

Оригинальная статья / Original article

УДК 630.181.37

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-9



Лесовосстановление и углеродный баланс лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России: вызовы и перспективы устойчивого развития

Светлана С. Морковина, Елена А. Колесниченко, Наталия В. Яковенко,
Сергей С. Шешницан, Алексей Н. Водолажский

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, 8.

Тел. +79191889232

Email n.v.yakovenko71@gmail.com

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

Формат цитирования

Морковина С.С., Колесниченко Е.А., Яковенко Н.В., Шешницан С.С., Водолажский А.Н. Лесовосстановление и углеродный баланс лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России: вызовы и перспективы устойчивого развития // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 2. С. 107-124
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-9

Получена 27 февраля 2025 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2025 г.

Принята 28 апреля 2025 г.

Резюме

Целью статьи является анализ потенциала лесоклиматических проектов по поглощению углерода и обеспечению устойчивого развития экосистем в условиях Центральной лесостепи Европейской части РФ.

В работе использованы статистические данные по лесистости Белгородской, Воронежской, Курской, Липецкой и Тамбовской областей, динамике лесовосстановления, а также сведения о климатических и антропогенных угрозах. Применялись методы сравнительного анализа лесохозяйственных мероприятий, оценки экосистемных услуг и моделирования вклада лесных экосистем в секвестрацию выбросов углерода. Особое внимание уделено анализу эффективности искусственного лесовосстановления.

Установлено, что леса Центральной лесостепи характеризуются низкой лесистостью (8,6 %), высоким удельным весом искусственных насаждений (30–70 %) и ежегодным объемом лесовосстановления до 3 тыс. га. Установлено, что Тамбовская и Липецкая области демонстрируют наивысший углеродный потенциал за счёт более благоприятных условий для роста насаждений, суммарное поглощение углекислого газа за счёт лесовосстановления достигает 11,84–20,39 т/га CO₂-экв., а через 50 лет увеличится до 120,16–164,34 т/га CO₂-экв.

Основными угрозами остаются аридизация климата и лесные пожары, что снижает эффективность классических лесохозяйственных подходов. Старовозрастные деградирующие леса имеют минимальный вклад в депонирование углерода.

Реализация региональных лесоклиматических проектов с акцентом на модернизацию лесовосстановления и повышение устойчивости экосистем может значительно повысить уровень поглощения углерода и способствовать развитию охранных и производственных функций лесов.

Ключевые слова

Лесоклиматические проекты, поглощение углерода, устойчивое развитие экосистем, лесовосстановление.

Reforestation and carbon balance of forest ecosystems in the central forest-steppe of the European part of Russia: Challenges and prospects for sustainable development

Svetlana S. Morkovina, Elena A. Kolesnichenko, Nataliya V. Yakovenko,
Sergey S. Sheshnitsan and Alexey N. Vodolazhskiy

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 of the G.F. Morosov 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., Kolesnichenko E.A., Yakovenko N.V., Sheshnitsan S.S., Vodolazhskiy A.N. Reforestation and carbon balance of forest ecosystems in the central forest-steppe of the European part of Russia: Challenges and prospects for sustainable development. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(2):107-124. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-9

Received 27 February 2025

Revised 14 April 2025

Accepted 28 April 2025

Abstract

The aim of the article is to analyse the carbon sequestration potential of forest-climate projects and sustainable development of ecosystems in the conditions of the central forest-steppe of the European part of the Russian Federation.

Statistical data on the forest cover of the Belgorod, Voronezh, Kursk, Lipetsk and Tambov Regions, reforestation dynamics, as well as information on climatic and anthropogenic threats have been used in this work. Methods of comparative analysis of forest management measures, ecosystem services assessment and modelling of forest ecosystems contribution to carbon sequestration have been applied. Particular attention was paid to analysing the effectiveness of artificial reforestation. It was found that the forests of the central forest-steppe are characterised by low forest cover (8.6 %), a high proportion of artificial plantations (30–70 %) and an annual volume of reforestation of up to 3 thousand ha. It was found that the Tambov and Lipetsk Regions demonstrate the highest carbon potential due to more favourable conditions for the growth of plantations. The total carbon dioxide uptake due to reforestation reaches 11.84–20.39 t/ha CO₂-eq. and in 50 years will increase to 120.16–164.34 t/ha CO₂-eq. Climate aridisation and forest fires are the main threats that reduce the effectiveness of classical forest management approaches. Degrading old-growth forests make a minimal contribution to carbon sequestration.

The implementation of regional forest-climatic projects with a focus on modernising reforestation and improving ecosystem resilience can significantly increase carbon sequestration and contribute to the development of conservation and production functions of forests.

Key Words

Forest-climate projects, carbon sequestration, sustainable ecosystem development, reforestation.

ВВЕДЕНИЕ

Растущая обеспокоенность по поводу последствий изменения климата, сопряжённая с сокращением запасов углерода в лесных экосистемах и ослаблением их роли в глобальном углеродном балансе, а также наблюдаемое снижение биоразнообразия [1–3], привели к тому, что современные практики управления лесами оказались в центре внимания научного сообщества и природоохранных организаций.

Считается, что успешные лесовосстановительные мероприятия способны компенсировать значительную часть выбросов парниковых газов (FAO, 2020) [4].

По данным различных авторов, эффективность секвестрации зависит от типа лесорастительных условий, породного состава и возраста насаждений [5].

В частности, искусственные насаждения могут иметь меньшую устойчивость к климатическим и антропогенным стрессам, чем естественные леса, однако способны демонстрировать высокие темпы накопления биомассы при правильном подборе пород и проведении ухода [6]. Важную роль играет также правильное планирование пространственного размещения новых лесных массивов и восстановление деградированных участков [7].

Научные исследования показывают, что для повышения эффективности углеродной функции необходимо интегрировать лесовосстановительные меры с задачами предотвращения деградации лесных экосистем, минимизации рисков пожаров, аридизации, а также внедрения адаптивных хозяйственных практик [8–10].

В частности, зарубежный опыт акцентирует внимание на важности проектов по восстановлению лесов с многообразием видов, что повышает устойчивость к стрессам и увеличивает долговечность лесных биоценозов [11; 12].

Актуальные исследования подчеркивают необходимость интеграции данных о почвенном, надземном и подземном углероде для комплексной оценки лесных экосистем [13; 14].

В последние годы особое внимание уделяется роли региональных и проектных подходов, а также инновационной модернизации лесохозяйственных технологий [15–17]. Проведение лесоклиматических проектов позволяет направить усилия не только на увеличение площади лесов, но и на повышение их экосистемных функций, в том числе по поглощению углерода [18].

Центральная лесостепь Европейской части России характеризуется высокой степенью фрагментации лесных массивов, интенсификацией сельскохозяйственного освоения и интенсивным лесопользованием, что приводит к утрате естественных лесов, снижению биоразнообразия и нарушению процессов круговорота углерода.

Устойчивая регенерация лесных экосистем в данной природной зоне играет критическую роль не только в сохранении природного наследия и восстановлении продуктивности ландшафтов, но и в обеспечении баланса парниковых газов на национальном и глобальном уровнях. В то же время динамика углеродного баланса в лесостепи существенно зависит от структуры породного состава, возрастных классов, режима лесопользования и

климатических параметров, что требует комплексных исследований с применением современных моделей и методов мониторинга.

В контексте международных обязательств России по сокращению выбросов парниковых газов, вопросы лесовосстановления и повышения потенциала секвестрации углерода приобретают особую значимость для Центральной лесостепи – региона, выступающего как важный буфер между лесами тайги и агроландшафтами юга страны.

Целью данной статьи является анализ потенциала лесоклиматических проектов по поглощению углерода и обеспечению устойчивого развития экосистем в условиях Центральной лесостепи Европейской части РФ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступают лесоклиматические проекты, реализуемые в региональных лесных экосистемах Центральной лесостепи Европейской части Российской Федерации и нацеленные на сокращение выбросов парниковых газов. В качестве предмета исследования рассматривались лесные массивы Белгородской, Воронежской, Курской, Липецкой и Тамбовской областей на основе материалов государственного лесного фонда.

В качестве основных источников информации о состоянии, объемах фактически выполненных и планируемых лесохозяйственных мероприятий в исследуемых регионах использовались утверждённые лесные планы (разработанные в соответствии с типовой формой, установленной приказом Минприроды России от 20 декабря 2017 года № 692), а также формы государственного лесного реестра субъектов Российской Федерации.

Оценка изменений выбросов и увеличения поглощения парниковых газов в результате реализации лесохозяйственных мероприятий и лесоклиматических проектов осуществлялась на основании данных государственного учёта лесного фонда, государственного учёта земель и официальной статистической отчётности по лесному хозяйству.

Для количественной характеристики поглощающей способности различных древесных пород использовались сведения о текущем приросте фитомассы действующих насаждений (в т/га в год), систематизированные в сводных таблицах биологической продуктивности нормальных (полных) древостоев, характерных для лесов Северной Евразии видов: сосны, ели, пихты, лиственницы, кедра сибирского, дуба (посевного и порослевого происхождения), бука, ясеня обыкновенного, граба, акации белой, берёзы, осины, липы, ольхи серой, ольхи чёрной, ветлы (ивы белой), клёна. Для обеспечения корректной сопоставимости данных по секвестрации парниковых газов производился отбор однородных статистических групп по классам бонитетов I–III в возрасте насаждений до 40 лет

Поглощение парниковых газов в базовом сценарии в т CO₂ в год рассчитывалось по формуле (1) следующим образом:

$$\Delta C_{\text{базовый}} = \Delta C_{\text{биомасса}} + \Delta C_{\text{МОВ}} + \Delta C_{\text{ПОВ}} \quad (1)$$

где ΔC – суммарное нетто-поглощение территории проекта в сценарии реализации базовой линии, т CO₂;

$\Delta C_{\text{биомасса}}$ – изменение в запасах углерода в пуле биомассы (надземной и подземной) в базовом сценарии, т CO_2 ;

$\Delta C_{\text{МОВ}}$ – изменение в запасах углерода в пуле мертвой древесины, т CO_2 ;

$\Delta C_{\text{ПОВ}}$ – изменение в запасах углерода в пуле органического вещества почвы, т CO_2 .

Общее прогнозное значение изменения содержания углерода за период реализации проекта было определено по формуле (2):

$$\Delta C_{\text{проектный}} = \Delta C_{\text{биомасса}} + \Delta C_{\text{МОВ}} + \Delta C_{\text{ПОВ}} \quad (2)$$

где ΔC – суммарное изменение в запасах углерода после начала проектной деятельности, т C год^{-1} ;

$\Delta C_{\text{биомасса}}$ – изменение в запасах углерода в пуле биомассы (надземной и подземной), т C год^{-1} ;

$\Delta C_{\text{МОВ}}$ – изменение в запасах углерода в пуле валежной древесины, т C год^{-1} ;

$\Delta C_{\text{ПОВ}}$ – изменение в запасах углерода в пуле почвы, т C год^{-1} .

Итоговая проектная линия была определена как разница между проектным и базовым сценариями по формуле (3):

$$\Delta C_{\text{итог}} = \Delta C_{\text{проектный}} - \Delta C_{\text{базовый}} \quad (3)$$

Данные по текущему приросту фитомассы наличного насаждения пересчитывались на углерод фитомассы по формуле (1), а затем из единиц углерода в CO_2 по формуле (2) в соответствии с Методическими

указаниями по количественному определению объёмов поглощения парниковых газов [19].

В исследовании базовый уровень углерода определялся как количество углерода, аккумулированного в результате роста искусственно созданных насаждений сосны обыкновенной, смешанных сосново-берёзовых насаждений или чистых дубовых насаждений в зависимости от типов лесорастительных условий. Этот базовый сценарий является наиболее вероятным в условиях региона исследования, где лесное законодательство требует от лесопользователей проводить лесовосстановление на территориях, пострадавших от лесных пожаров или на вырубках.

Для прогнозной оценки потенциала секвестрации углерода в лесных экосистемах была использована модель углеродного баланса CO2FIX версии 3.2, которая позволяет количественно оценивать динамику потоков углерода между древесной, подстилочной и почвенной составляющими, а также учитывать влияние различных лесохозяйственных мероприятий и сценариев управления лесами на процессы накопления и выброса углерода [20–23]. В настоящем исследовании акцент был сделан на использовании модулей биомассы и почвы модели CO2FIX, в то время как дополнительные модули — продукция, биоэнергетика, экономическая оценка и учёт углерода — не задействовались. Параметризация модели осуществлялась на основе данных, собранных из различных источников, включая государственную статистическую отчётность, материалы таксационных обследований и опубликованные научные работы [24–26] (таблица 1).

Таблица 1. Параметры для оценки динамики лесных насаждений

Table 1. Parameters for assessing the dynamics of forest plantations

Параметры Parameters	Сосна Pine	Берёза Birch	Дуб Oak	Клен Maple	Тополь Poplar	Вяз Elm	Карагана Caragana
Плотность древесины (т/м ³) Wood density (t/m ³)	0,42	0,51	0,58	0,52	0,46	0,55	0,46
Содержание углерода в стволовой древесине (тС/т сух. в-ва) Carbon content of stem wood (tC/t dry matter)	0,51	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Содержание углерода в листьях (тС/т сух. в-ва) Carbon content of leaves (tC/t dry matter)	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,45
Содержание углерода в ветвях (тС/т сух. в-ва) Carbon content of branches (tC/t dry matter)	0,51	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Содержание углерода в корнях (тС/т сух. в-ва) Carbon content of roots (tC/t dry matter)	0,51	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Скорость обновления листьев (год ⁻¹) Leaf renewal rate (year ⁻¹)	0,18	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Скорость обновления ветвей (год ⁻¹) Branch renewal rate (year ⁻¹)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Скорость обновления корней (год ⁻¹) Root renewal rate (year ⁻¹)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Исходными данными для оценки количественных характеристик древостоев послужили нормативно-справочные материалы, подготовленные группой специалистов под руководством А.З. Швиденко [25] и утверждённые Министерством природных ресурсов Российской Федерации в 2006 году. Данные материалы предоставляют обширную базу информации о биологической продуктивности различных древесных пород в зависимости от потенциальной продуктивности место произрастания (бонитет), что позволяет корректно осуществлять межрегиональное и межпородное сопоставление.

Для моделирования текущего годовичного прироста древесины использовались значения, приведённые в таблицах биологической продуктивности (ТБП) для I–III классов бонитета, что охватывает диапазон наиболее распространённых условий формирования лесных экосистем Центральной лесостепи. С целью повышения точности расчетов величина прироста по каждому субъекту Федерации и каждому типовому насаждению определялась с интерполяцией между смежными классами бонитета, исходя из средневзвешенной бонитетной оценки и типичного породного состава лесов региона.

Для смешанных древостоев расчёт осуществлялся по принципу взвешенного среднего: прирост для каждой древесной породы определялся в соответствии с её удельной долей в структуре насаждения, благодаря чему интегральный показатель приростной динамики отражал реальный видовой состав и продуктивность смешанных лесов. Такой подход обеспечивает репрезентативность получаемых данных для ландшафтных и региональных уровней оценки.

Для углублённого анализа компонентного строения биомассы были отдельно рассчитаны относительные приросты основных фракций (ствол, ветви, листья, корни):

- Для сосны, берёзы, дуба и клёна – по показателям ТБП, приведённым для соответствующих пород и условий лесостепи, что позволило максимально учесть видовые и экологические особенности.

- Характеристики прироста тополя брались из специализированной разработки [25] при этом относительные значения прироста вегетативных органов (ветви, листья, корни) вычислялись с опорой на соответствующие параметры осины, учитывая близость морфолого-биологических признаков.

- Для вяза использовались количественные данные годовичного прироста из работы [25], а относительные показатели распределения биомассы между надземными и подземными компонентами оценивались по аналогичным данным.

- В отношении караганы расчёты осуществлялись комплексно на основании всего массива экспериментальных данных работы [26], позволяющих раздельно учитывать долю фитомассы, приходящуюся на каждую морфологическую фракцию.

Комплексный подход к использованию нормативно-справочных и специализированных источников, сопряжённый с поэтапной разбивкой структуры прироста биомассы, позволил получить

детализированные и валидные оценки динамики продукционного процесса и углеродного баланса в различных типах лесных насаждений лесостепи Центральной России.

Для оценки динамики органического углерода в почве применялась модель Yasso [20] — современная процессно-ориентированная динамическая модель круговорота углерода, широко используемая в исследованиях лесных экосистем. Модель Yasso была адаптирована как для хвойных, так и для лиственных лесов, что позволило комплексно учесть специфику литтерообразования различных типов фитоценозов. В рамках данной модели опад подразделялся на несколько функциональных категорий: недревесный опад (листья и мелкие корни), мелкий древесный опад (ветви и крупные корни), а также крупный древесный опад (стволы и пни). Последний учитывался в совокупности в расчётах общего поступления древесного детрита. Для корневого опада применялась дополнительная классификация в соответствии с пропорциями между ветвями и листьями, что обеспечивало более точное отражение состава поступающего органического материала. Ключевой особенностью модели Yasso является детализированное описание процессов фракционирования и разложения органического вещества, динамика которых зависит от температуры среды и доступности почвенной влаги. Такие климатические параметры, как средняя температура воздуха и уровни влажности, встраиваются непосредственно в расчетные блоки модели, что позволяет достоверно учитывать влияние текущих и прогнозируемых климатических условий на темпы распада органического материала и аккумуляцию углерода в почвенном профиле.

Использование данной модели обеспечило возможность проведения количественных оценок общего запаса органического углерода в почве, а также комплексного анализа процессов, определяющих долгосрочную устойчивость углеродных резервуаров в лесных экосистемах на фоне изменяющихся климатических факторов. Среднемесячные температуры и продолжительность вегетационного периода были указаны в соответствии с таблицей 2.

Выбросы и поглощение, связанные с плановыми рубками ухода (осветлением и прочисткой в 8- и 13-летнем возрасте с интенсивностью 15 %, а также прореживанием в 35 лет с интенсивностью 15 %), учитывались во всех сценариях, за исключением прореживаний в лиственных насаждениях. В базовом сценарии учитывали приживаемость и сохранность лесных культур сосны в Центральной лесостепи по имеющимся данным [18]. Пересчёт из единиц углерода в единицы CO₂ проводится с учётом коэффициента 44/12.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состояние лесного хозяйства Центральной лесостепи Европейской части Российской Федерации определяется рядом ключевых характеристик, отражающих структурно-функциональные особенности, ресурсный потенциал и современные тенденции развития региональных лесных экосистем.

Таблица 2. Среднемесячные температуры воздуха, осадки и длительность вегетационного сезона*
Table 2. Mean monthly air temperatures, precipitation and duration of the growing season*

Месяц года Month of the year	Среднемесячная температура воздуха, °C Average monthly air temperature, °C						Вегетационный сезон Growing season
	Орел Orel	Курск Kursk	Валуйки Valuiki	Воронеж Voronezh	Елец Yelets	Тамбов Tambov	
Январь / January	-6.1	-5.9	-7.8	-6,0	-6.6	-7.5	Нет / No
Февраль / February	-5.8	-5.5	-7.6	-5,5	-6.4	-7.3	Нет / No
Март / March	-0.8	-0.3	-2.8	-0,3	-1.2	-1.9	Нет / No
Апрель / April	7.6	8.2	3.9	+8,8	7.8	7.7	Да / Yes
Май / May	14.3	14.8	9.3	+15,5	14.9	15.0	Да / Yes
Июнь / June	17.9	18.4	13.3	+19,1	18.4	18.5	Да / Yes
Июль / July	19.8	20.3	15.2	+21,3	20.5	20.7	Да / Yes
Август / August	18.5	19.4	13.5	+20,2	19.0	19.1	Да / Yes
Сентябрь / September	12.7	13.5	8.4	+13,3	13.2	13.2	Да / Yes
Октябрь / October	6.4	6.9	3.5	+7,5	6.7	6.5	Нет / No
Ноябрь / November	0.0	0.1	-1.5	+0,5	-0.3	-0.7	Нет / No
Декабрь / December	-4.3	-4.3	-5.9	-4,1	-4.8	-5.6	Нет / No
За сезон, мм During the season, mm	353	349	312	367	313	279	–

Примечание: * – по данным метеостанций в субъектах Центральной лесостепи
 Note: * – according to meteorological stations in the regions of the central forest-steppe

Во-первых, практически все территории лесного фонда Центральной лесостепи Европейской части Российской Федерации обладают потенциалом включения в хозяйственный оборот, за исключением участков, регулируемых в соответствии с установленными ограничениями лесного законодательства в части эксплуатации защитных лесов. Совокупная площадь лесных ресурсов региона, по состоянию на 2023 год, составляет 1,554 млн га.

Во-вторых, преобладающее большинство лесных массивов в пределах Центральной лесостепи относится к категории защитных лесов, наделённых приоритетной экологической функцией, включающей сохранение биоразнообразия и формирование высококачественных экосистемных услуг.

В-третьих, породный спектр лесов региона характеризуется явным доминированием мягколиственных пород: их площадь приблизительно в два раза превышает участки, занятые хвойными насаждениями, и в четыре раза — территории твердолиственных лесов.

В-четвёртых, общий запас древесины в региональных лесах оценивается в 271,8 млн м³, однако объём освоения расчётной лесосеки реализуется лишь на 28 %, что указывает на значительный резерв неиспользованного экономического потенциала.

В-пятых, площадь лесных пожаров на территории Центральной лесостепи составляет 62 га, тогда как годовой объём лесовосстановления и лесоразведения достигает 3,1 тыс. га.

Анализ динамики развития региональных экосистем Центральной лесостепи позволяет выделить несколько устойчивых тенденций:

- увеличение общей площади лесных земель, в том числе защитных лесов, на 4 %, что способствует стабилизации уровня лесистости региона;
- изменение породного состава насаждений, обусловленное сокращением площадей твердолиственных насаждений одновременно с расширением площадей мягколиственных и хвойных пород;

– незначительный рост продуктивности лесов, обеспечивающий некоторое увеличение запасов древесины;

– снижение фактического использования лесных ресурсов, а также уменьшение объёмов освоения расчётной лесосеки, что влечёт за собой уменьшение инвестиционной привлекательности лесоклиматических проектов.

Совокупность приведённых факторов свидетельствует о возрастании климатических рисков в экосистемах Центральной лесостепи Европейской части России, связанных с изменениями температурного режима, ростом частоты и масштабов природных пожаров, а также повышением вероятности распространения вредных организмов.

Характеристики лесного фонда исследуемых региональных экосистем по состоянию на 01.01.2023 г. представлены в таблице 3.

Для прогнозирования поглощения выбросов парниковых газов в результате реализации мероприятий по лесовосстановлению и лесоразведению сначала спрогнозированы объёмы площадей, создаваемых и сохраняющихся лесных культур, так как это основной способ лесовосстановления на рассматриваемых территориях. Разработано два варианта прогнозов (реалистичный и оптимистичный) динамики площадей искусственного лесовосстановления. Прогнозы основываются на экстраполяции фактических объёмов лесовосстановления и лесоразведения за последние 5 лет на следующие пять лет, с учетом плановых объёмов лесовосстановления, приведенных в Лесном плане субъекта. Принцип формирования прогнозных значений покажем на примере Белгородской области. реалистичный прогноз основан на динамике фактических площадей искусственного лесовосстановления с их экстраполяцией на следующие 5 лет по уравнению (4):

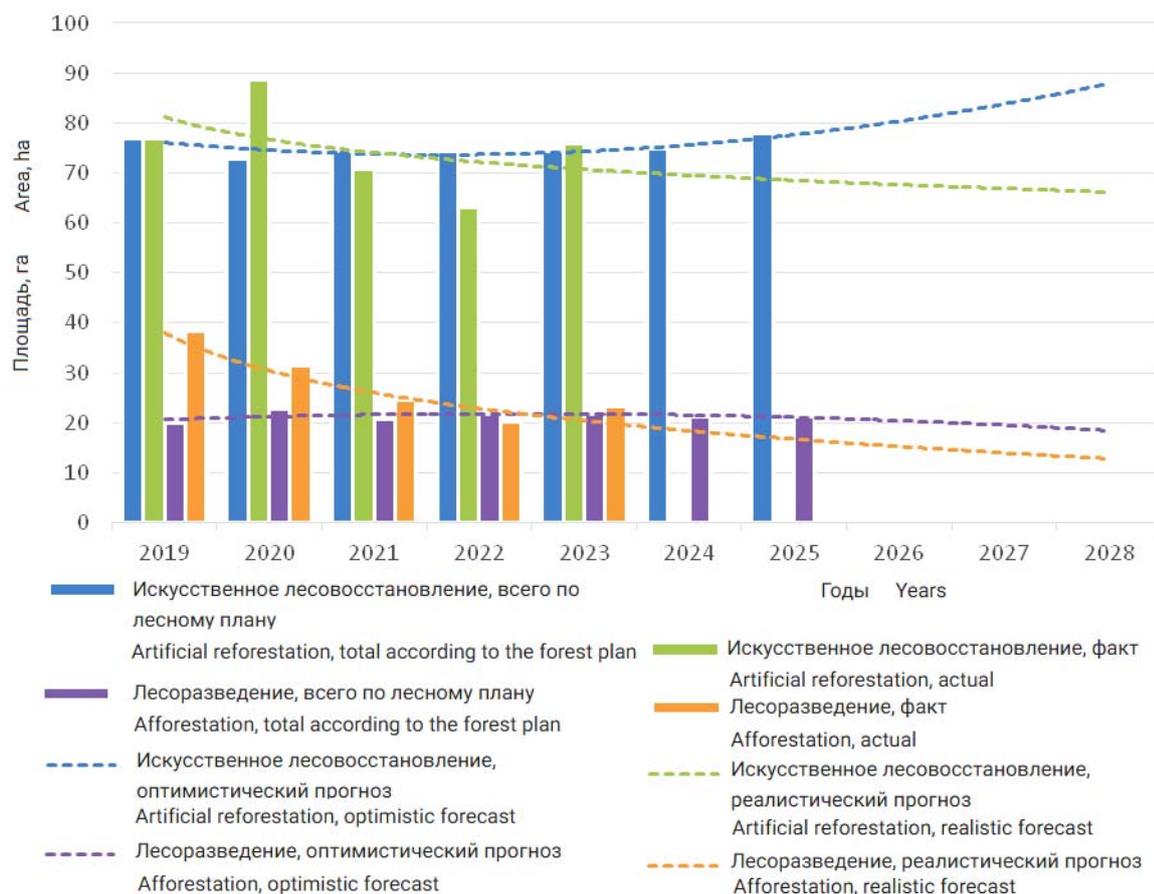
$$y = -6,529 \ln x + 81,23 \quad (4)$$

где y – прогнозируемая площадь искусственного лесовосстановления, га;

x – номера следующих лет в прогнозе (рис. 1).

Таблица 3. Характеристика лесного фонда субъектов Центральной лесостепи Русской равнины по состоянию на 01.01.2023**Table 3.** Characterisation of the forest fund of the regions of the central forest-steppe of the Russian Plain as of 01.01.2023

Наименование показателя Name of indicator	Белгородская область Belgorod Region	Воронежская область Voronezh Region	Курская область Kursk Region	Липецкая область Lipetsk Region	Тамбовская область Tambov Region	Орловская область Orel Region
Общая площадь лесов, га Total forest area, ha	230,8	475,9	236,8	180,4	374,8	173,1
Площадь лесных земель, га Forest land area, ha	223,1	381,4	224,2	169,6	349,1	102,2
Лесистость, % Forest cover, %	8,7	8,3	8,2	8,7	10,6	8,0
Площадь земель, покрытых лесной растительностью, тыс. га Area of land covered with forest vegetation, th.ha	219,8	349,9	219,8	165,2	342,3	100,4
Общий запас насаждений, млн м ³ Total stock of plantations, mln. m ³	47,14	61,84	40,55	33,13	65,92	21,56
Средний возраст, лет Average age, years	71	60	58	61	52	59
Бонитет Bonitet	2,3	2,3	2,5	1,5	1,6	2,0

**Рисунок 1.** Прогнозируемые объемы искусственного лесовосстановления и лесоразведения в Белгородской области
Figure 1. Projected areas of artificial reforestation and afforestation in the Belgorod region

Ввиду того, что действующий лесной план субъекта завершается в 2025 году, долгосрочное прогнозирование объемов лесовосстановления на период до 2028 года осуществлялось путём экстраполяции утверждённых проектных показателей на последующий

трёхлетний интервал. В основу расчёта легла предпосылка о сохранении темпов и объёмов лесовосстановительных мероприятий на уровне запланированных лесным планом на ближайшие годы,

что соответствует оптимистичному сценарию развития лесного сектора региона.

Экстраполяция осуществлялась с использованием формализованного подхода, при котором площади лесовосстановления на 2026–2028 годы определялись по уравнению (5), учитывающему среднегодовые показатели реализации лесохозяйственных мероприятий в базовый период планирования. Данный метод позволяет не только обеспечить преемственность прогноза, но и количественно оценить потенциал устойчивого развития лесных экосистем в условиях возможного продолжения действующей политики в лесном секторе. Такой подход обеспечивает обоснованность получаемых результатов и позволяет использовать их при стратегическом планировании природоохранных и лесохозяйственных мероприятий на региональном уровне.

Формула расчёта отражает непосредственное продолжение динамики освоения лесовосстановительных площадей, зафиксированной в официальной проектной документации, и позволяет объективно оценить потенциальный вклад данных процессов в общее повышение лесистости и углеродного потенциала территории на обозримую перспективу.

$$y = 0,3512x^2 - 2,5488x + 78,271 \quad (5)$$

где y – прогнозируемая площадь искусственного лесовосстановления, га;

x – номера следующих лет в прогнозе.

Кроме лесовосстановления в Белгородской области имеются значительные объёмы площадей пригодных для лесоразведения.

Их прогнозные значения для оптимистичного и реалистичного прогнозов рассчитываются по следующим уравнениям соответственно (6, 7):

$$y = -0,1071x^2 + 0,9357x + 19,786 \quad (6)$$

$$y = -10,95 \ln x + 38,027 \quad (7)$$

где y – прогнозируемая площадь лесоразведения, га;

x – номера следующих лет в прогнозе.

В связи с отсутствием лесоразведения в Воронежской области и крайне низкими объёмами искусственного лесовосстановления на протяжении последних трёх лет, в рамках оптимистичного прогноза на последующий период предполагается сохранение сложившейся стагнации. Учитывая ограниченность инициирования новых лесных культур и невысокую интенсивность работ по воспроизводству лесных ресурсов, ожидается, что площади восстанавливаемых лесов в регионе останутся на прежнем, минимальном уровне либо незначительно изменятся.

В Курской области на протяжении последних четырёх лет фиксируется устойчивая тенденция к сокращению площадей ежегодного лесовосстановления, что, несмотря на отдельный эпизодический рост подобных работ в 2020 году, отражает общие структурные проблемы лесного сектора области – недостаточный уровень инвестиций, ограниченные технические и кадровые ресурсы, а также неоптимальные природно-климатические условия для успешного воспроизводства лесов. Соответственно, среднесрочный оптимистичный прогноз по Курской области также основан на допущении сохранения текущей отрицательной динамики либо её стабилизации на фоне реализации существующих лесохозяйственных программ.

Ситуация в Липецкой области характеризуется несколько иными тенденциями. В течение последних пяти лет фактические объёмы лесовосстановительных работ стабильно превышали плановые показатели, что свидетельствует о более высоком административном и организационном потенциале регионального лесного хозяйства. Тем не менее, даже при превышении целевых значений наблюдается общая тенденция к снижению ежегодных площадей лесовосстановления. Это может быть обусловлено исчерпанием наиболее доступных для восстановления земель, изменением приоритетов управления земельными и лесными ресурсами, а также возможными ограничениями финансового и ресурсного характера. Поэтому, даже при условии сохранения эффективной региональной политики в сфере лесовосстановления, в ближайшие годы целесообразно ожидать либо дальнейшей стабилизации, либо несущественного снижения объёмов искусственного и естественного восстановления лесов.

В целом, несмотря на отдельные позитивные примеры превышения плановых показателей или кратковременных всплесков активности, динамика лесовосстановления в данных субъектах Центральной лесостепи демонстрирует сдержанный или негативный тренд, что требует разработки дополнительных стимулирующих мер и комплексной адаптации лесохозяйственной политики к региональным вызовам и ограничениям (8):

$$y = 398,64e^{-0,076x} \quad (8)$$

где y – прогнозируемая площадь искусственного лесовосстановления по пессимистичному сценарию, га;

x – номера следующих лет в прогнозе.

При оптимистичном прогнозе следующие пять лет лесокультурные площади не снизятся до плановых значений, принятых в качестве реалистичных, и определяются по следующему уравнению (9):

$$y = -88,9 \ln x + 405,46 \quad (9)$$

где y – прогнозируемая площадь искусственного лесовосстановления, га;

x – номера следующих лет в прогнозе.

Лесным планом субъекта лесоразведение не предусмотрено, и в прогнозе также отсутствует.

В Орловской области значительная доля лесовосстановительных мероприятий — около 16 % — реализуется по комбинированной технологии, включающей элементы как искусственного, так и естественного восстановления лесов. Такой интегрированный подход позволяет более эффективно использовать потенциал территории для воспроизводства лесных ресурсов, а также повышает устойчивость создаваемых биоценозов за счёт сочетания разновозрастных и разнопородных групп деревьев.

В расчётах прогноза динамики лесовосстановления эта доля комбинированных посадок была полностью учтена и включена в итоговые оценки, что обеспечивает более полное отражение лесохозяйственных процессов региона. Актуальный анализ динамики показывает, что в последние годы в Орловской области наблюдается устойчивая положительная тенденция: фактические объёмы лесовосстановления не только стабильно превышают плановые показатели, заложенные в территориальных

программах, но и демонстрируют поступательный рост. Это свидетельствует о наличии в регионе благоприятных организационно-экономических и природных условий для наращивания масштабов и эффективности восстановления лесов.

В рамках оптимистичного сценария прогнозирования предполагается сохранение сложившейся тенденции опережающего выполнения плановых заданий по лесовосстановлению. Такой подход отражает реалистичные перспективы управляемого роста объемов посадок при условии сохранения текущей политики, ресурсной поддержки и положительного опыта реализации лесопосадочных проектов. Количественная динамика данного процесса формализуется следующим уравнением, аккумулирующим не только показатели традиционного искусственного и естественного лесовосстановления, но и вклад комбинированных технологий. Таким образом, Орловская область может рассматриваться как пример эффективного сочетания традиционных и инновационных методов восстановления лесов, способствующих не только сохранению, но и расширению лесного фонда региона в средне- и долгосрочной перспективе (10):

$$y = 12,702 \ln x + 58,884 \quad (10)$$

где y – прогнозируемая площадь искусственного и комбинированного лесовосстановления, га;
 x – номера следующих лет в прогнозе

В Тамбовской области для оценки перспектив развития лесного комплекса были сформированы три сценария прогноза лесовосстановления, отражающие различные варианты динамики данного процесса в среднесрочной перспективе.

Анализ статистических данных за последние годы показывает, что в период с 2019 по 2022 год наблюдался устойчивый положительный тренд: фактические площади лесовосстановления систематически превышали значения, определённые официальными программами и лесным планом региона. Это свидетельствовало о высокой активности природоохранных структур и надлежащем уровне организации работ в сфере восстановления лесных экосистем. Однако в 2023 году произошёл резкий перелом: объем выполненных лесовосстановительных мероприятий снизился на 22 % относительно плановых ориентиров, предусмотренных документами стратегического планирования.

Указанный прецедент рассматривается как значимый индикатор возможных рисков и внешних ограничений – как природно-климатических (неблагоприятные погодные условия, засухи), так и экономико-организационных (сокращение финансирования, нехватка посадочного материала или персонала), – способных оказывать существенное влияние на способность региона обеспечивать стабильное воспроизводство и расширение лесного фонда.

На этой основе в сценарном анализе был сформулирован пессимистичный вариант развития, при котором ежегодные объемы лесовосстановления прогнозируются на уровне, существенно уступающем как плановым проектным значениям, так и предыдущим годам с их устойчивым ростом. Данный прогноз отражает возможность закрепления негативной тенденции, что может привести к

сдерживанию темпов восстановления лесных экосистем, снижению способности региона к углеродной секвестрации, а также ослаблению экологических и социально-экономических функций лесов.

Разработка пессимистичного сценария позволяет наглядно продемонстрировать потенциальные потери и вызовы при реализации лесохозяйственной политики в условиях неблагоприятных обстоятельств, что особенно важно для принятия обоснованных управленческих и профилактических решений, как на региональном, так и на федеральном уровнях.

Уравнение, описывающее динамику лесовосстановительных площадей в рамках пессимистичного сценария развития, принимает следующий вид (11):

$$y = -0,031 \ln x + 939,96 \quad (11)$$

где y – прогнозируемая площадь искусственного лесовосстановления (пессимистичный прогноз), га;
 x – номера следующих лет в прогнозе.

Данная формализованная модель позволяет количественно оценить ожидаемое сокращение объемов лесовосстановления при сохранении негативных тенденций и акцентирует внимание на необходимости принятия мер по стабилизации и поддержке отрасли в условиях неблагоприятных экономических и природных факторов

Основываясь на анализе периода, для которого характерен устойчивый рост объемов лесовосстановления, был построен оптимистичный прогноз, предполагающий сохранение среднегодового темпа превышения плановых показателей на протяжении последующих пяти лет. Такой сценарий отражает потенциал лесохозяйственного комплекса региона при благоприятных социально-экономических и природно-климатических условиях, а также эффективной реализации существующих мер государственной поддержки. В рамках данного сценария проведён расчёт динамики изменения фонда искусственного лесовосстановления для всех исследованных областей Центральной лесостепи Европейской части России.

При построении оптимистического прогноза учитывались стартовые плановые объемы лесовосстановления, а также среднегодовой ввод обезлесенных площадей (вырубок) в состав лесокультурного фонда, что позволило смоделировать поступление новых площадей под восстановление. Важным допущением данного сценария выступает условие полной сохранности создаваемых лесных культур: прогноз исходит из максимальной успешности приживаемости и отсутствия списаний в течение всего расчетного периода.

В отличие от оптимистического, реалистичный прогноз базируется на предположении о среднерегionalном темпе списания лесных культур по причинам их неудовлетворительного приживания или гибели. Для каждой области был принят индивидуальный процент списания, отражающий специфику местных лесорастительных условий и эффективности восстановительных работ: для Белгородской области – 7,2 %, Воронежской – 40 %, Курской – 7,7 %, Липецкой – 12,1 %, Орловской – 33,1 %, Тамбовской – 7,7 %. Такой подход обеспечивает более

взвешенную и реалистичную оценку перспектив формирования покрытой лесом площади.

Пессимистичный прогноз, в свою очередь, предполагает не только сохранение средних уровней списания создаваемых лесных культур, но и снижение общих темпов лесовосстановления по сравнению с предшествующим периодом, что отражает возможные неблагоприятные стратегические, финансовые или климатические вызовы.

Сформированные прогнозные оценки площадей лесовосстановления до 2028 года послужили исходными данными для расчёта потенциального дополнительного депонирования парниковых газов лесными насаждениями. При условии благоприятного развития событий и успешного перевода лесных культур в покрытую лесом площадь, эти значения могут стать ключевым вкладом в региональный и национальный углеродный баланс, способствуя выполнению климатических обязательств страны и повышению экологической устойчивости территорий Центральной лесостепи.

Для комплексной оценки вклада лесных экосистем регионов Центральной лесостепи в климатическую повестку крайне важно не только моделировать динамику площадей лесовосстановления, но и количественно анализировать связанные с этим процессы выброса и секвестрации парниковых газов. Такой анализ позволяет установить, в какой мере реализация различных сценариев восстановления лесов способна сформировать дополнительный вклад в снижении углеродного следа региона и повысить долгосрочную экологическую устойчивость лесных ландшафтов.

В рамках проведённого исследования была осуществлена оценка баланса парниковых газов, обусловленного осуществлением лесохозяйственных мероприятий, с учетом, как антропогенных выбросов,

так и поглощения углерода за счёт роста и развития новых древесных насаждений и связанных с ними биогеохимических процессов. Расчёты, выполненные для различных сценариев, показывают, что динамика изменения запасов органического углерода тесно коррелирует с изменением объемов поглощения и выброса парниковых газов на региональном уровне.

Поскольку все изучаемые регионы демонстрируют схожие закономерности в изменениях углеродных пулов и в величинах связанного с этим потока парниковых газов при реализации аналогичных лесохозяйственных стратегий, целесообразным представляется рассмотреть результаты детального моделирования на примере одного субъекта — Белгородской области, как региона, отражающего типичные для Центральной лесостепи лесорастительные условия и темпы ведения хозяйства. Этот подход позволит наглядно проанализировать все элементы углеродного цикла в лесных экосистемах, оценить динамику эмиссии и секвестрации CO₂ при различных вариантах лесовосстановления, а также экстраполировать полученные выводы на другие территории с аналогичными климатическими и почвенно-экологическими условиями.

В дальнейшем представлен сравнительный анализ результатов моделирования для базового сценария лесохозяйственных мероприятий в разрезе основных типов лесорастительных условий, что позволит выявить основные факторы и механизмы, определяющие устойчивость лесных экосистем к изменению климата и их роль в формировании регионального углеродного баланса.

На рисунке 2 представлена динамика выбросов и поглощения парниковых газов в ходе создания и роста сосновых монокультурных насаждений (далее — 10С) в бедных лесорастительных условиях (далее — А₁ и А₂).

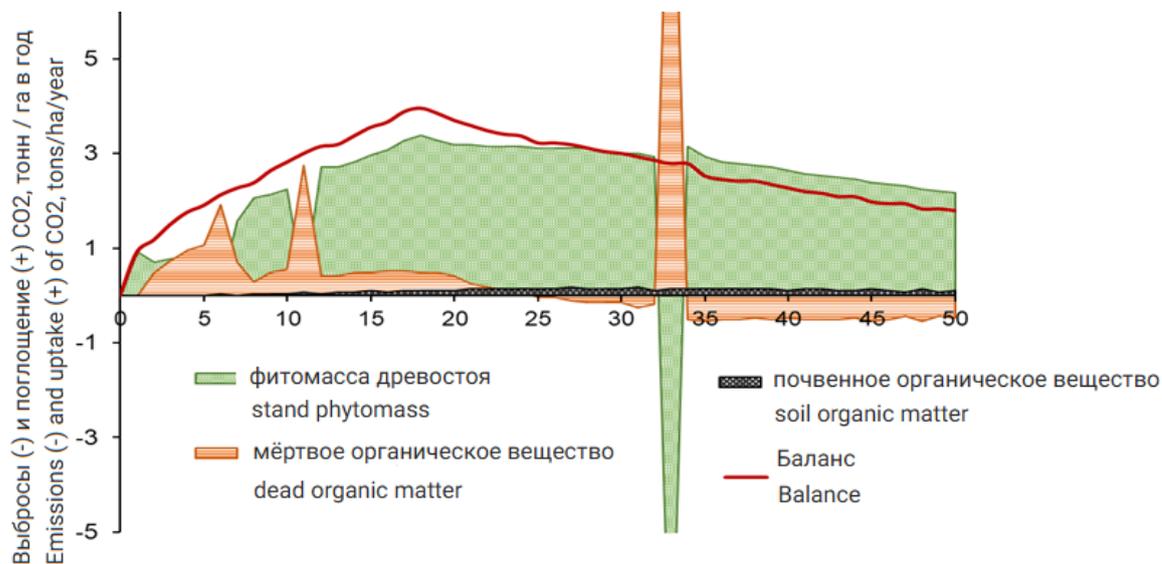


Рисунок 2. Ежегодные выбросы и поглощения парниковых газов по пулам углерода и их баланс в условиях А₁ и А₂
Figure 2. Annual greenhouse gas emissions and removals by carbon pool and their balance under A₁ and A₂ conditions

Отметим, что лесохозяйственные мероприятия по лесовосстановлению занимают в среднем период до 10 лет (до перевода в покрытую лесом площадь), в течение которого осуществляется создание условий для активного формирования фитомассы древостоя. Этот этап характеризуется интенсивным поглощением

углекислого газа, что обусловлено ростом лесных культур. К 20–25 годам достигается максимум накопления углерода в фитомассе, составляющий около 3 т/га CO₂. При этом необходимо учитывать, что проведение плановых рубок ухода, включая осветление и прочистку в 8 и 13 лет с интенсивностью 15 %,

оказывает умеренное воздействие на баланс углерода. Эти мероприятия временно снижают углеродные запасы за счёт удаления части деревьев, но одновременно способствуют улучшению условий освещённости и аэрации, что стимулирует рост оставшихся деревьев. В возрасте 35 лет, при выполнении прореживания с аналогичной интенсивностью, наблюдается кратковременное снижение накопленного углерода, связанное с изъятием древесины, однако это компенсируется последующим увеличением продуктивности древостоя. Динамика мёртвого органического вещества отличается значительной вариабельностью. Особенно значительные выбросы фиксируются после прореживания в возрасте 35 лет, что связано с разложением увеличенного объёма древесных остатков. Эти результаты свидетельствуют о необходимости разработки и внедрения дополнительных мер,

направленных на минимизацию выбросов. Таким образом, общий углеродный баланс в базовом сценарии демонстрирует положительную динамику на протяжении первых 30 лет, что обусловлено активным накоплением углерода в фитомассе. После проведения рубок ухода наблюдается временное снижение баланса, однако оно компенсируется за счёт стабильного накопления углерода в почве и дальнейшего роста древостоя.

Фитомасса древостоя в свежих субориях (далее – В₂) со смешанным составом сосново-берёзовых насаждений (далее – 5С5Б) демонстрирует значительно более высокие темпы накопления углерода на начальных стадиях лесовосстановления по сравнению с А₁ и А₂. На рисунке 3 видно, что в первые 10 лет наблюдается интенсивное поглощение углекислого газа, что связано с активным ростом.

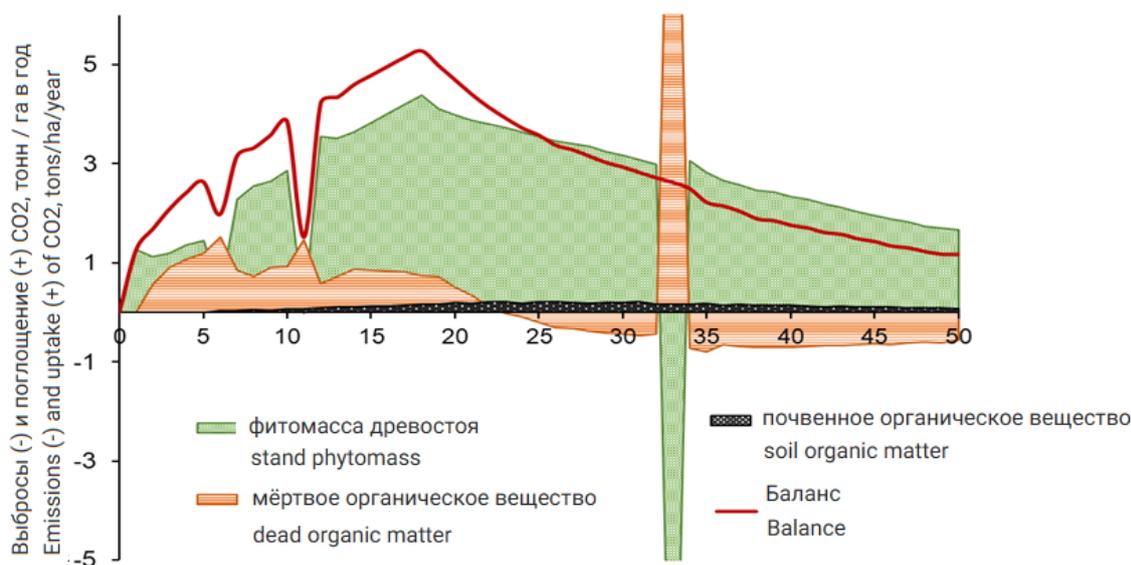


Рисунок 3. Ежегодные выбросы и поглощения парниковых газов по пулам углерода и их баланс в условиях В₂
Figure 3. Annual greenhouse gas emissions and removals by carbon pool and their balance under B₂ conditions

Максимум накопления углерода в фитомассе достигается к возрасту 20–25 лет и составляет около 3,5–4 т CO₂/га, что превышает аналогичные показатели для А₁ и А₂. 5С5Б обеспечивает оптимальное использование ресурсов благодаря сочетанию светолюбивой сосны и менее требовательной к освещению берёзы. После 30 лет темпы накопления углерода замедляются, что связано с возрастным снижением прироста биомассы, однако общий объём запасённого углерода остаётся выше, чем в А₁ и А₂. Для пула мертвого органического вещества в условиях В₂ характерны более выраженные пики выбросов углерода, особенно после рубок ухода. В первые 10 лет накопление мёртвого органического вещества происходит за счёт опада и естественного отпада (гибели) лесных культур. Рубки ухода, проведённые в 8 и 13 лет, вызывают умеренные выбросы углекислого газа из-за разложения древесных остатков, однако эти выбросы компенсируются ускоренным ростом оставшихся деревьев. В возрасте 35 лет прореживание приводит к значительному всплеску выбросов, что связано с поступлением большого объёма органических остатков в почву. В отличие от А₁ и А₂, где объём остаточного материала меньше из-за более низкой продуктивности насаждений, в условиях В₂ выбросы оказывают более

заметное влияние на общий углеродный баланс. В целом, результирующий углеродный баланс в В₂ на протяжении первых 30 лет демонстрирует более высокие значения по сравнению с А₁ и А₂.

Таким образом, более благоприятные лесорастительные условия В₂ обеспечивают интенсивный рост насаждений и более эффективное накопление углерода. В₂ позволяет оптимально использовать доступные ресурсы, что улучшает общий углеродный баланс. Однако рубки ухода в этих условиях требуют особого внимания к управлению остаточными материалами, чтобы минимизировать выбросы и сохранить положительный эффект лесохозяйственных мероприятий.

Дубовые насаждения (далее – 10 Д) демонстрируют стабильное ежегодное поглощение углекислого газа в смешанной фитомассе (далее – С₂ и Д₂). В первые 10 лет темпы поглощения возрастают по мере увеличения роста древостоя, что соответствует начальным стадиям формирования насаждений. Максимальные значения ежегодного поглощения углекислого газа отмечаются в возрасте 20–30 лет и составляют около 3,5 т/га CO₂. Это значение превышает аналогичные показатели для других типов лесорастительных условий, таких как А₁ или В₂, за

счёт более благоприятных почвенных условий и высокой продуктивности. После 30 лет ежегодное поглощение постепенно снижается, что связано с возрастным

замедлением прироста биомассы, однако этот показатель остаётся стабильно высоким в сравнении с другими типами древостоев (рис. 4).

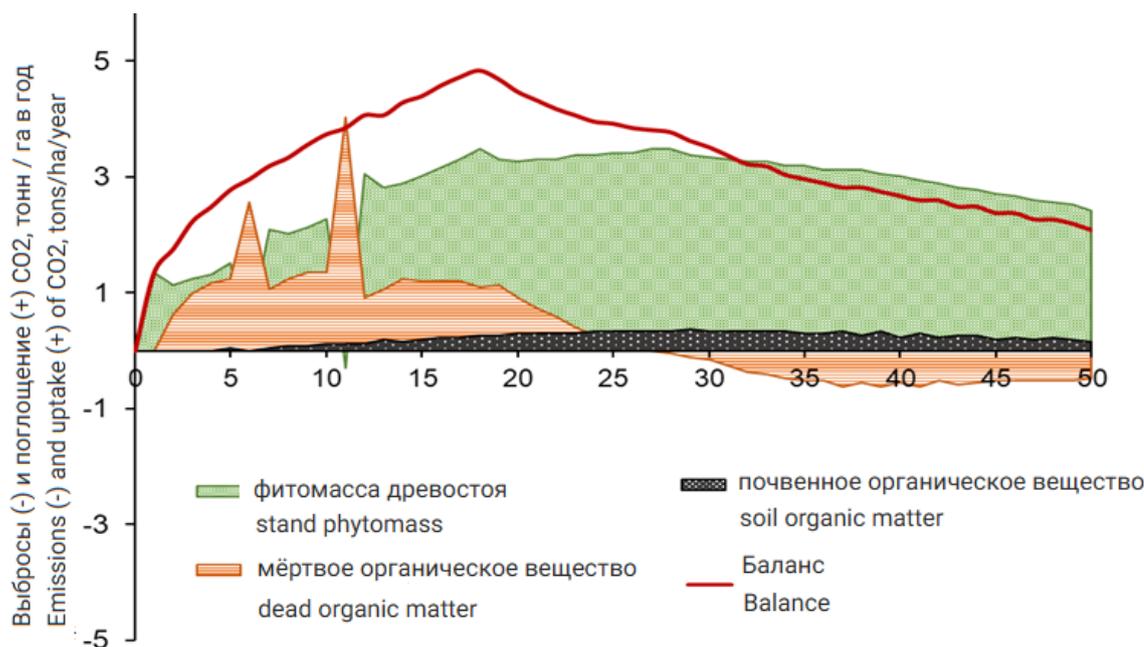


Рисунок 4. Ежегодные выбросы и поглощение парниковых газов по пулам углерода и их баланс в условиях C_2 и D_2
Figure 4. Annual greenhouse gas emissions and removals by carbon pool and their balance under C_2 and D_2 conditions

Отказ от проведения рубок ухода в течение первых 35 лет функционирования насаждений обеспечивает максимальный уровень секвестрации углерода, позволяя избежать потерь, которые неминуемо сопровождали бы удаление части деревьев и последующее разложение древесных остатков. За счёт сохранения полноты состава древостоя весь доступный объём фитомассы продолжает эффективно накапливать органический углерод.

Вклад мёртвого органического вещества в формирование углеродного баланса характеризуется умеренным уровнем эмиссии углекислого газа, особенно заметным на ранних этапах развития молодого леса. Наиболее выраженные пики выбросов приходятся на возраст 8–10 лет, что связано с естественным отпадом части ослабленных и затенённых деревьев, а также интенсивным разложением свежих органических остатков. После завершения данного этапа динамика эмиссии стабилизируется, и выбросы CO_2 из пула мёртвого органического вещества поддерживаются на относительно низком и устойчивом уровне.

В отсутствие рубок ухода на протяжении 35 лет дальнейшее поступление детрита в почву ограничено, что способствует минимизации дополнительных выбросов углекислого газа. Подобная стратегия позволяет поддерживать максимально положительное сальдо углеродного баланса в экосистеме. Так, моделирование динамики углеродного баланса для условий, соответствующих типам C_2 и D_2 , демонстрирует устойчивое накопление углерода на протяжении первых трёх десятилетий. Пик запаса углерода достигается к 30-му году развития насаждений; в дальнейшем отмечается постепенное снижение темпов годового прироста вследствие возрастного замедления продукционных процессов в древесном сообществе.

В целом, результаты моделирования показывают значительные различия в ежегодном поглощении и выбросах углекислого газа для различных типов

лесорастительных условий (A_1 , A_2 , B_2 , C_2 , D_2). Эти различия обусловлены как природными особенностями условий, так и характером лесохозяйственных мероприятий, включая лесовосстановление (период до 10 лет) и рубки ухода. Прежде всего, бедные условия (A_1 и A_2) демонстрируют низкую интенсивность ежегодного поглощения углерода в фитомассе. На начальных стадиях (до 10 лет) темпы прироста деревьев ограничены, что снижает объёмы поглощения. Максимальные значения (около 3 т/га CO_2) достигаются к возрасту 20–25 лет, после чего темпы резко снижаются. В более благоприятных условиях (B_2) поглощение значительно выше: максимум достигает 3,5–4 т/га CO_2 в возрасте 20–25 лет. Наиболее продуктивными являются условия C_2 и D_2 , где дубовые насаждения поддерживают стабильно высокие показатели ежегодного поглощения (до 3,5 т/га CO_2) даже после 30 лет. Динамика выбросов углерода из мёртвого органического вещества также варьируется. В условиях A_1 и A_2 выбросы умеренные, их пики связаны с рубками ухода в 8, 13 и 35 лет. В B_2 выбросы выше, особенно после прореживания в 35 лет. В C_2 и D_2 отсутствие рубок ухода в 35 лет минимизирует выбросы.

Сравнительный анализ субъектов Центральной лесостепи (см. таблицу 4) позволяет выявить отчетливые различия в характеристиках лесных экосистем, обусловленные как уникальными природно-климатическими факторами каждого региона, так и особенностями структуры древесных насаждений. Несмотря на определённую унификацию методов ведения лесного хозяйства и типовую схожесть применяемых лесовосстановительных мероприятий, сказываются значимые территориальные различия по уровню лесистости, породному составу, продукционным возможностям и потенциалу секвестрации углерода. В совокупности эти различия отражают комплексный характер адаптации лесных экосистем к локальным

условиям среды и подчеркивают необходимость лесным фондом в разрезе каждого субъекта региона. разработки дифференцированных стратегий управления

Таблица 4. Суммарные выбросы (в) и поглощение (п) парниковых газов (в т CO₂-экв./га) в результате лесохозяйственных мероприятий в субъектах Центральной лесостепи
Table 4. Total emissions (c) and absorption (p) of greenhouse gases (in t CO₂-eq./ha) as a result of forestry operations in the subjects of the central forest-steppe region

Субъект Region	К году By the year	Потоки Flows	Состав насаждений / Composition of plantations								
			10С / 10P			5С5Б / 5P5B			10Д / 10О		
			Ф / F	МОВ DOM	ПОВ SOM	Ф / F	МОВ DOM	ПОВ SOM	Ф / F	МОВ DOM	ПОВ SOM
Белгородская область Belgorod Region	10	в	0	0	0	-0,02	0	0	-0,29	0	0
		п	12,39	9,90	0,22	17,12	10,08	0,31	15,47	15,66	0,44
	50	в	-9,09	-9,61	0	-11,59	-14,58	0	-0,29	-10,49	0
		п	120,38	26,40	5,13	131,34	31,19	6,29	136,14	27,94	10,74
Воронежская область Voronezh Region	10	в	0	0	0	-0,02	0	0	-0,29	0	0
		п	12,39	9,06	0,29	17,12	10,89	0,42	15,47	10,63	0,55
	50	в	-9,09	-10,38	0	-11,59	-15,51	0	-0,29	-8,10	0
		п	120,38	23,61	5,24	131,34	29,19	6,42	136,14	20,24	10,63
Курская область Kursk Region	10	в	0	0	0	-0,18	0	0	-0,22	0	0
		п	12,39	9,28	0,26	18,11	11,37	0,37	14,04	12,91	0,48
	50	в	-9,09	-10,19	0	-11,84	-15,31	0	-0,22	-8,03	0
		п	120,38	24,16	5,21	132,33	29,74	6,20	127,60	20,83	9,79
Орловская область Orel Region	10	в	0	0	0	0	0	0	-0,33	0	0
		п	11,84	8,91	0,26	18,35	9,48	0,40	17,23	15,66	0,59
	50	в	-8,91	-9,06	0	-12,39	-15,35	0	-0,33	-10,60	0
		п	120,16	22,99	4,91	138,12	29,59	6,33	148,50	23,87	10,96
Тамбовская область Tambov Region	10	в	0	0	0	-0,02	0	0	-0,37	0	0
		п	14,70	11,70	0,26	20,09	11,42	0,37	19,65	19,25	0,55
	50	в	-10,60	-11,95	0	-13,46	-16,52	0	-0,37	-14,12	0
		п	132,99	30,10	5,65	146,14	34,05	6,44	161,11	30,36	11,37
Липецкая область Lipetsk Region	10	в	0	0	0	0	0	0	-0,33	0	0
		п	14,74	11,33	0,29	20,39	10,51	0,39	20,17	18,52	0,62
	50	в	-10,60	-12,32	0	-13,71	-16,92	0	-0,33	-14,12	0
		п	133,06	28,97	5,79	148,23	33,26	6,51	164,34	28,78	11,66

Примечание: Ф – фитомасса древостоя, МОВ – мёртвое органическое вещество, ПОВ – почвенное органическое вещество,
С – сосна, Б – береза, Д – дуб, в – выброс, п – поглощение
Note: F – stand phytomass, DOM – dead organic matter, SOM – soil organic matter, P – pine, B – birch, O – oak,
e – ejection, a – absorption

В целом, полученные результаты свидетельствуют о том, что наименее продуктивные лесные насаждения формируются в относительно бедных лесорастительных условиях (Курская и Воронежская области), для которых характерно пониженное углеродное поглощение по сравнению с Тамбовской и Липецкой областями, обладающими более высокими потенциалами лесорастительной продуктивности. Выбросы углекислого газа в исследованных регионах связаны преимущественно с разложением мёртвого органического материала, а в меньшей степени — с почвенным органическим веществом; величины этих выбросов варьируют в зависимости от возраста древостоев и особенностей их породного состава. В среднем объёмы выбросов остаются стабильными в разных регионах, однако их вклад оказывается более значительным в смешанных насаждениях, где увеличен объём опада и древесных остатков.

Сопоставительный анализ лесных экосистем Центральной лесостепи свидетельствует о прямой зависимости интенсивности процессов углеродного секвестирования и выбросов парниковых газов от сочетания природно-климатических факторов и породного состава древостоев. Наиболее высокий углеродный потенциал фиксируется в Тамбовской и Липецкой областях благодаря оптимальным условиям для роста и развития древесных насаждений. Величина суммарного поглощения углекислого газа лесовосстановительными процессами достигает 11,84–20,39 т/га CO₂-экв. с перспективой увеличения до 120,16–164,34 т/га CO₂-экв. через 50 лет. При этом стартовые значения выбросов минимальны (0 т/га CO₂-экв.), однако через полувековой период они могут достичь – 16,92 т/га CO₂-экв. в смешанных сосново-берёзовых насаждениях за счёт проведения рубок

ухода за лесом. Полученные данные подчёркивают необходимость учёта породного состава насаждений и условий среды при планировании и реализации лесохозяйственных мероприятий для максимизации углеродного баланса и оптимизации региональных климатических стратегий.

Учитывая ранее установленную необходимость расширения комплекса лесохозяйственных мероприятий и прогнозируемые площади их проведения, была осуществлена количественная оценка выбросов и поглощения парниковых газов при реализации программ лесовосстановления, лесоразведения, рубок ухода (осветления, прочистки, прореживания, проходные рубки), санитарно-оздоровительных мероприятий (выборочные санитарные рубки, удаление неликвидной древесины), а также мероприятий по предупреждению и тушению лесных пожаров, включая контролируемые профилактические выжигания.

Расчёт депонирования атмосферного углерода в результате лесовосстановления и лесоразведения осуществлялся к моменту перевода соответствующих площадей в категорию покрытых лесом земель с использованием конверсионных коэффициентов, учитывающих породу возобновления, минимальную густоту и высоту древостоев по лесным районам. Поглощённые объёмы CO₂ приведены для года, соответствующего моменту перевода лесных культур в категорию покрытых лесом земель.

Прогнозные значения объёмов поглощения CO₂ в результате перевода лесных культур в покрытые лесом участки, рассчитанные в рамках оптимистического, реалистичного и пессимистичного сценариев проведения лесовосстановительных мероприятий, представлены в таблице 5.

Таблица 5. Прогнозируемые объёмы поглощения CO₂ в результате лесовосстановительных мероприятий в субъектах Центральной лесостепи

Table 5. Projected volumes of CO₂ uptake as a result of forest restoration measures in the regions of the central forest-steppe

Субъект / Region	Вид прогноза Type of forecast	Объёмы поглощения т CO ₂ -экв. ПГ при лесовосстановлении по годам Volumes of absorption of t CO ₂ -eq. GHGs during reforestation by years				
		2024	2025	2026	2027	2028
Белгородская область Belgorod Region	Оптимистичный Optimistic	1718,4	1224,0	821,7	714,8	667,8
	Реалистичный Realistic	1057,7	917,8	722,1	579,6	549,0
	Пессимистичный Pessimistic	668,2	528,1	391,0	341,4	318,0
Воронежская область Voronezh Region	Оптимистичный Optimistic	7650,8	3452,2	3212,5	2912,7	2922,4
	Реалистичный Realistic	5323,8	3019,2	2796,5	2535,2	2540,4
	Пессимистичный Pessimistic	2976,3	2855,5	2651,9	2231,9	2307,9
Курская область Kursk Region	Оптимистичный Optimistic	997,3	868,8	802,1	750,5	723,8
	Реалистичный Realistic	605,0	560,4	581,8	543,2	522,3
	Пессимистичный Pessimistic	550,4	468,5	473,3	409,7	400,3

Липецкая область Lipetsk Region	Оптимистичный Optimistic	3581,7	1267,8	1208,2	1000,6	774,7
	Реалистичный Realistic	2336,3	1396,4	1132,9	943,6	752,5
	Пессимистичный Pessimistic	1168,1	1282,5	989,2	818,5	668,7
Орловская область Orel Region	Оптимистичный Optimistic	223,7	144,3	103,8	89,1	74,5
	Реалистичный Realistic	116,2	73,9	76,2	68,0	53,8
	Пессимистичный Pessimistic	87,2	57,5	60,0	49,9	44,4
Тамбовская область Tambov Region	Оптимистичный Optimistic	1983,3	772,8	810,9	833,6	751,8
	Реалистичный Realistic	1151,1	816,0	834,5	835,0	754,9
	Пессимистичный Pessimistic	428,0	511,0	534,6	588,7	514,6

1. Воронежская область. Демонстрирует наибольшие значения по всем сценариям. В оптимистичном сценарии поглощение достигает максимума в 2024 году (7650,8 т), затем значительно снижается (2922,4 т к 2028 году). Реалистичный и пессимистичный сценарии также показывают тенденцию к сокращению, но стартовые и итоговые значения остаются существенно выше большинства других регионов.

2. Липецкая область. Занимает второе место по объему поглощения CO₂. В оптимистичном сценарии в 2024 году фиксируется 3581,7 т, к 2028 году – 774,7 т. Для реалистичного и пессимистичного сценариев значения также достаточно высоки, что свидетельствует о значительном потенциале региона к секвестрации углерода даже при неблагоприятных условиях.

3. Тамбовская область. Показатели поглощения схожи с Липецкой областью: в 2024 году – 1983,3 т (оптимистичный сценарий), в 2028 году – 751,8 т. При реалистичном сценарии динамика сохраняется на уровне 1151,1 т в 2024 году и 754,9 т в 2028 году. Пессимистичный сценарий показывает меньшее, но незначительно отличающееся снижение (428,0 -> 514,6 т).

4. Белгородская область. Значения более скромные, максимальный объем в 2024 году – 1718,4 т (оптимистичный), к 2028 – 667,8 т. По реалистичному и пессимистичному сценариям данные также указывают на устойчивое снижение.

5. Курская область. Общий объем поглощения ниже, чем у вышеперечисленных регионов: 997,3 т в 2024 (оптимистичный) и 723,8 т в 2028 году. Здесь отличие между сценариями менее выражено, что указывает на устойчивость лесных экосистем, но не на их высокую производительность.

6. Орловская область. Продемонстрировала наименьшие значения поглощения: оптимистичный сценарий – от 223,7 т в 2024 до 74,5 т в 2028 году. Для реалистичного и пессимистичного сценариев значения еще ниже.

Таким образом, во всех регионах наблюдается снижение объемов поглощения CO₂ по годам, что может быть обусловлено постепенным насыщением молодых насаждений, снижением потенциала лесовосстановления или спецификой внесённого годового вклада. Наиболее контрастно сценарные различия проявляются в Воронежской, Липецкой и

Тамбовской областях. Наибольший вклад в секвестрацию углерода по итогам пятилетнего периода обеспечивают Воронежская, Липецкая и Тамбовская области, что связано с более высокими природно-климатическими ресурсами, активной политикой лесовосстановления и большей площадью лесных земель. Белгородская, Курская и Орловская области уступают им по данному показателю. Эти данные подчеркивают значительную региональную дифференциацию потенциала лесов Центральной лесостепи к поглощению CO₂, что необходимо учитывать при разработке и реализации лесоклиматических и природоохранных программ. Для максимизации секвестрационного потенциала требуется адаптация лесохозяйственных мероприятий к местным условиям и эффективная реализация лесовосстановительных работ по оптимистичным сценариям.

На основании проведенного анализа установлено, что при сохранении текущих тенденций совокупный объем поглощения парниковых газов в лесных экосистемах Центральной лесостепи через 50 лет может достичь 120,16–164,34 т/га CO₂-экв. Тем не менее, для обеспечения устойчивого развития региональных экосистем и повышения эффективности секвестрации углерода целесообразно не ограничиваться только плановыми объемами лесовосстановления до 2028 года. Необходимым условием достижения целевых показателей является увеличение масштабов создания лесных насаждений с использованием саженцев с закрытой корневой системой на площади не менее чем на 4 830 га. Такой подход позволит не только усилить углеродный баланс, но и существенно повысить адаптационный потенциал и стабильность лесных экосистем в условиях нарастающих климатических и антропогенных воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования дана всесторонняя оценка современного состояния углеродного баланса лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России, а также рассмотрены перспективы его улучшения в контексте реализации лесоклиматических проектов. Проведён комплексный анализ динамики естественного и искусственного лесовосстановления, породного разнообразия, продуктивности, использо-

вания лесных ресурсов, а также ключевых факторов, ограничивающих потенциал региона по секвестрации углерода. Установлено, что величина вклада лесного покрова в поглощение парниковых газов существенно определяется не только типом насаждений и экологическими условиями, но и эффективностью реализации лесохозяйственных мероприятий, используемых технологий, а также наличием координированной государственной и региональной поддержки лесного сектора.

Выявлено, что наибольший углеродный потенциал характерен для территорий с благоприятными лесорастительными условиями и активным участием в программах восстановления и расширения лесов, прежде всего за счёт выращивания ценных пород на основе современных агротехнологий и применения посадочного материала с закрытой корневой системой. В то же время в ряде районов сохраняется значительный нереализованный потенциал увеличения площади лесных культур, что обусловлено как естественными ограничениями (почвенно-климатические условия, фрагментированность земель), так и недостаточной интенсивностью внедрения инновационных практик в лесном хозяйстве.

Прогнозные сценарии демонстрируют, что при сохранении существующих тенденций и реализации набора организационно-правовых и технологических мер общий объём секвестрации углекислого газа может возрасти и достичь среднепогодных значений 120–164 т/га CO₂-экв. за полувековой период. Однако достижение целевых индикаторов в плане поглощения парниковых газов и устойчивого развития региона требует комплексной адаптации лесохозяйственной политики с приоритетом на инновационные методы организации производства, расширение масштабов искусственного лесовосстановления, оптимизацию породного состава, а также внедрение устойчивых форм управления лесами, среди которых особое значение приобретает мониторинг состояния экосистем с использованием дистанционного зондирования и геоинформационных систем.

Реализация комплекса мер по расширению лесных площадей, оптимизации породного состава и внедрению современных агротехнологий обеспечит не только дополнительное поглощение парниковых газов, но и повысит устойчивость экосистем к неблагоприятным климатическим и антропогенным воздействиям, тем самым способствуя сохранению природного капитала региона и улучшению качества жизни населения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

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

ACKNOWLEDGMENT

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. Jönsson M., Snäll T. Ecosystem service multifunctionality of low-productivity forests and implications for conservation and

management // *J Appl Ecol*. 2020. N 57. P. 695–706.

<https://doi.org/10.1111/1365-2664.13569>

2. Mikkonen N., Leikola N., Lehtomäki J., Halme P., Moilanen A. National high-resolution conservation prioritisation of boreal forests // *Forest Ecology and Management*. 2023. V. 541. Article ID: 121079.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121079>

3. Mönkkönen M., Juutinen A., Mazziotta A. et al. Spatially dynamic forest management to sustain biodiversity and economic returns // *J Environ Manage*. 2014. N 134. P. 80–89.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2013.12.021>

4. Состояние лесов мира 2022. Лесохозяйственные стратегии развития как инструмент экологически сбалансированного восстановления и создания инклюзивной, жизнестойкой и устойчивой экономики. Рим, ФАО. URL:

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/de76d76e-289a-4bbc-a661-0aeabb30a710/content>.

<https://doi.org/10.4060/cb9360ru> (дата обращения: 02.03.2025)

5. Brack D. Forests and Climate Change, Background Analytical Study prepared for the fourteenth session of the United Nations Forum on Forests, 2019. URL:

<https://www.un.org/esa/forests/wpcontent/uploads/2019/03/UNFF14-BkgdStudy-SDG13-March2019.pdf>. (дата обращения: 02.03.2025)

6. Busch J. et al. Potential for Low-cost Carbon Dioxide Removal through Tropical Reforestation // *Nature Climate Change*. 2019. N 9(6). P. 463–470.

<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0485-x>

7. Cushman S.A., McKelvey K.S., Hayden J., Schwartz M.K. Gene flow in complex landscapes: testing multiple hypotheses with causal modeling // *Am Nat*. 2006. N 168(4). P. 486–499.

8. Сурина Е.А., Сеньков А.О. Перспективные способы и технологии восстановления нарушенных лесных экосистем, улучшение качества и повышение продуктивности лесов Европейского Севера РФ // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. 2020. Т. 16. N 1. С. 85–86.

9. Обыденников В.И., Волков С.Н., Коротков С.А. Эколого-географические аспекты лесоводственных систем // *Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник*. 2016. Т. 20. N 2. С. 6–16.

10. Попов Н.Л. Лесовосстановление в России: текущее состояние и пути развития // *Современные аспекты экономики*. 2021. N 6(286). С. 26–36.

11. Löf M., Madsen P., Metslaid M. et al. Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future // *New Forests*. 2019. V. 50. P. 139–151.

<https://doi.org/10.1007/s11056-019-09713-0>

12. Silva L., Freer-Smith P., Madsen P. Production, restoration, mitigation: a new generation of plantations // *New Forests*. 2019. N 50(2). P. 153–168.

13. Nandal A., Yadav S.S., Rao A.S. et al. Advance methodological approaches for carbon stock estimation in forest ecosystems // *Environ Monit Assess*. 2023. N 195. P. 315.

<https://doi.org/10.1007/s10661-022-10898-9>

14. Шварц Е.А., Птичников А.В. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // *Научные труды Вольного экономического общества России*. 2022. Т. 236. N 4. С. 399–426. DOI: 10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426

15. Шанин В.Н., Фролов П.В., Коротков В.Н. Всегда ли искусственное лесовосстановление может быть лесоклиматическим проектом? // *Вопросы лесной науки*. 2022. N 2. Статья N 106. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-106

16. Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D. et al. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2020. N 5. P. 661–687.

<https://doi.org/10.1007/s11027-019-09885-2>

17. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports*. 2021. N 11. Article ID: 12825.
18. Морковина С.С., Шешницан С.С., Иванова А.В., Яковенко Н.В., Прядилина Н.К. Потенциал и инвестиционная привлекательность проектов по улучшенному лесному хозяйству в условиях возрастающих климатических вызовов // *Юг России: экология, развитие*. 2024. Т. 19. N 3. С. 180–192. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-18
19. Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов. URL: https://eipc.center/pdf/analitic/raspr_minprir_ros_30_06_2017_n_20.pdf (дата обращения: 02.04.2025)
20. Liski J., Palosuo T., Peltoniemi M., Sievanen R. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils // *Ecological Modelling*. 2005. N 189. P. 168–182.
21. Maser O.R., Garza-Caligaris J.F., Kanninen M. et al. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach // *Ecological Modelling*. 2003. V. 164. P. 177–199.
22. Paustian K., Ravindranath N.H., van Amstel A.R. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories // *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. 2006. V. 4. P. 1–21.
23. Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Laur N.V. Biological and economic features of the 'Voronezh Giant' hybrid poplar // *IOP Conference series: Earth and Environmental science*. 2020. V. 574. N 1. Article ID: 012083.
24. Pietsch S.A., Hasenauer H., Thornton P.E. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests // *Forest Ecology and Management*. 2005. N 211(3). P. 264–295.
25. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Москва: Федеральное агентство лесного хозяйства, ИАASA, 2008. 886 с.
26. Li Q., Jia Z., Feng L., He L. Dynamics of biomass and carbon sequestration across a chronosequence of *Caragana intermedia* plantations on alpine sandy land // *Scientific Reports*. 2018. V. 8(1). Article ID: 12432.
27. <https://www.un.org/esa/forests/wpcontent/uploads/2019/03/UNFF14-BkgdStudy-SDG13-March2019.pdf> (accessed: 02.03.2025)
28. Busch J. et al. Potential for Low-cost Carbon Dioxide Removal through Tropical Reforestation. *Nature Climate Change*, 2019, no. 9(6), pp. 463–470. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0485-x>
29. Cushman S.A., McKelvey K.S., Hayden J., Schwartz M.K. Gene flow in complex landscapes: testing multiple hypotheses with causal modeling. *Am Nat.*, 2006, no. 168(4), pp. 486–499.
30. Surina E.A., Senkov A.O. Promising methods and technologies for restoring disturbed forest ecosystems, improving the quality and productivity of forests in the European North of the Russian Federation. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 85–86. (In Russian)
31. Obydennikov V.I., Volkov S.N., Korotkov S.A. Ecological and geographical aspects of forestry systems. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoi vestnik [Bulletin of the Moscow State University of Forests - Lesnoy Vestnik]*. 2016, vol. 20, no. 2, pp. 6–16. (In Russian)
32. Popov N.L. Reforestation in Russia: current status and development paths. *Sovremennye aspekty ekonomiki [Modern aspects of economics]*. 2021, no. 6(286), pp. 26–36. (In Russian)
33. Löf M., Madsen P., Metslaid M. et al. Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests*, 2019, no. 50, pp. 139–151. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09713-0>
34. Silva L., Freer-Smith P., Madsen P. Production, restoration, mitigation: a new generation of plantations. *New Forests*, 2019, no. 50(2), pp. 153–168.
35. Nandal A., Yadav S.S., Rao A.S. et al. Advance methodological approaches for carbon stock estimation in forest ecosystems. *Environ Monit Assess.*, 2023, no. 195, p. 315. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10898-9>
36. Shvarts E.A., Ptichnikov A.V. The strategy of low-carbon development of Russia and the role of forests in its implementation. *Scientific papers of the Free Economic Society of Russia*, 2022, vol. 236, no. 4, pp. 399–426. DOI: 10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426
37. Shanin V.N., Frolov P.V., Korotkov V.N. Can artificial reforestation always be a forest-climatic project? *Questions of forest science*, 2022, no. 2 (106). (In Russian) DOI: 10.31509/2658-607x-202252-106
38. Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D. et al. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, no. 5, pp. 661–687. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09885-2>
39. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Scientific Reports*, 2021, no. 11, article id: 12825.
40. Morokovina S.S., Sheshnitsan S.S., Ivanova A.V., Yakovenko N.V., Pryadilina N.K. Potential and investment attractiveness of improved forestry projects under increasing climatic challenges. *South of Russia: ecology, development*, 2024, no. 9(3), pp. 180–192. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-18
41. On the approval of methodological guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas absorption. Available at: https://eipc.center/pdf/analitic/raspr_minprir_ros_30_06_2017_n_20.pdf (accessed: 02.04.2025)
42. Liski J., Palosuo T., Peltoniemi M., Sievanen R. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling*. 2005, no. 189, pp. 168–182.

REFERENCES

- Jönsson M., Snäll T. Ecosystem service multifunctionality of low-productivity forests and implications for conservation and management. *J Appl Ecol.*, 2020, no. 57, pp. 695–706. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13569>
- Mikkonen N., Leikola N., Lehtomäki J., Halme P., Moilanen A. National high-resolution conservation prioritisation of boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 2023, vol. 541, article id: 121079. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121079>
- Mönkkönen M., Juutinen A., Mazziotta A. et al. Spatially dynamic forest management to sustain biodiversity and economic returns. *J Environ Manage*, 2014, no. 134, pp. 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.021>
- The state of the world's forests 2022. Forestry development strategies as a tool for environmentally balanced recovery and the creation of an inclusive, resilient and sustainable economy. Rome, FAO Available at: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d76d76e-289a-4bbc-a661-0aeabb30a710/content>. <https://doi.org/10.4060/cb9360ru> (accessed: 02.03.2025)
- Brack D. Forests and Climate Change, Background Analytical Study prepared for the fourteenth session of the United Nations Forum on Forests, 2019. Available at:

21. Masera O.R., Garza-Caligaris J.F., Kanninen M. et al. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*. 2003, vol. 164, pp. 177–199.
22. Paustian K., Ravindranath N.H., van Amstel A.R. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. 2006, vol. 4, pp. 1–21.
23. Tsarev A.P. Tsareva R.P., Tsarev V.A., Laur N.V. Biological and economic features of the 'Voronezh Giant' hybrid poplar. *IOP Conference series: Earth and Environmental science*. 2020, vol. 574, no. 1, article id: 012083.
24. Pietsch S.A., Hasenauer H., Thornton P.E. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. *Forest Ecology and Management*. 2005, no. 211(3), pp. 264–295.
25. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nilsson S., Bului Y.I. *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii (normativno-spravochnye materialy)* [Tables and models of growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (normative and reference materials)]. Moscow, Federal Forestry Agency, IASA Publ., 2008, 886 p. (In Russian)
26. Li Q., Jia Z., Feng L., He L. Dynamics of biomass and carbon sequestration across a chronosequence of Caragana intermedia plantations on alpine sandy land. *Scientific Reports*. 2018, vol. 8(1), article id: 12432.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Светлана С. Морковина разработала концепцию и дизайн исследования, написала первую версию статьи. Елена А. Колесниченко провела расчеты по оценке эффективности инвестиционных проектов. Наталия В. Яковенко несет ответственность за все аспекты работы и гарантирует соответствующее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью всех частей публикации. Сергей С. Шешницан одобрил окончательную версию статьи перед ее подачей в редакцию, сформулировал результаты исследования и заключительные выводы. Алексей Н. Водолажский подготовил графический и картографический материал.

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. Elena A. Kolesnichenko undertook calculations to evaluate the effectiveness of investment projects. Nataliya V. Yakovenko by agreement was responsible for all aspects of the work and to guarantee appropriate consideration and resolution of issues related to the accuracy and integrity all parts of the publication. Sergey S. Sheshnitsan approved the final version of the article before its submission for publication, formulated research results and final conclusions. Alexey N. Vodolazhskiy prepared graphic and cartographic materials.

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>
 Елена А. Колесниченко / Elena A. Kolesnichenko <https://orcid.org/0000-0002-1213-3199>
 Наталия В. Яковенко / Nataliya V. Yakovenko <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>
 Сергей С. Шешницан / Sergey S. Sheshnitsan <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>
 Алексей Н. Водолажский / Alexey N. Vodolazhskiy <https://orcid.org/0000-0003-0847-3462>