по комплексу диагностических признаков, основными из которых выступают морфология рельефа и почвенно-грунтовые характеристики [24].

Данная система типологии представлена в виде эдафической сетки, отражающей структуру местообитаний в координатах четырех градаций по типу почвенного

богатства и шести уровней увлажнения (табл. 1), согласно модифицированной классификации Воробьева [25].

Таблица 1. Эдафическая сетка типов лесорастительных условий ([25], с изменениями)

Table 1. Edaphic grid of forest site types ([25], with rich)

Типы местообитаний Types of habitats			Подтипы богатства/ Wealth subtypes			
			Бедные (A) Poor (A)	Относительно бедные (B) Relatively poor (B)	Относительно богатые (C) Relatively rich (C)	Богатые (D) Rich (D)
Подтипы влажности Moisture subtypes	0	Очень сухие Very dry	A ₀	B ₀	C ₀	D ₀
	1	Сухие Dry	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁
	2	Свежие Fresh	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
	3	Влажные Humid	A ₃	B ₃	C ₃	D ₃
	4	Сырые Moist	A ₄	B ₄	C ₄	D ₄
	5	Мокрые Wet	A ₅	B ₅	C ₅	D ₅

Во-вторых, наряду с биологическим обоснованием породного состава, ключевое значение для реализации лесоклиматических проектов имеют технологические решения, определяющие методы и стадии проведения работ по лесовосстановлению и лесоразведению. Среди современных подходов к формированию лесных насаждений, способных к долговременному депонированию углерода, особое место занимает концепция «карбоновых ферм», предложенная А.А. Онучиным и И.М. Данилиным [26]. Данная методика, как правило, предполагает создание насаждений с преимущественным использованием рубок ухода, нацеленных на увеличение продуктивности и углеродоемкости древостоев.

В контексте настоящего исследования основное внимание уделено не столько этапу хозяйственных мероприятий по формированию высокоэффективных углерод-аккумулирующих древостоев, сколько началь-

ному периоду жизненного цикла лесных культур – от разработки проектной документации до их перевода в покрытую лесом площадь. Базовые технологические операции по лесовосстановлению и лесоразведению в природе Центральной лесостепи регламентируются Приказом №1024 [27], а эффективные способы облесения участков при привлечении различных средств механизации раскрыты в материалах ВНИИЛМ [28]. Проведение лесохозяйственных работ осуществляется в соответствии с требованиями Лесного кодекса РФ и иных нормативных актов.

Технологические регламенты по лесовосстановлению на гарях в лесостепных и степных районах Европейской части России предусматривают использование трех основных методов: содействие естественному лесовозобновлению, комбинированное и искусственное лесовосстановление (табл. 2).

Таблица 2. Технологические аспекты лесовосстановления на гарях

Table 2. Technological aspects of reforestation in burnt area

Лесные районы Европейской части РФ Forest areas of European part of the Russian Federation	Предельные сроки лесовосстановления Time limits for reforestation	Рекомендуемые способы лесовосстановления Recommended methods of reforestation	Основная порода Main species	Количество жизнеспособного подроста главных пород, тыс. шт./га Number of viable undergrowth of main species, thousand pcs./ha
Лесостепные и степные районы Forest-steppe and steppe regions	1	Содействие естественному лесовозобновлению Promotion of natural regeneration of forests		> 4,0
	1	Комбинированное лесовосстановление Combined reforestation	Сосна Pinus Дуб Quercus	1,5–4,0
	1	Искусственное лесовосстановление (лесные культуры) Artificial reforestation (forest crops)		< 2,5

Выбор метода определяется как природными условиями, так и долей жизнеспособного подроста главных пород (например, сосны или дуба), количественные параметры которых выдерживаются в соответствии с действующими нормативами.

Оценка динамики углеродных пулов, а, следовательно, и баланса выбросов и поглощения парниковых газов, осуществлялась с применением методов моделирования в рамках базового сценария лесохозяйственных мероприятий для различных типов лесорастительных условий исследуемых территорий. В основу моделирования положены таксационные и лесорастительные характеристики государственного лесного фонда, данные лесных планов шести субъектов Центральной лесостепи Русской равнины, параметры углеродного цикла, а также регламентированные нормативные требования к лесовосстановительным и лесоразведенческим работам.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках реализации адаптивных лесоклиматических проектов особое значение приобретает тщательный подбор целевого породного состава и учет структуры лесорастительных условий в региональном разрезе. Проведённый анализ породного состава и пространственной структуры лесных насаждений на территории шести субъектов Российской Федерации, охватывающих Центральную лесостепь Русской равнины, позволил выявить региональные особенности, обусловленные как экологическими, так и хозяйственными факторами.

Результаты исследования показали, что:

– В Белгородской области среди твердолиственных пород наиболее перспективным для внедрения в лесоклиматические проекты является дуб, используемый в смешанных насаждениях с ясенем, клёном, вязом, ильмом и липой. В хвойном ассортименте рекомендуются сосна, ель, а также лиственница в отдельных случаях. К мягколиственным породам, целесообразным для включения, относится тополь белый.

– В Воронежской области доминирующей хвойной породой является сосна, среди твердолиственных – дуб. Мягколиственные породы представлены тополем и чёрной ольхой, на сухих участках возможно использование караганы древовидной.

– В Курской области основными твердолиственными породами являются дуб и сосна. К мягколиственным породам с потенциалом хозяйственного использования относятся тополь, берёза и чёрная ольха.

– В Липецкой области при формировании породного состава насаждений как целевые рассматриваются дуб и сосна. В качестве сопутствующих мягколиственных включаются берёза, ольха и тополь.

– В Тамбовской области лесные насаждения преимущественно формируются на основе хвойных пород (сосна) в сочетании с берёзой и чёрной ольхой.

Анализ структуры типов лесорастительных условий (ТЛУ) показал преобладание свежих боров (ТЛУ А2), которые занимают свыше 43 % площади, занятой сосновыми насаждениями. Существенную долю занимают также лесорастительные условия свежей простой субори (ТЛУ В2) – порядка 37 %, менее распространены свежие сложные субори (ТЛУ С2) – около 7 %, доля сухих боров (ТЛУ А1) составляет приблизительно 6 %. Среди дубрав преобладает свежая дубрава (ТЛУ D2).

Леса естественного происхождения в условиях свежего бора, как правило, представлены чистыми сосняками второго класса бонитета, с незначительной долей берёзы и осины в составе. Добавление мягколиственных пород, как правило, приурочено к понижениям рельефа, и чаще всего формируется в результате вегетативного возобновления после рубок, что приводит к образованию недолговечных временных насаждений. Качественные показатели древесины берёзы в этих условиях, как правило, невысоки, возраст деревьев редко превышает 70 лет. При увеличении влажности доля сосны может снижаться до полного исчезновения, с формированием чистых берёзовых древостоев.

Структура древостоев свежих боров преимущественно одноярусная; во влажные годы может формироваться разреженный второй ярус из берёзы. В случае географической близости к дубравам возможно включение дуба в качестве второго яруса, отмечаются экземпляры высотой до 7 м и диаметром до 0,2 м. Подлесок представлен дроком, ракитником, бересклетом бородавчатым, рябиной и крушиной ломкой. Видовой состав напочвенного покрова сравнительно беден, включает ястребинку, лишайники, вейник, зелёный мох, ветреницу лютичную, а также занесённую в Красную книгу прострел раскрытый. Типичной особенностью свежих боров является постепенное формирование живого напочвенного покрова по мере возрастного снижения полноты древостоя.

Важное место в структуре лесных экосистем Центральной лесостепи занимает тип лесорастительных условий «свежая суборь», отличающийся характерными почвенно-гидрологическими и флористическими показателями, определяющими специфику формирования насаждений и их продуктивности. Анализ региональных особенностей формирования свежих суборей позволяет детально оценить их потенциал для реализации лесоклиматических проектов и долгосрочного регулирования углеродного баланса.

Свежая суборь формируется преимущественно на участках с глубиной залегания грунтовых вод 3–4 м, локализованных на лёгких всхолмлениях и слабовыраженных волнистых формах рельефа. Преобладающие почвы характеризуются супесчаным механическим составом и хорошей гумусированностью. В данных условиях сосновые древостои с незначительным участием дуба или берёзы занимают верхний ярус, при этом достаточное богатство почвы позволяет формировать полноценно развитый второй ярус, зачастую образованный дубом, а в отдельных случаях – осинкой. К возрасту около 70 лет отмечается интенсивное выпадение берёзы, в результате чего сосна реализует свой экотенциал, формируя высокопродуктивные древостои высших классов бонитета. Однако, вследствие высокой сомкнутости полога и, как следствие, ограничения светового режима, развитие подлеска затруднено и наблюдается лишь в виде отдельных экземпляров крушины, бузины или рябины. Проведение рубок может стимулировать вегетативное возобновление дуба, особенно при сохранении пней, что приводит к формированию низкоствольных порослевых дубняков невысокого качества. В данных фитоценозах дуб конкурирует преимущественно с осинкой и частично с берёзой. На вырубках быстро распространяется дерновинно-злаковый травостой. В составе напочвенного покрова преобладают травянистые виды: земляника, осоки, орляк, зелёные мхи.

Переходя к третьей надпойменной террасе левобережья, наблюдается постепенная трансформация рельефа в типичную чернозёмную равнину с расширенным гумусовым горизонтом, отличающимся не только глубиной, но и высокой степенью насыщенности органическим веществом. Механический состав почвы в этих условиях также супесчаный. Здесь доминируют свежие сложные субори, отличающиеся наибольшей продуктивностью среди суборей и формирующиеся, в том числе, на чернозёмах или черноземовидных супесях, на правобережье рек или междуречных пространствах.

Анализируя горизонтальное и вертикальное строение почвенного профиля, отмечается закономерное увеличение мощности гумусового горизонта в направлении от боровых к суборовым условиям – до 1,4 м против 0,3 м в борах. Увеличивается и содержание гумуса в верхней части профиля. Тем не менее, по содержанию зольных элементов и абсолютному уровню плодородия, суборовые почвы остаются менее продуктивными по сравнению с суглинками дубрав.

Парадоксально, но именно в условиях субори сосновые насаждения демонстрируют более высокие показатели бонитета (до Ia), чем дубняки на суглинистых почвах. Второй ярус здесь формируется, главным образом, липой, дубом черешчатым, а в последнее десятилетие – клёном остролистным. Иногда возможна организация третьего яруса, где развиваются молодые особи дуба, а также дикие плодовые породы (груша, режа яблоня). Подлесок представлен типичными для дубрав кустарниками: бересклет, лещина, чёрноклён. Травяной покров во многом аналогичен дубравному, что объясняется поступлением листового опада из второго и третьего яруса, преобладанием бактериальных процессов разложения и формированием специфических почвенных условий.

В настоящее время действующие нормативные документы для Центральной части лесостепной зоны Европейской России регламентируют преимущественное создание сосновых монокультурных насаждений (10С), при этом в отдельных случаях допускается введение в состав древостоев лиственных пород, преимущественно берёзы (7С3Б).

Однако подобная практика ведёт к формированию однородных по породному составу лесных насаждений, что существенно ограничивает уровень биологического разнообразия и снижает их способность к поддержанию экосистемного гомеостаза. Недостаточная структурная и видовая сложность лесных сообществ способствует ухудшению почвенного плодородия, интенсификации накопления горючих материалов, а также повышает уязвимость насаждений к воздействию различного рода патогенов. Кроме того, в рамках проведённого исследования было установлено, что среднегодовой уровень поглощения CO_2 в таких насаждениях на протяжении жизненного цикла не превышает 8,6 т $\text{CO}_2/\text{га}$, а суммарное накопление углерода к 40-летнему возрасту составляет порядка 56 т С/га.

Анализ распределения углерода между различными его пулами показал, что наибольший вклад в общей структуре углеродного баланса вносит фитомасса древостоя, однако по мере развития и старения лесных экосистем возрастает роль мёртвого органического вещества и органического углерода почв. Эти результаты подчёркивают необходимость перехода к комплексному управлению углеродным циклом, которое должно включать не только мероприятия по созданию

насаждений, но и поддержание высокого уровня почвенного плодородия и устойчивости экосистем.

В целях комплексной оценки вклада лесохозяйственных мероприятий в формирование баланса парниковых газов на землях лесного фонда, был проведён анализ динамики составляющих углеродного баланса и запасов углерода в лесах субъектов Российской Федерации. В результате расчетов установлено, что, наряду с выполнением плановых объёмов лесовосстановления в регионах Центральной лесостепи, целесообразно обеспечить дополнительное расширение площадей посадки леса с использованием саженцев с закрытой корневой системой (ЗКС). В частности, прогнозируемые площади такого увеличения составляют 101,64 га для Белгородской области, 3018,3 га – для Воронежской области, 100,56 га – для Курской области, 210 га – для Липецкой области, 89,4 га – для Орловской области и 1311 га – для Тамбовской области вплоть до 2028 года. Следует отметить, что повышение приживаемости саженцев, выращенных с закрытой корневой системой, возможно при условии внедрения комплекса агротехнических мероприятий по уходу за создаваемыми лесными культурами.

Более того, экономическая оценка дополнительных затрат на реализацию этих мероприятий показала следующее. При учёте расчетного периода финансирования семь лет, ежегодного планируемого объёма работ (доля посадки саженцами с ЗКС – 30 %), базовых норм и расходов (утвержденных Приказом № 607), а также уровня инфляции 4 % в конце года, интегральные расходы на выполнение данных мероприятий по лесовосстановлению и лесоразведению, направленных на сокращение выбросов и увеличение поглощения парниковых газов в 2024–2028 гг. составят 244 026,479 тыс. руб. для субъектов Центральной лесостепи.

Таким образом, обобщённые результаты анализа свидетельствуют о том, что в региональных системах лесного хозяйства, наряду с мероприятиями, направленными на адаптацию лесов к климатическим изменениям, существует значительный потенциал для реализации лесоклиматических проектов, фокусирующихся на сокращении выбросов и увеличении поглощения парниковых газов.

В свете современных климатических вызовов и в условиях реализации лесных климатических проектов, направленных на создание насаждений с высоким потенциалом депонирования углерода, возникает необходимость существенной модернизации традиционных технологий ведения лесного хозяйства. Особое значение приобретает внедрение инновационных лесохозяйственных подходов, ориентированных на ускоренное выращивание высокопродуктивных лесных насаждений, способных значительно увеличить поглотительную способность к парниковым газам.

В предлагаемом исследовании акцентируется внимание на совершенствовании базовых технологических комплексов лесохозяйственных работ на принципах:

- обязательного учёта района расположения, категории и транспортной доступности лесных участков;
- тщательного подбора древесных пород, соответствующих зонально-географическим особенностям, типу лесорастительных условий и обладающих высоким потенциалом углеродного депонирования;

- научного обоснования способов лесовосстановления, минимизирующих нарушение почвенного покрова и содействующих сохранению его структуры;

- организации ухода за насаждениями с приоритетом сохранения и аккумуляции органического углерода, как в почве, так и в древесной и кустарниковой биомассе;

- формирования древостоев, композиционно и структурно приближенных к естественным лесам региона.

Ключевым этапом создания насаждений с высоким потенциалом накопления углерода является подготовка почвы. В рамках традиционной (базовой) линии такая подготовка, как правило, включает расчистку территории с сжиганием древесных остатков, что сопровождается потерями органического вещества.

В качестве инновационной альтернативы в проектной линии предлагается внедрение метода измельчения древесных остатков и последующего смешивания их с гумусовым горизонтом почвы. Такой подход обеспечивает более экологически безопасное ведение работ, ускоряет разложение органических компонентов, способствует накоплению гумуса и улучшению почвенного плодородия, особенно на ранее вырубленных или гаревых участках.

Для реализации данной методики требуется полное удаление, измельчение и равномерное распределение древесно-кустарниковой растительности в пределах лесокультурной площади, включая надземные и подземные части растений. Смешивание измельченных остатков с гумусовым горизонтом почвы ведет к увеличению содержания гумуса, активизации почвенной микрофлоры, улучшению влагоудерживающей способности и стабилизации структуры почвы.

Применение специализированной механизированной техники на нерасчищенных вырубках и гарях способствует увеличению доли органического углерода в почве, что полностью соответствует задачам низкоуглеродного развития современного лесного хозяйства и обеспечивает долгосрочную устойчивость создаваемых лесных экосистем.

В рамках проведенного исследования нами была осуществлена систематизация наиболее эффективных типов специализированных машин для выполнения лесохозяйственных работ при подготовке почвы на вырубках и гарях, в частности – мульчеров и ротораторов (щепорубительные машины, а также навесные и самоходные мульчеры и роторные измельчители).

Мульчеры и ротораторы представляют собой современные агрегаты, основной принцип работы которых заключается в механическом измельчении и дроблении заросшей растительности (кустарники, мелкостой, подрост), порубочных остатков, а также в корчевании пней преимущественно на поверхности почвы. Роторные измельчители способны эффективно перерабатывать наземную часть растений диаметром до 10 см и осуществлять обработку грунта на глубину до 70 см, перемалывая корневую систему и остатки пней. Мелкофракционное измельчение древесных компонентов ускоряет процессы их биологического разложения, что способствует возврату питательных веществ и органического углерода в почвенный горизонт, повышая его плодородие.

Внедрение технологии очистки площадей для лесовосстановления с применением лесных мульчеров и ротораторов позволяет за один проход обеспечить полное

удаление и переработку всей древесно-кустарниковой растительности и порубочных остатков с последующим равномерным распределением измельченной массы по поверхности участка. Высокая производительность данных машин обуславливает их эффективность и экономическую целесообразность, особенно на участках, нарушенных лесными пожарами или подвергшихся значительным антропогенным воздействиям.

Комплексное использование мульчеров и ротораторов в составе парка лесохозяйственных машин обеспечивает не только качественную подготовку участка к последующему лесовосстановлению, но и способствует снижению выбросов парниковых газов за счёт минимизации сжигания древесных остатков. Более того, интеграция измельченной органики в почвенный слой способствует улучшению структуры и биологической активности почв, повышает их влагоёмкость, способствует восстановлению микробиологического баланса и дальнейшему приросту углеродных запасов в экосистеме.

Таким образом, внедрение данных технологий в лесохозяйственную практику является перспективным направлением обеспечения устойчивого лесо- и почвопользования, отвечающим задачам низкоуглеродного развития и адаптации лесного фонда к современным климатическим условиям.

Искусственное лесовосстановление позволяет существенно ускорить процесс формирования будущих лесов с участием хозяйственно ценных пород. Способы обработки почвы выбираются в зависимости от природно-климатических условий, типов почв, ТЛУ, рельефа, видового состава живого напочвенного покрова и степени задержания.

Создание углерод депонирующих насаждений в технологическом смысле требует не только очистки арены лесовосстановления и правильный подбор культур, но серьезной работы по подготовке почвы и улучшению технологий посадки сеянцев/саженцев.

Обеспечения благоприятных условий для роста древесных растений на лесокультурной площади невозможно без предварительной обработки почвы. Она обычно проводится сочетанием химический и механических методов. Химические направлены на устранение межвидовой конкуренции и повышение плодородия, механические – улучшают состав и структуру субстрата.

В целях сохранения углерода в почве целесообразна частичная обработка почвы без оборота пласта. При обработке почвы создаются ряды, в которых формируются наиболее благоприятные условия для роста и развития растений, соответственно посадка осуществляется тоже по бороздам.

Сроки посадки устанавливаются по многолетним климатическим данным.

В настоящее время необходимо учитывать, что весенний сезон очень сильно сократился (в некоторые годы до 2–3 недель). А осенняя посадка, осуществляемая в конце сентября-октябре, стала демонстрировать хорошие результаты по приживаемости и, в конечном счете, по сохранности лесных культур. Температурным оптимумом считается период от даты перехода средней суточной температуры через +5 °С до даты перехода +10 °С. И, соответственно в осенний период зеркально, в обратном порядке. Поэтому планирование посадочных работ необходимо осуществлять с учетом климатических изменений.

Для создания продуктивных и углеродоемких лесных насаждений необходима посадка саженцев и семян ручным, и в качестве исключения, механизированным способом. Предпочтительна посадка под меч Колесова либо (в случае наличия посадочного материала с ЗКС с использованием различных вариантов посадочной трубы).

Важный момент – транспортировка лесопосадочного материала к местам, на которых будет производиться высадка растений. Длительность перевозки должна быть минимальной, а условия хранения обеспечить увлажнение и хорошее жизненное состояние растений.

При любом способе посадки важным моментом является её «физиологичность». В условиях В₂ для повышения приживаемости и для борьбы с патогенными организмами, поражающими молодые растения, проводят полив водой и обработку бордоской жидкостью (меди сульфат + кальция гидроксид). В типах лесорастительных условий С₂, Д₂ рекомендуется использовать почвенный гербицид Бегин Турбо.

Проектной линией предусматривается посадка семян с первоначальной густотой не менее 3,3 тысячи шт./га. Однако, и с учётом почвенных условий (типа лесорастительных условий), следует создавать смешанные насаждения с участием не менее пяти древесных пород для Центральной лесостепи с густотой посадки от 2,7 до 4,2 тыс. шт./га.

В результате такого лесовосстановления формируется сложное по составу и форме насаждение, приближающееся по своим характеристикам к природному образцу. Многопородные насаждения способствуют повышению продуктивности в целом в первую очередь за счет повышения их устойчивости.

В предлагаемой технологии посадка древесных растений на лесокультурной площади будет осуществляться:

- двухлетними сеянцами сосны (ЗКС),
- двухлетними сеянцами березы,
- двухлетними сеянцами дуба,
- однолетними укорененными черенками тополя (ЗКС).

Рассматривая технологические аспекты создания лесных культур в различных ТЛУ необходимо более подробно остановиться на проектом варианте для каждого типа.

1. Создание лесных культур в сухих борах (ТЛУ – А₁).

Сосна в условиях сухого бора условиях достигает только III–IV классов бонитета. Как приживаемость, так и дальнейшие сохранность и рост лесных культур сосны, в первые несколько лет в подобных условиях не отличаются благоприятностью. Создание монокультур сосны обыкновенной (10С) в типах лесорастительных условий А₁ имеют два серьезных недостатка: во-первых, рост пожароопасности с одной стороны, а с другой возрастающее закисление и деградация бедной почвы. В проектом варианте в качестве альтернативы предлагается чередование полос березы и сосны. Введение под пологом сосны обыкновенной кустарника (карагана древовидная) позволит древесным породам (береза) легче переносить закисление почвы. Лесные культуры в свежих борах (ТЛУ – А₂). В указанных условиях наибольшее развитие получают сосновые древостои II класса бонитета. Березе также хватает почвенного плодородия и влажности для формирования древостоев II бонитета, однако ресурсов для того, чтобы сразу выйти в I ярус насаждения недостаточно, в связи с чем сосна

продолжает лидировать по высоте. Культуры сосны необходимо создавать с примесью от 10 до 50 % березы.

Таким образом в бедных условиях (ТЛУ – А₁ и А₂) в проектом варианте возможно создание насаждений 5С3Вз2Кар.

2. Лесные культуры в свежих суборах (ТЛУ – В₂).

Здесь формируются насаждения, качество которых оценивается Ia–I классом бонитета. В качестве пород 2-го яруса могут выступать дуб, береза, тополь, сосна крымская. В качестве сопутствующих пород рекомендуются – дуб черешчатый, дуб красный, береза повислая, тополь, сосна крымская. Схема проектируемых углерод депонирующих насаждений в этих условиях лесопроизрастания (ТЛУ – В₂) – 3С3Б2Т2Д.

3. Лесные культуры в свежей сложной субори (ТЛУ – С₂).

Здесь формируются насаждения, произрастающие по Ia классу бонитета. При этом второй ярус таких лесов составляют такие широколиственные породы как липа, дуб черешчатый. В последнее десятилетие распространение в качестве породы второго яруса сложных суборей получает клён остролистный. Интродуцированные и селекционно улучшенные древесные породы, такие как дуб красный и гибридный тополь ЭС-38 могут значительно улучшить как общую продуктивность насаждения, так и его углероддепонирующие свойства. Схема проектируемых углерод депонирующих насаждений в этих условиях лесопроизрастания – 4ДЗСЗТ.

4. Лесные культуры в свежих дубравах (ТЛУ – Д₂).

В этих условиях рекомендуется высаживать дуб черешчатый с примесью тополя. Дуб черешчатый является своеобразной породой, имеющей определенные особенности роста, развития и формирования вокруг себя сообщества консортов. Ему необходимы не только достаточное увлажнение, но и хороший уровень богатства лесной почвы, однако, скорость роста дубовых древостоев невысока. В тоже время высокие углерод депонирующие способности тополей (в частности тополя ЭС-38), имеющих большой потенциал по скорости роста и накопления биомассы, позволяют создавать высокопродуктивные и углеродоемкие насаждения уже на ранних стадиях онтогенеза насаждений. Прогнозируемый объём поглощения в отдельные периоды роста таких насаждений может превышать 31 т СО₂/га в год, а накопление к 40-летнему возрасту варьирует от 97 до 256 т С/га в зависимости от состава насаждений и типа лесорастительных условий. Схема проектируемых углерод депонирующих насаждений в этих условиях лесопроизрастания (ТЛУ – Д₂) – 5Д2КЛЗТ.

Обобщая приведенные выше данные, о преобладающих типах лесорастительных условий, а также базовых технологиях лесовосстановления и лесоразведения в Центральной лесостепи Европейской части РФ, а также актуальные тенденции смены климатических условий, представляется возможным сделать следующие рекомендации по составу и схемам смещения насаждений, создаваемых в целях реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению на землях лесного фонда, а также в целях воспроизводства лесов (табл. 3).

Теория объясняет и практика показывает, что успешность создания лесных культур напрямую зависит от качества дальнейших агротехнических и лесоводственных уходов за насаждениями. В соответствии с Лесным кодексом уход за лесами представляет собой осуществление мероприятий, направленных на

повышение продуктивности лесов, сохранение их полезных функций. Уходные работы стабилизируют тепловой режим почвы, активизируют микробиологические процессы в почве и разложение органических

остатков, устраняют сорняки – активных конкурентов высаженных растений за свет и питательные вещества, уменьшают испарение влаги из почвенного горизонта, аэрацию почвы и поглощение атмосферных осадков.

Таблица 3. Рекомендации по составу и схемам смещения насаждений, создаваемых в целях реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению на землях лесного фонда, а также в целях воспроизводства лесов

Table 3. Recommendations on the composition and schemes of displacement of plantings created for the implementation of forest-climatic projects for reforestation and afforestation on forest fund lands, as well as for the purpose of forest reproduction

№ п/п	Тип лесорастительных условий Type of forest conditions	Состав древесных пород Composition of tree species	Схема смещения Mixing scheme	Технологическая характеристика создаваемых культур Technological characteristics of trees created
1	2	3	4	5
Базовая линия / The base line				
1.	A ₁ , A ₂ , B ₂ , C ₂ , D ₂	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>); Береза повислая (<i>Betula pendula</i>)	10C, 7C3Б / 10 PS, 7PS3BP	Густота не менее 4 тыс. шт/га Planting density of at least 4 thousand pieces/ha
Проектная линия / Project line				
1.	A ₁	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>); Карагана древовидная (<i>Caragana arborescens</i>); Вяз гладкий, или обыкновенный (<i>Ulmus laevis</i>)	5C4 Караган1B / 5PS 4Caragana1UI	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3 x 0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м Length of furrow 150 m Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of stumps up to 500 pieces/ha
2.	A ₂	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>); Карагана древовидная (<i>Caragana arborescens</i>); Вяз гладкий или обыкновенный (<i>Ulmus laevis</i>)	5C3B2Караган/5PS3UI2Caragana	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3x0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м, шаг посадки – 1 м Length of furrow 150 m, plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of stumps up to 500 pieces/ha Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m
3.	B ₂	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>); Береза повислая (<i>Betula pendula</i>); Тополь ЭС 38 (<i>Populus L.</i>);	3C3Б2Т2Д / 3PS3BP2PL2QR	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3x0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м

		Дуб красный (<i>Quercus rubra</i>)		Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м, шаг посадки – 1 м Length of furrow 150 m, plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of block up to 500 pieces/ha Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m
4.	C ₂	Дуб красный (<i>Quercus rubra</i>); Тополь ЭС 38 (<i>Populus L.</i>); Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)	4ДЗТЗС / 4QR3PL3PS	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3х0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м, шаг посадки – 1 м Length of furrow 150 m, plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of block up to 500 pieces/ha Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m
5.	D ₂	Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i>); Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i>); Тополь (<i>Populus sp.</i>)	5Д2КлЗТ / 5QR2AP3PL	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3х0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м, шаг посадки – 1 м Length of furrow 150 m, plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of block up to 500 pieces/ha Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m

В число мероприятий по агротехническим уходам входят удаление травы в рядах культур, рыхление почвы с одновременным уничтожением травы, а при частичной обработке почвы – в полосах. В качестве технических средств применяются культиватор лесной дисковый навесной – ДЛКН-6/8, культиватор боковой лесной КЛБ-1А, культиватор ротационный лесной КРЛ-1А, дисковый культиватор КЛБ-1,7. Сами работы осуществляются как рядах, так и в междурядьях.

В типах условий местопроизрастания, соответствующих свежим дубравам и судубравам (ТЛУ – D₂, C₂) механизированный уход за лесными культурами в междурядье проводят культиватором КЛБ-1.7.

В типах условий местопроизрастания, соответствующих свежим суборям (ТЛУ – В₂) механизированный уход за лесными культурами в междурядье проводят дисковым лесным культиватором

ДЛКН-6/8, в рядах проводят механизированный уход культиватором КЛБ-1 седланием рядов.

В типах условий местопроизрастания, соответствующих сухим и свежим борам (ТЛУ – А₁, А₂) механизированный уход за лесными культурами в междурядье, проводят культиватором КЛБ-1.7, в рядах проводят механизированный уход культиватором КЛБ-1 седланием рядов.

При создании насаждений в районах с недостаточным увлажнением почв в сухих и свежих борах (ТЛУ – А₁, А₂) необходимы поливы. Полив проводится на участках один раз в неделю в течении поливочного сезона в сухих и свежих борах (ТЛУ – А₁, А₂). При проведении агротехнических уходов и поливов создаваемых лесных культур для условий Центральной лесостепи придерживаются следующего плана: в 1-й год осуществляют 3 агротехнические ухода, во 2-й – 3, в 3-й – 2 и в 4-й год – 1 уход. Для рыхления почвы и уничтожения

сорняков используют культиваторы. Осуществляется механизированный уход в междурядьях культиватором шириной 1,4 м по периметру. Для уничтожения сорняков в рядах культур, а также нежелательных листовых пород в ТЛУ В₂, С₂, D₂ могут быть использованы гербициды и арборициды.

После посадки древесных растений на лесокультурную площадь, проводятся противопожарные мероприятия путем устройства противопожарных минерализованных полос, с последующим уходом. Минерализованные полосы прокладываются обязательно с внешней стороны участка в случае примыкания его к сельскохозяйственным угодьям, на которых могут производиться палы. Протяженность минерализованных полос в среднем не менее 6 км на 100 га участка. Минерализованная полоса распахивается шириной 1,4 м плугом ПКЛ-70 или другим плугом в один след и с началом пожароопасного периода подновляется каждый год. Противопожарный разрыв распахивается шириной 10 м трактором МТЗ-82 в агрегате с бороной дисковой БД-2,2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования подтверждают критическую значимость целенаправленного совершенствования технологий лесовосстановления и лесоразведения для достижения задач низкоуглеродного развития и адаптации лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России к современным климатическим вызовам. Установлено, что традиционные подходы к лесовосстановлению, ориентированные преимущественно на создание сосновых монокультур, не обеспечивают необходимого уровня биологического разнообразия, что приводит к снижению почвенного плодородия, росту количества горючих материалов и увеличению уязвимости насаждений к воздействию патогенов и неблагоприятных абиотических факторов. Кроме того, прогнозируемый уровень накопления и поглощения углерода в подобных насаждениях существенно уступает потенциалу естественно-типичных смешанных и разновозрастных лесов.

Анализ региональных особенностей лесорастительных условий позволил выявить оптимальные комбинации древесных пород с учетом трофности почв, гидрологического режима и структуры рельефа. Показано, что применение саженцев с закрытой корневой системой и расширение спектра уходовых агротехнических мероприятий может значительно повысить приживаемость и продуктивность создаваемых насаждений, а также способствовать дополнительному депонированию углерода как в фитомассе, так и в почве.

Предложенная и апробированная в работе технология по подготовке почвы с применением мульчеров и роторов, предусматривающая измельчение и интеграцию древесных остатков в гумусовый горизонт, обладает несомненными экологическими преимуществами по сравнению с практикой сжигания порубочных остатков. Такой подход способствует ускоренному вовлечению органического вещества в круговорот, поддержанию и восстановлению почвенного плодородия, интенсификации процессов образования гумуса и накопления почвенного органического углерода, что играет ключевую роль в обеспечении устойчивого функционирования лесных экосистем.

Экономическая оценка реализации дополнительных лесохозяйственных мероприятий с акцентом на

посадку саженцев с ЗКС и модернизацию технологии подготовки почвы свидетельствует о значительных затратах, однако эти инвестиции оправданы с точки зрения долгосрочных природоохранных и социально-экономических эффектов: увеличения баланса углерода, повышения устойчивости и продуктивности лесных ландшафтов, снижения климатических рисков и вовлеченности регионов в системы экологических платежей («углеродных кредитов»).

В итоге, интеграция научно-обоснованного подбора породного состава, инновационных методик почвоподготовки и комплекса агротехнических мер по уходу за лесными культурами в лесохозяйственную практику позволяет существенно повысить климатическую и экологическую эффективность лесоклиматических проектов. Данные выводы могут быть использованы для оптимизации программ развития регионального лесного хозяйства и совершенствования политик в области адаптации к изменению климата.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FZUR-2024-0001, № 124020100131-5).

ACKNOWLEDGEMENT

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FZUR-2024-0001, № 124020100131-5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rocha J., Oliveira S., Viana C.M., Ribeiro A.I. Chapter 8 – Climate change and its impacts on health, environment and economy. Editor(s): Joana C. Prata, Ana Isabel Ribeiro, Teresa Rocha-Santos, One Health, Academic Press, 2022. P. 253–279. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822794-7.00009-5>
2. Hui D., Deng Q., Tian H., Luo Y. Climate Change and Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. In: Chen, WY., Suzuki, T., Lackner, M. (eds) Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14409-2_13/
3. Yadav V.S., Yadav S.S., Gupta S.R., Meena R.S., Lal R., Sheoran N.S., Jharia M.K. Carbon sequestration potential and CO₂ fluxes in a tropical forest ecosystem // Ecological Engineering. 2022. V. 176. Article ID: 106541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106541>
4. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
5. Psistaki K., Tsantopoulos G., Paschalidou A.K. An Overview of the Role of Forests in Climate Change Mitigation // Sustainability. 2024. N 16(14). Article ID: 6089. <https://doi.org/10.3390/su16146089>
6. MacKenzie W.H., Mahony C.R. An ecological approach to climate change-informed tree species selection for reforestation // Forest Ecology and Management. 2021. N 481. Article ID: 118705.
7. Standish R.J., Prober S.M. Potential benefits of biodiversity to Australian vegetation projects registered with the Emissions Reduction Fund – is there a carbon-biodiversity trade-off? // Ecological Management & Restoration. 2020. N 21(3). P. 65–172. <https://doi.org/10.1111/emr.12426>
8. Птичников А.В., Шварц Е.А., Кузнецова Д.А. О потенциале поглощения парниковых газов лесами России для снижения углеродного следа экспорта отечественной продукции // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. N 2. С. 181–184.
9. Кренке А.Н., Птичников А.В., Шварц Е.А., Петров И.К. Величина баланса углерода лесов в национальной климатической политике России и Канады // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. N 2. С. 231–236.

10. Dharmawan I.W.S., Lisnawati Y., Siahaan H., Premono B.T., Iqbal M., Junaedi A., Sakuntaladewi N., Baston Fauzi R., Ramawat Nugroho A.W., Undahart N.K.E., Achmadi A.S., Setyawati T., Siregar C.A., Pratiwi Suhartana S., Soenarno Dulsalam, Sukmana A. Use of an Adaptive-Vegetation Model to Restore Degraded Tropical Peat Swamp Forest to Support Climate Resilience // *Land*. 2024. N 13(9). Article ID: 1377. <https://doi.org/10.3390/land13091377>
11. Libert-Amico A., Larson A.M. Forestry Decentralization in the Context of Global Carbon Priorities: New Challenges for Subnational Governments // *Front. For. Glob. Change*. 2020. N 3. Article ID: 15. DOI: 10.3389/ffgc.2020.00015
12. Медведев С.О., Зырянов М.А. Моделирование деятельности предприятий лесной отрасли с учетом перспектив перехода на принципы устойчивого развития // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2024. Т. 17. N 2. С. 129–145. DOI: 10.15838/esc.2024.2.92.7
13. Ваганов Е.А., Пыжев А.И., Курбатова М.В. Перспективы реализации лесоклиматических проектов: потенциал регионов Енисейской Сибири: флагманский аналитический доклад. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. URL: <https://www.sfu-kras.ru/files/NOC-doklad.pdf> (дата обращения: 11.01.2025)
14. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 июня 2016 г. № 367 "Об утверждении Видов лесосечных работ, порядка и последовательности их проведения, Формы технологической карты лесосечных работ, Формы акта осмотра лесосеки и Порядка осмотра лесосеки" URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71480560/> (дата обращения: 11.01.2025)
15. Коломыц Э.Г., Шарая Л.С., Севостьянов С.М. Состояние и устойчивость лесов региона с экстремальной антропогенной трансформацией (на примере Окского бассейна) // *Растительные ресурсы*. 2023. Т. 59. N 3. С. 277–296. DOI: 10.31857/S0033994623020073
16. Морковина С.С., Шешнищан С.С., Иванова А.В. и др. Потенциал и инвестиционная привлекательность проектов по улучшенному лесному хозяйству в условиях возрастающих климатических вызовов // *Юг России: экология, развитие*. 2024. Т. 19. N 3(72). С. 180–192. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-18
17. Фоменко Г.А., Романовская А.А., Фоменко М.А. и др. Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG-подхода. Часть 1 // *Проблемы региональной экологии*. 2022. N 2. С. 91–106. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-2-91-106
18. Шанин В.Н., Фролов П.В., Коротков В.Н. Всегда ли искусственное лесовосстановление может быть лесоклиматическим проектом? // *Вопросы лесной науки*. 2022. N 5(2). С. 103–139. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-106
19. Дьяченко Ю.К., Литвинова А.В., Нестерова О.В. и др. Добровольный рынок углерода: российский институциональный контекст и перспективы развития // *Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление*. 2024. N 3(111). С. 60–105. DOI: 10.24866/2311-2271/2024-3/1064
20. Желдак В.И., Дорощенко Э.В., Прока И.Ю. и др. Вопросы лесоводственного совершенствования системы сохранения и использования лесов в рамках решения проблемы адаптации лесов и лесного комплекса к изменениям климата // *Лесохозяйственная информация*. 2023. N 2. С. 5–26. DOI: 10.24419/LNI.2304-3083.2023.2.01
21. Carbon landfills of the Russian Federation. URL: <https://carbon-polygons.ru/> (дата обращения: 10.03.2025)
22. Карбоновые полигоны России: настоящее и будущее. URL: <https://www.ecoindustry.ru/i/news/59836/doklad.pdf> (дата обращения: 11.04.2025)
23. Лазарев Ю.А., Желдак В.И., Завалова Т.А. Лесное хозяйство. Термины и определения. ГОСТ 18486-87. М., 1987. 18 с.
24. Погребняк П.С. Основы лесной типологии. 2-е изд. Киев: АН УССР, 1955. 456 с.
25. Воробьев Д.В. Типы лесов Европейской части СССР. Киев: Изд-во АН УССР, 1953. 452 с.
26. Онучин А.А., Данилова И.В. Патент № 2617452 Российская Федерация, МПК G01W 1/00, G06T 11/00. способ определения количества и характера пространственного распределения твердых атмосферных осадков: № 2015122639: заявл. 10.06.2015. опубл. 25.04.2017 / заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук".
27. Приказ Минприроды России от 29.12.2021 N 1024 (ред. от 03.08.2023) Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-29122021-n-1024-ob-utverzhenii/> (дата обращения: 12.06.2025)
28. Родин С.А., Проказин Н.Е., Казаков В.И. и др. Рекомендации по планированию и проектированию фонда лесовосстановления на площадях, пройденных лесными пожарами и ветровалами. Пушкино: Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2019. 36 с.

REFERENCES

1. Rocha J., Oliveira S., Viana C.M., Ribeiro A.I. Chapter 8 – Climate change and its impacts on health, environment and economy. Editor(s): Joana C. Prata, Ana Isabel Ribeiro, Teresa Rocha-Santos, One Health, Academic Press, 2022, pp. 253–279. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822794-7.00009-5>
2. Hui D., Deng Q., Tian H., Luo Y. Climate Change and Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. In: Chen WY., Suzuki T., Lackner M. (eds). *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14409-2_13/
3. Yadav V.S., Yadav S.S., Gupta S.R., Meena R.S., Lal R., Sheoran N.S., Jhariya M.K. Carbon sequestration potential and CO₂ fluxes in a tropical forest ecosystem. *Ecological Engineering*, 2022, vol. 176, article id: 106541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106541>
4. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
5. Psistaki K., Tsantopoulos G., Paschalidou A.K. An Overview of the Role of Forests in Climate Change Mitigation. *Sustainability*, 2024, no. 16(14), article id: 6089. <https://doi.org/10.3390/su16146089>
6. MacKenzie W.H., Mahony C.R. An ecological approach to climate change-informed tree species selection for reforestation. *Forest Ecology and Management*. 2021, no. 481, article id: 118705.
7. Standish R.J., Prober S.M. Potential benefits of biodiversity to Australian vegetation projects registered with the Emissions Reduction Fund – is there a carbon-biodiversity trade-off? *Ecological Management & Restoration*, 2020, no. 21(3), pp. 65–172. <https://doi.org/10.1111/emr.12426>
8. Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Kuznetsova D.A. On the potential of greenhouse gas absorption by Russian forests to reduce the carbon footprint of exports of domestic products. *Doklady RAN. Nauki o Zemle [RAS reports. Earth Sciences]*. 2021, no. 2, pp. 181–184. (In Russian)
9. Krenke A.N., Ptichnikov A.V., Schwartz E.A., Petrov I.K. The value of the forest carbon balance in the national climate policy of Russia and Canada. *Doklady RAN. Nauki o Zemle [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences]*. 2021, no. 2, pp. 231–236. (In Russian)
10. Dharmawan I.W.S., Lisnawati Y., Siahaan H., Premono B.T., Iqbal M., Junaedi A., Sakuntaladewi N., Baston Fauzi R., Ramawat Nugroho A.W., Undahart N.K.E., Achmadi A.S., Setyawati T., Siregar C.A., Pratiwi Suhartana S., Soenarno Dulsalam, Sukmana A. Use of an Adaptive-Vegetation Model to Restore Degraded Tropical Peat Swamp Forest to Support Climate Resilience. *Land*, 2024, no. 13(9), article id: 1377. <https://doi.org/10.3390/land13091377>
11. Libert-Amico A., Larson A.M. Forestry Decentralization in the Context of Global Carbon Priorities: New Challenges for Subnational Governments. *Front. For. Glob. Change*, 2020, no. 3, article id: 15. DOI: 10.3389/ffgc.2020.00015
12. Medvedev S.O., Zyryanov M.A. Modeling the activities of enterprises in the forest industry, taking into account the prospects for the transition to the principles of sustainable development. *Economic and social changes: facts, trends, forecast*, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 129–145. DOI: 10.15838/esc.2024.2.92.7
13. Vaganov E.A., Pyzhev A.I., Kurbatova M.V. Prospects for the implementation of forest-climatic projects: the potential of the regions

- of Yenisei Siberia: flagship analytical report. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2023. (In Russian) Available at: <https://www.sfu-kras.ru/files/NOC-doklad.pdf> (accessed 11.01.2025)
14. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated June 27, 2016 No. 367 "On approval of the types of logging operations, the order and sequence of their implementation, the form of the technological map of logging operations, the Form of the act of inspection of the logging area and the Order of inspection of the logging area". (In Russian) Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71480560/> (accessed 11.01.2025)
15. Kolomyts E.G., Sharaya L.S., Sevostyanov S.M. The state and stability of forests in a region with extreme anthropogenic transformation (on the example of the Oka basin). *Plant resources*, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 277–296. DOI: 10.31857/S0033994623020073
16. Morkovina S.S., Sheshnitsan S.S., Ivanova A.V. et al. Potential and investment attractiveness of improved forestry projects in the face of increasing climatic challenges. *South of Russia: ecology, development*, 2024, vol. 19, no. 3(72), pp. 180–192. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-18
17. Fomenko G.A., Romanovskaya A.A., Fomenko M.A. et al. Forest climate projects: opportunities and challenges of implementing the ESG approach. Part 1. *Problems of regional ecology*, 2022, no. 2, pp. 91–106. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-2-91-106
18. Shanin V.N., Frolov P.V., Korotkov V.N. Can artificial reforestation always be a forest-climatic project? *Questions of Forest Science*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 103–139. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-106
19. Dyachenko Yu.K., Litvinova A.V., Nesterova O.V. et al. The Voluntary Carbon Market: Russian Institutional Context and Development Prospects. *Bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management*, 2024, no. 3(111), pp. 60–105. DOI: 10.24866/2311-2271/2024-3/1064
20. Zheldak V.I., Doroshenkova E.V., Proka I.Yu. Issues of forestry improvement of the system of conservation and use of forests within the framework of solving the problem of adaptation of forests and the forest complex to climate change. *Forestry information*, 2023, no. 2, pp. 5–26. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.01
21. Carbon landfills in Russia: present and future. (In Russian) Available at: <https://carbon-polygons.ru/> (accessed: 10.03.2025)
22. *Karbonovye poligony Rossii: nastoyashchee i budushchee* [Carbon landfills of the Russian Federation]. (In Russian) Available at: <https://www.ecoindustry.ru/i/news/59836/doklad.pdf> (accessed: 11.04.2025)
23. Lazarev Yu.A., Zheldak V.I., Zavalova T.A. *Lesovodstvo. Terminy i opredeleniya* [Forestry. Terms and definitions]. Moscow, 1987, 18 p. (In Russian)
24. Pogrebnyak P.S. *Osnovy lesnoi tipologii* [Fundamentals of Forest Typology]. Kiev, AN USSR Publ., 1955, 2nd ed. 456 p. (In Russian)
25. Vorob'ev D.V. *Tipy lesov Evropeiskoi chasti SSSR* [Forest Types of the European Part of the USSR]. Kiev, AN USSR Publ., 1953, 452 p. (In Russian)
26. Onuchin A.A., Danilova I.V. *Patent No. 2617452 Russian Federation, MPK G01W 1/00, G06T 11/00. Sposob opredeleniya kolichestva i kharaktera prostranstvennogo raspredeleniya tverdykh atmosferynykh osadkov* [Method for determining the quantity and nature of the spatial distribution of solid atmospheric precipitation]: No. 2015122639: filed 10.06.2015: published 25.04.2017; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences". (In Russian)
27. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 29, 2021 No. 1024 (as amended on August 3, 2023) On approval of the Rules for reforestation, forms, composition, procedures for approval of the reforestation project, grounds for refusal of its approval, as well as requirements for the format in electronic form of the reforestation project. Available at: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-29122021-n-1024-ob-utverzhenii/> (accessed: 12.06.2025)
28. Rodin S.A., Prokazin N.E., Kazakov V.I. et al. *Rekomendatsii po planirovaniyu i proektirovaniyu fonda lesovosstanovleniya na ploshchadyakh, poidennykh lesnymi pozharemi i vetrovalami* [Recommendations for planning and designing a reforestation fund in areas affected by forest fires and windfalls]. Pushkino, All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization Publ., 2019, 36 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Светлана С. Морковина разработала концепцию и дизайн исследования, написала первую версию статьи. Наталия В. Яковенко дала экономическую оценку реализации дополнительных лесохозяйственных мероприятий. Елена А. Колесниченко несла ответственность за все аспекты исследования и гарантировала соответствующее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью всех частей работы. Дарья А. Литовченко одобрила окончательную версию статьи перед ее подачей для публикации, сформулировала результаты исследования и заключительные выводы. Андрей Н. Топчеев подготовил графический и картографический материал. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Svetlana S. Morkovina developed the concept and design of the research and wrote the first version of the article. Nataliya V. Yakovenko undertook economic assessment of the implementation of additional forestry measures. Elena A. Kolesnichenko participated through agreement to be responsible for all aspects of the research and to guarantee appropriate consideration and resolution of issues related to the accuracy and integrity of all parts of the work. Daria A. Litovchenko approved the final version of the article before its submission for publication, as well as formulation of research results and final conclusions. Andrey N. Topcheev prepared graphic and cartographic materials. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Светлана С. Морковина / Svetlana S. Morkovina <https://orcid.org/0000-0003-3776-5181>
 Наталия В. Яковенко / Nataliya V. Yakovenko <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>
 Елена А. Колесниченко / Elena A. Kolesnichenko <https://orcid.org/0000-0002-1213-3199>
 Дарья А. Литовченко / Daria A. Litovchenko <http://orcid.org/0000-0003-2973-7447>
 Андрей Н. Топчеев / Andrey N. Topcheev <https://orcid.org/0009-0000-2484-3844>