

# ВЛИЯНИЕ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В ПОСТАГРОГЕННЫХ БЕРЕЗОВЫХ ЛЕСАХ

**П.С. Широких<sup>1,2\*</sup>, С.Н. Жигунова<sup>1,2</sup>, В.Д. Гимазетдинов<sup>1,2</sup>,  
И.Р. Туктамышев<sup>1,2</sup>, Э.З. Баишева<sup>1</sup>, И.Г. Бикбаев<sup>1,2</sup>,  
В.Б. Мартыненко<sup>1</sup>, Д.М. Гулов<sup>1,2</sup>, Д.Т. Габбасова<sup>1,2</sup>,  
М.Р. Ахметова<sup>1</sup>, Белан Л.Н.<sup>2</sup>, Д.Р. Харисов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН и

<sup>2</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

\*Эл. почта: shirpa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; принята к печати 20.04.2026

Заброшенные сельскохозяйственные земли (залежи) – важный резерв увеличения углеродного потенциала экосистем за счет депонирования углерода в древостое. Влияние лесохозяйственных мероприятий на углеродный баланс таких экосистем изучено недостаточно. Целью работы была оценка влияния прореживания древостоя на эмиссию CO<sub>2</sub> в почвенно-приземном комплексе (совокупность почвы, подстилки и травяного яруса, включая корни всех растений, находящиеся в этом слое) в молодом березняке на постагрогенной залежи. Исследования проведены в широколиственно-лесной зоне Республики Башкортостан в вегетационный сезон 2025 года на следующих пробных площадях: контроль (число деревьев – 3607 шт./га) и два варианта опыта (прореживание до целевой плотности 1000 и 800 шт./га, по три пробных площади в каждом варианте). Потоки CO<sub>2</sub> измерялись статическим камерным методом с использованием портативных газоанализаторов (Li-Cor 7810). Значения чистого экосистемного обмена (NEE – Net Ecosystem Exchange) и дыхания экосистемы (Resco – Respiration of Ecosystem) во всех вариантах были положительными на протяжении всего периода наблюдений, что свидетельствует о доминировании эмиссии CO<sub>2</sub> над его поглощением в напочвенном покрове. Прореживание древостоя до 1000 шт./га привело к наиболее существенному (в 2–4 раза) снижению удельных потоков CO<sub>2</sub> по сравнению с контролем, что связано с развитием фотосинтетически активного травяного яруса (проективное покрытие увеличилось с 1-5 до 50%). Суммарный нетто-экосистемный обмен CO<sub>2</sub> (NEE) за период май–октябрь на контрольной пробной площади составил 689 гС·м<sup>-2</sup>, на пробных площадях при прореживании до 1000 шт./га – 281 гС·м<sup>-2</sup>, до 800 шт./га – 490 гС·м<sup>-2</sup>. Сезонные значения дыхания экосистемы (Resco) достигали 832 гС·м<sup>-2</sup> на контроле и снижались до 517 и 635 гС·м<sup>-2</sup> при прореживании до 1000 и 800 шт./га, что указывает на максимальное сокращение эмиссии при умеренном прореживании. Полученные результаты показывают, что умеренное прореживание (до 1000 шт./га) является эффективным инструментом краткосрочного управления углеродным балансом напочвенного покрова в молодых березняках на залежах и может быть рекомендовано при проектировании и оптимизации функционирования карбоновых ферм.

Ключевые слова: залежные земли, береза повислая, напочвенный покров, потоки CO<sub>2</sub>, Республика Башкортостан.

## INFLUENCE OF SILVICULTURAL PRACTICES ON THE CARBON BALANCE OF THE FOREST FLOOR IN POST-AGRICULTURAL BIRCH FORESTS

**P.S. Shirokikh<sup>1,2</sup>, S.N. Zhigunova<sup>1,2</sup>, V.D. Gimazetdinov<sup>1,2</sup>, I.R. Tuktamyshev<sup>1,2</sup>,  
E.Z. Baisheva<sup>1</sup>, I.G. Bikbaev<sup>1,2</sup>, V.B. Martynenko<sup>1</sup>, D.M. Gulov<sup>1,2</sup>, D.T. Gabbasova<sup>1,2</sup>,  
M.R. Akhmetova<sup>1</sup>, L.N. Belan<sup>2</sup>, D.R. Kharisov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences and <sup>2</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

\*Email: shirpa@mail.ru

Abandoned agricultural lands are an important reserve for increasing the carbon sequestration potential of ecosystems, primarily through carbon storage in tree biomass. The impact of silvicultural practices on the carbon balance of such ecosystems is insufficiently studied. The aim of this study was to assess the effect of stand thinning on CO<sub>2</sub> emissions from the forest floor (the combination of soil, litter, and herb layer, including the roots of all plants located in this layer) in a young silver birch stand on post-agricultural land. The research was carried out on abandoned fields in the broad-leaved forest zone of the Republic of Bashkortostan during the 2025 vegetation season using three regimens: control (3607 trees ha<sup>-1</sup>) and thinning to target densities of 1000 and 800 trees ha<sup>-1</sup>. CO<sub>2</sub> fluxes were measured using the static chamber method with a portable gas analyzer (Li-Cor 7810). Under all regimens, NEE (Net Ecosystem Exchange) and ecosystem respiration (Reco – Respiration of Ecosystem) remained positive throughout the observation period, indicating dominance of CO<sub>2</sub> emissions over its uptake at the forest floor level. Thinning to 1000 trees ha<sup>-1</sup> led to the strongest reduction (by a factor of 2–4) in CO<sub>2</sub> flux densities vs. control, which was associated with the development of a photosynthetically active herb layer (projective cover increased from 1-5 to 50%). NEE in May–October was 689 g C m<sup>-2</sup> in the control, 281 g C m<sup>-2</sup> at 1000 trees ha<sup>-1</sup>, and 490 g C m<sup>-2</sup> at 800 trees ha<sup>-1</sup>. Seasonal Reco reached 832 g C m<sup>-2</sup> in the control and decreased to 517 and 635 g C m<sup>-2</sup> at 1000 and 800 trees ha<sup>-1</sup>, respectively, indicating the greatest emission reduction under moderate thinning. These results show that moderate thinning (down to 1000 trees ha<sup>-1</sup>) is an effective short-term tool for managing the carbon balance of the forest floor in young birch stands on abandoned agricultural land and can be recommended for designing and optimizing carbon farm operation.

**Keywords:** abandoned agricultural land, silver birch, forest floor, CO<sub>2</sub> fluxes, Republic of Bashkortostan

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема управления заброшенными сельскохозяйственными землями (залежами) приобретает всё большую актуальность в контексте изменения климата и необходимости повышения углеродного потенциала экосистем. Согласно докладу о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения<sup>1</sup>, площадь учтённых залежных земель в России составляет 4,4 млн га, что соответствует 1,17% земель сельхозназначения. Естественное зарастание залежей древесной растительностью, прежде всего такими быстрорастущими породами, как берёза (*Betula pendula* Roth), является распространённым процессом в лесостепных и лесных регионах [10–11, 13]. Формирующиеся на залежах молодые лесные насаждения рассматриваются как перспективные объекты для секвестрации атмосферного углерода [12, 22], что соответствует глобальной роли восстанавливающихся лесов в смягчении климатических изменений [21, 27; 29].

Исследования показывают, что динамика углеродного баланса в постагрогенных экосистемах носит сложный характер и зависит от множества факторов: возраста насаждений [5, 9], породного состава [31], климатических условий [17], типа почв [25] и проводимых лесохозяйственных мероприятий [18]. В частности, прореживание является ключевым инструментом управления структурой и продуктивностью молодняков. Однако его влияние на углеродный цикл неоднозначно. В краткосрочной перспективе прореживание закономерно снижает чистую продукцию экосистемы (NEP) и общие запасы надземного углерода из-за прямого удаления части биомассы деревьев [16, 28]. В то же время, в долгосрочной перспективе

(от 10 лет и более) прореживание создает условия для ускоренного роста оставшихся деревьев и способствует перераспределению углерода в более стабильные пулы [24, 32].

Важным компонентом углеродного обмена в лесных экосистемах является почвенное дыхание (эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы), на которое существенно влияют температура и влажность почвы [3, 6]. При этом травяной ярус под пологом леса может выступать как дополнительный сток углерода в результате фотосинтеза.

Несмотря на значительное число работ, посвящённых общей динамике углерода на залежах [9, 22, 35] и влиянию отдельных факторов на нее [4, 20], все еще недостаточно комплексных исследований, оценивающих синхронную реакцию таких экосистемных показателей, как ростовые процессы древостоя, динамика нижних ярусов и почвенно-атмосферный газообмен, на лесохозяйственные мероприятия в молодых березняках на залежах. Особую актуальность приобретают исследования с применением современных методов мониторинга, таких как высокочастотные измерения потоков парниковых газов, позволяющие получить детальную количественную оценку процессов.

Целью настоящей работы являлась оценка влияния лесохозяйственных мероприятий на газообмен CO<sub>2</sub> в почвенно-приземном комплексе в условиях молодого березняка, сформировавшегося на залежи в широколиственно-лесной зоне. В задачи работы входили анализ сезонной динамики потоков CO<sub>2</sub> (чистого экосистемного обмена и дыхания экосистемы) камерным методом и сравнительная оценка эффективности различных вариантов прореживания с точки зрения эмиссии углекислого газа.

Полученные результаты позволят усовершенствовать рекомендации по лесохозяйственному управлению залежными землями для повышения их климатического потенциала.

<sup>1</sup> Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2024 году. Москва: ФГБНУ «Росинформагротех»; 2025: 384 с.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа проводилась на участке «Мишкино» Евразийского карбонового полигона, расположенного в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья. Район исследования находится на границе Прибельской увалисто-волнистой равнины и Уфимского плато (рис. 1а). Климат территории умеренно континентальный. Среднегодовая температура воздуха  $+0,2^{\circ}\text{C}$ , средняя месячная температура самого холодного месяца (январь)  $-20,9^{\circ}\text{C}$ , самого тёплого (июль)  $+25^{\circ}\text{C}$ . Рельеф участка выровненный, максимальный перепад высот составляет 16 м (235–251 м над уровнем моря), угол склона –  $0,4^{\circ}$ . Почвы преимущественно тёмно-серые среднесуглинистые среднесиловые.

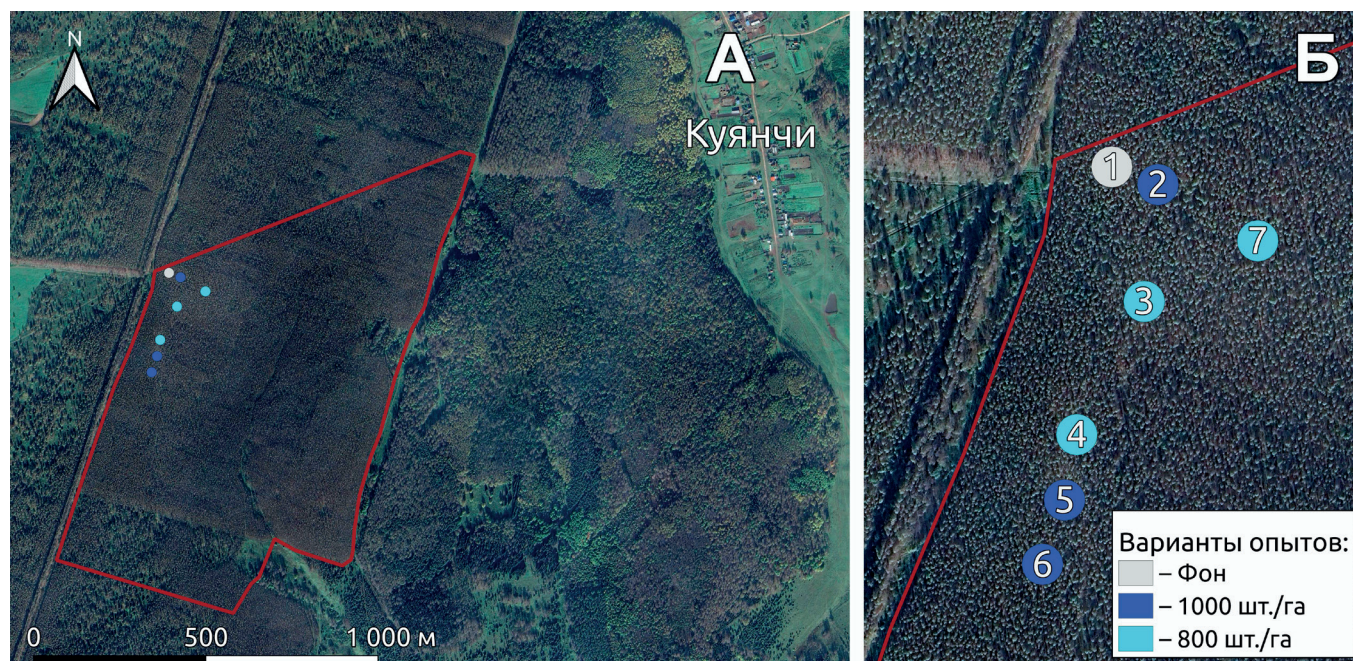
Преобладающий тип растительности на территории карбоновой фермы – длительно-производные берёзовые молодые леса из берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) с небольшой примесью других древесных пород в подросте. В ноябре 2023 года в западной части участка было заложено 7 круговых пробных площадей диаметром 30 м, включая контроль.

На предварительном этапе на всех пробных площадях были рассчитаны таксационные характеристики древостоя берёзы: проведен полный пересчёт живого древостоя и сухостоя по ступеням толщины деревьев на уровне груди (1,3 м) с градацией 2 см. Средняя высота берёзового древостоя в 2023 года составляла 16,3 м, средний диаметр стволов – 8–12 см, возраст по данным дендрохронологического анализа – 23–25 лет.

Древостой характеризовался высокой плотностью: число сухостоя составляло от 20 до 40%, а плотность живых деревьев – от 2300 до 3700 шт./га. Расположение опытных площадок представлено на рис. 1б.

Опыт включал изучение влияния прореживания древостоя на динамику эмиссии и поглощения  $\text{CO}_2$  в почвенно-приземном комплексе, включающую суммарный поток  $\text{CO}_2$  от поверхности: поглощение  $\text{CO}_2$  в процессе фотосинтеза травянистого яруса, дыхание почвенных микроорганизмов и разложение подстилки (гетеротрофное дыхание), а также дыхание корней травянистых растений и древесного яруса, пронизывающих верхний слой почвы. Чистый экосистемный обмен (NEE) в нашем случае относится только к этому компоненту, а не ко всей лесной экосистеме, так как фотосинтез и дыхание крон деревьев не учитывались.

Схема опытов по прореживанию включала два варианта целевой плотности древостоя: 800 и 1000 шт./га (табл. 1). При проведении рубок ухода в первую очередь удалялся сухостоя и живые деревья диаметром менее 12 см, затем проводилось дополнительное изреживание до заданной густоты. Срубленная древесина убиралась за пределы площадок. Состояние напочвенного покрова на опытных участках в 2025 году показано на рис. 2. За два года в зависимости от степени прореживания древостоя отмечено развитие травяного яруса и увеличение его проективного покрытия с 1-5 до 25-50% (табл. 1).



**Рис. 1.** Участок карбонового полигона «Мишкино»: А – местонахождение участка; Б - размещение круговых пробных площадей на территории участка. 1 – контроль; 2, 5, 6 – вариант опыта с количеством деревьев после прореживания до 1000 шт./га; 3, 4, 7 – вариант опыта с количеством деревьев после прореживания до 800 шт./га (Google satellite 2023)

## Характеристики вариантов опытов по прореживанию древостоя на круговых пробных площадках

№ пробной площади	Характеристика древостоя			Характеристики травяного яруса (2025 год)	
	Численность живых деревьев, шт./га		Проективное покрытие древостоя, %	Проективное покрытие, %	Основные доминанты
	В пересчете на 1 га	На пробной площади			
1 (Контроль)	3607	255	85	1–5	<i>Fragaria vesca</i> , <i>Pyrola minor</i>
Вариант опыта с численностью деревьев 1000 шт./га после прореживания					
2	1000	71	70	35	<i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Fragaria vesca</i> , <i>Galium odoratum</i> , <i>Poa pratensis</i>
5	1000	71	70	25	
6	1000	71	65	30	
Вариант опыта с численностью деревьев 800 шт./га после прореживания					
3	800	57	50	55	<i>Fragaria vesca</i> , <i>Stellaria holostea</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Galium album</i> , <i>Geum urbanum</i> , <i>Galium odoratum</i>
4	800	57	55	50	



Рис. 2. Состояние напочвенного покрова на пробных площадках в 2025 г.: А – контроль, Б – вариант с прореживанием до 1000 шт./га, В – вариант с прореживанием до 800 шт./га.

Измерения потоков диоксида углерода проводились с апреля по сентябрь 2025 года сотрудниками УИБ УФИЦ РАН и УГНТУ. Измерения проводились при помощи статического камерного метода с использованием портативного газоанализатора Li-Cor 7810 (Los Gatos Research, США, точность измерения концентрации 2 ppb по  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  – 1,5 ppm,  $\text{H}_2\text{O}$  – 20 ppm). Частота измерения концентраций – 1 раз в секунду, продолжительность экспозиции – от 2 до 4 мин. в зависимости от величины потока. Для оценки скорости  $dc/dt$  ( $\text{мг/кг ч}^{-1}$ ) изменения концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в камере использовали метод наименьших квадратов, исходя из допущения о стационарности этого показателя в течение экспозиции. Поток ( $E$ ,  $\text{мгС м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ ) рассчитывали по формуле  $E = (dc/dt \times V \times 12 \times 22.4^{-1}) / s$ , где  $V$  – объем воздуха в камере ( $\text{м}^3$ ),  $s$  – площадь горизонтального сечения камеры ( $\text{м}^2$ ) [1, 2]. Для определения средних величин потока с учетом их погрешностей применяли метод бутстрэпа [19]. Далее были рассчитаны среднее арифметическое и стандартное отклонение

величин среднего, полученных в отдельных повторениях. Для выполнения расчетов использовали программный пакет MATLAB R2023a.

Измерения проводились прозрачными камерами и светонепроницаемыми – закрытыми чехлами из фольгированного пенополиэтилена, который дополнительно снижал их нагрев. Прозрачные камеры использовались для измерения чистого обмена диоксида углерода между экосистемой и атмосферой (NEE) – дневные потоки, непрозрачные для измерения ночного дыхания экосистемы (Reco). Камеры устанавливали на квадратные металлические основания площадью  $0,16 \text{ м}^2$  с глубиной врезки в почву 10 см и площадью  $0,36 \text{ м}^2$ . В желоб основания, функционирующий как гидрозатвор, наливали отстоянную колодезную воду.

Всего обработано 826 измерений потоков  $\text{CO}_2$  камерным методом, равномерно распределенных по типам экосистем (контрольные и опытные участки с прореживанием) и времени суток. Параллельно фиксировали

Число дневных и ночных часов, рассчитанных по данным ERA5-Land

Месяц	Дневных часов	Ночных часов	Всего часов
Май	416	328	744
Июнь	420	300	720
Июль	433	311	744
Август	380	364	744
Сентябрь	304	416	720
Октябрь	233	487	720
ИТОГО	2186	2206	4392

сировались метеорологические (солнечная радиация, температура и влажность воздуха) и почвенные (температура и влажность на глубине 5–10 см) параметры с помощью портативной метеостанции САМ-У и PWS800 для расчета удельных потоков. Для расчета среднемесячных дневных (NEE) и ночных (Reco) потоков в течении вегетационного сезона (с 1 мая по 30 октября) были рассчитаны количество дневных и ночных часов за каждый месяц. За данный период также были обработаны данные ERA5-Land hourly (Copernicus Climate Change Service, 2025) по солнечной радиации (surface\_solar\_radiation\_downwards) с учетом облачности (табл. 2). Потоки считались ночными при солнечной радиации < 20 Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует условиям низкой освещенности, когда фотосинтез практически прекращается [30].

Дневные потоки CO<sub>2</sub> интерпретировались как чистый обмен экосистемы, принимающий как отрицательные (поглощение), так и положительные (эмиссия) значения, а ночные – исключительно как дыхание экосистемы (Reco) с положительными значениями.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

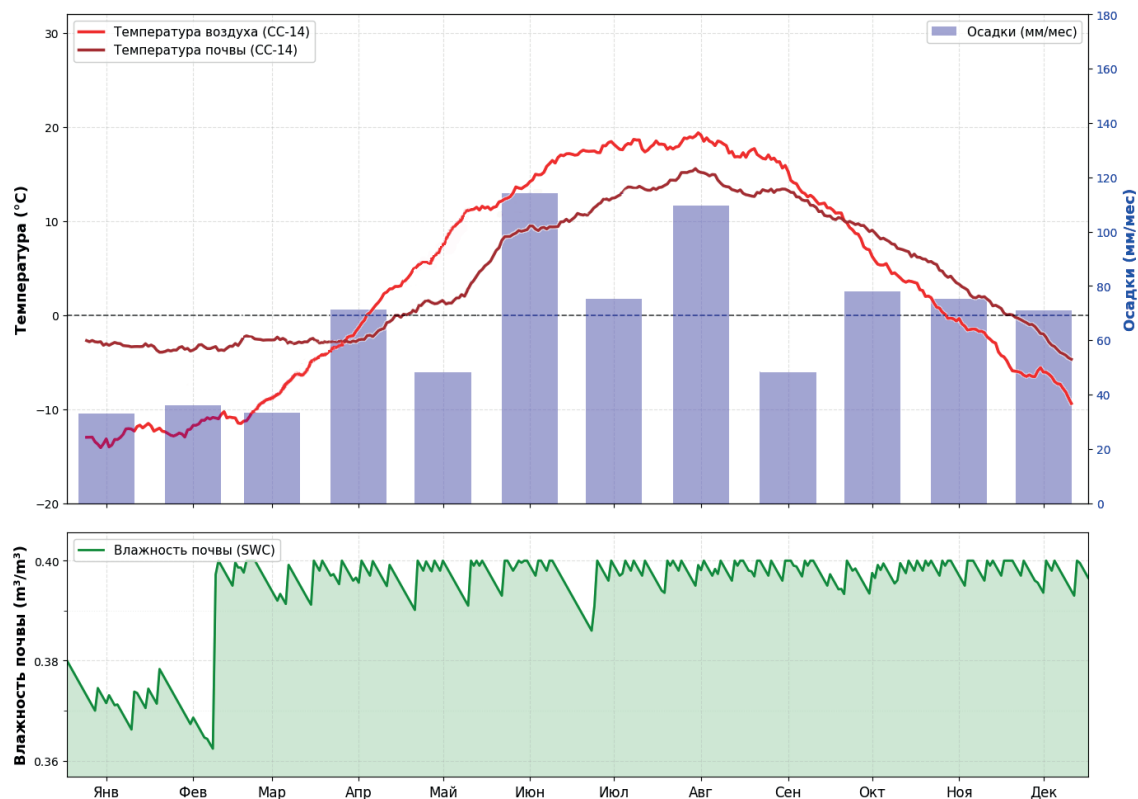
В период наблюдений (с мая по октябрь 2025 года) погодные условия обеспечивали широкий диапазон температур и увлажнения, в котором формировались потоки CO<sub>2</sub>. Среднемесячная температура воздуха под пологом древостоя возрастала от 6,6°C в мае до максимума 18,3°C в июле, после чего постепенно снижалась до 1,8°C в октябре (рис. 3).

Температура почвы повторяла этот тренд с несколько меньшей амплитудой: от 4,1°C в мае до 18,5°C в июле–августе. Наиболее тёплым и влажным оказался период июнь–август, когда сумма осадков достигала 105–113 мм/мес. при среднемесячных температурах воздуха 17,6°C–18,3°C, что создавало благоприятные условия для высокой биологической активности почвы. В июле и октябре, напротив, наблюдался дефицит увлажнения (30 мм/мес.) на фоне умеренных температур, что ограничивало интенсивность эмиссии. Влагоёмкость почвы (SWC – Soil Water Content)

на протяжении вегетационного периода (с апреля по октябрь) оставалась в диапазоне 0,39–0,40 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> с кратковременными просадками в июле (до ~0,385) – в период дефицита осадков. Осенью значения стабилизировались на уровне 0,39–0,40 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Общий диапазон изменений невелик (~0,05 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), что свидетельствует о хорошей буферной ёмкости почвы на участке (рис. 3). Таким образом, сезонная динамика температуры и влажности формировала широкий диапазон абиотических условий, определявший сезонную изменчивость потоков CO<sub>2</sub> во всех вариантах опыта.

Значения чистого обмена CO<sub>2</sub> между экосистемой и атмосферой в светлое время суток (NEE) и дыхания экосистемы в ночное время (Reco) сильно варьировали между пробными площадями и в течение вегетационного сезона. Значение чистого обмена CO<sub>2</sub> (NEE) – это результат баланса двух противоположных процессов: поглощения CO<sub>2</sub> в процессе фотосинтеза (GPP – Gross Primary Production, валовая первичная продукция) и эмиссии CO<sub>2</sub> при дыхании самих растений (автотрофное дыхание) и почвы (гетеротрофное дыхание, в основном, разлагающих органику микроорганизмов). Анализ потоков CO<sub>2</sub> в почвенно-приземном комплексе под пологом древостоя во всех случаях показал постоянную эмиссию CO<sub>2</sub> вне зависимости от месяца и времени суток (табл. 3).

Тем не менее значения чистого обмена CO<sub>2</sub> между экосистемой и атмосферой (NEE) и дыхания экосистемы (Reco) значительно варьировали между вариантами опыта и месяцами (табл. 3, 4). Во всех вариантах NEE были положительными на протяжении всего вегетационного периода, что свидетельствует о доминировании дыхания в почвенно-приземном комплексе над поглощением CO<sub>2</sub>. Минимальные значения NEE и Reco фиксировались в мае и октябре, когда температура воздуха и почвы была наименьшей, а фотосинтетическая активность травостоя невысока (рис. 4, 5). Максимумы приходились на середину сезона, совпадая с периодом наибольшего прогрева почвы и благоприятного увлажнения (июль–август), что согласуется с литературными данными [14].



**Рис. 3.** Сезонный ход климатических и почвенных параметров на исследованной постагрогенной залежи с берёзовым древостоем в 2025 году.

Табл. 3.

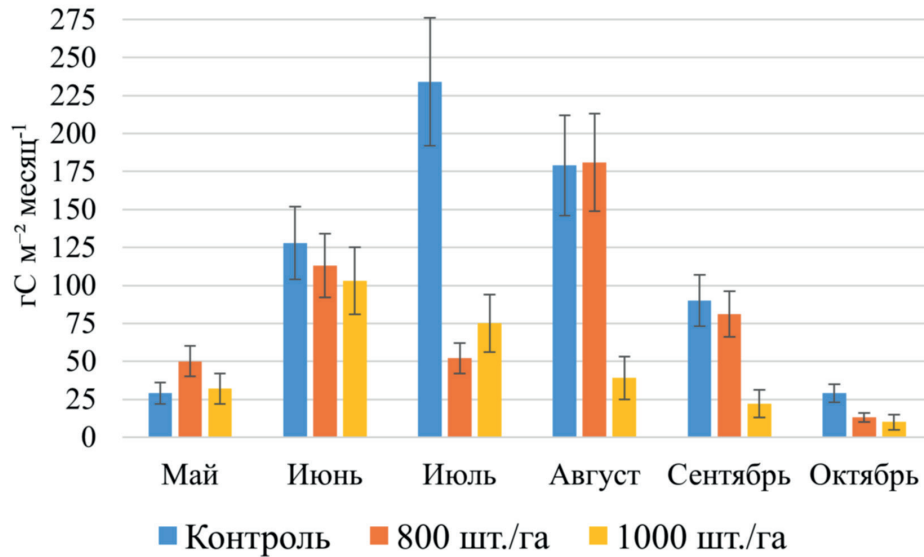
**Средние удельные потоки углекислого газа на зарастающих березой залежах, (мгС·м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>) ± SD**

Условия	Показатель	Месяц						Среднее
		Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	
Контроль	NEE	70±18	305±57	541±97	470±88	297±56	124±25	367±68
	Reco	285±51	430±78	575±104	529±100	356±68	184±35	454±83
Прореживание древостоя до 1000 шт./га	NEE	76±23	245±52	174±44	102±36	73±28	44±21	147±38
	Reco	259±53	381±72	285±60	189±47	181±41	174±35	281±57
Прореживание древостоя до 800 шт./га	NEE	120±23	270±49	120±23	477±85	266±49	55±13	274±50
	Reco	199±36	340±63	398±74	455±85	287±55	120±24	330±62

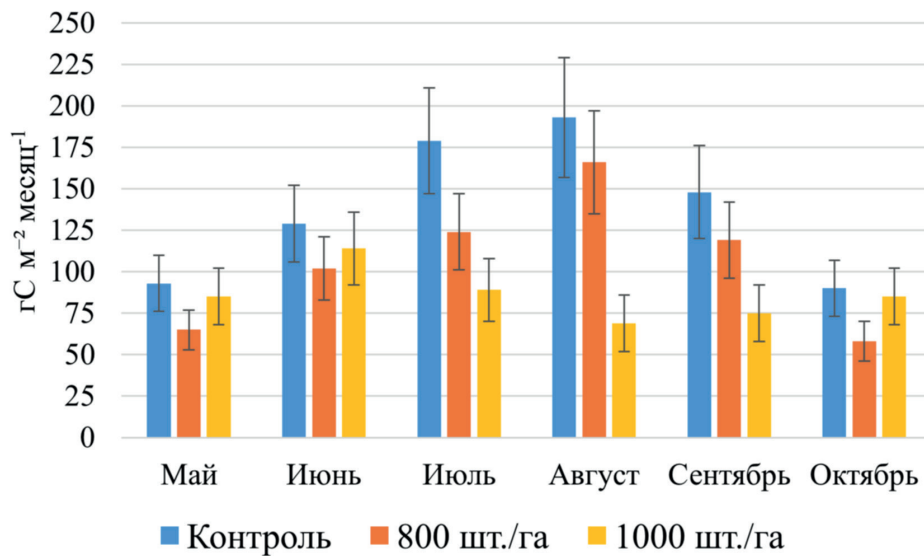
Табл. 4.

**Суммарные потоки углекислого газа за месяц на зарастающих березой залежах в различных вариантах опытов, (гС·м<sup>-2</sup> месяц<sup>-1</sup>) ± SD**

Условия	Показатель	Месяц					
		Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Контроль	NEE	29±7	128±24	234±42	179±33	90±17	29±6
	Reco	93±17	129±23	179±32	193±36	148±28	90±17
Прореживание древостоя до 1000 шт./га	NEE	32±10	103±22	75±19	39±14	22±9	10±5
	Reco	85±17	114±22	89±19	69±17	75±17	85±17
Прореживание древостоя до 800 шт./га	NEE	50±10	113±21	52±10	181±32	81±15	13±3
	Reco	65±12	102±19	124±23	166±31	119±23	58±12



**Рис. 4.** Суммарные потоки углекислого газа за месяц в дневную фазу (NEE) на зарастающих березой залежах в различных вариантах опыта, (гС·м<sup>-2</sup> месяц<sup>-1</sup> ± SD).



**Рис. 5.** Суммарные потоки углекислого газа за месяц в ночную фазу (Reco) на зарастающих березой залежах в различных вариантах опыта, (гС·м<sup>-2</sup> месяц<sup>-1</sup> ± SD).

Табл. 5.

**Суммарный поток CO<sub>2</sub> за вегетационный сезон 2025 года в почвенно-приземном комплексе на зарастающих березой залежах в различных вариантах опыта**

Условия	Показатель	Суммарный поток CO <sub>2</sub> за май–октябрь, гСм <sup>-2</sup>	Суммарный нетто-экосистемный обмен за май–октябрь, гСм <sup>-2</sup>
Контроль	NEE	689	1521
	Reco	832	
Прореживание древостоя до 1000 шт./га	NEE	281	798
	Reco	517	
Прореживание древостоя до 800 шт./га	NEE	490	1125
	Reco	635	

Примечание. NEE – дневные потоки, Reco – ночные потоки.

Контрольный участок демонстрировал высокие значения  $R_{eco}$  летом, достигая максимума в июле, что отражает интенсивное дыхание почвенно-приземного комплекса в условиях максимального прогрева, достаточного увлажнения и практически полного отсутствия травяного яруса (рис. 4, 5). Прореживание древостоя приводило к снижению удельных потоков. По сравнению с контролем, вариант с плотностью древостоя 1000 шт./га характеризовался почти 2-4-кратным снижением  $NEE$  и  $R_{eco}$  с июля по сентябрь, тогда как в варианте 800 шт./га уменьшение потоков было более умеренным (рис. 4, 5, табл. 3, 4), особенно в ночное время, что свидетельствует об усилении дыхания вследствие изменения структуры древостоя и увеличения количества легкоразлагаемого органического вещества.

Суммарный нетто-экосистемный обмен  $CO_2$  в почвенно-приземном комплексе за период наблюдений (май–октябрь) во всех вариантах опыта ниже, чем в контроле (табл. 5). Опыт с прореживанием древостоя демонстрирует снижение суммарных потоков в 1,5-2 раза (табл. 5), что связано с развитием травяного покрова (табл. 1, рис. 2) в напочвенном покрове и увеличением фотосинтетической активности.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевым результатом настоящей работы является выявление значимого влияния прореживания древостоя на удельные и суммарные потоки  $CO_2$  в почвенно-приземном комплексе при близких климатических условиях. На контрольной площадке с березняком мертвопокровным, характеризующейся высокой сомкнутостью полога ( $\approx 85\%$ ) и практически отсутствующим травяным ярусом, удельные потоки  $NEE$  и  $R_{eco}$  были максимальными (суммарный нетто-экосистемный обмен  $CO_2$  в почвенно-приземном комплексе за май–октябрь достигал  $689 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сезон}^{-1}$ , ночное дыхание –  $832 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сезон}^{-1}$ ). Это указывает на устойчивую роль гетеротрофного дыхания, активного разложения растительных остатков как источника  $CO_2$  [15, 33] в условиях высокой плотности древостоя и практически полного отсутствия травяного покрова.

Прореживание древостоя до 1000 шт./га сопровождалось наиболее заметным снижением потоков: сезонный  $NEE$  уменьшался почти в 2–4 раза, а суммарные дневные и ночные потоки за летний период – в среднем на 50% по сравнению с контролем (рис. 4). При этом метеорологические условия в разных вариантах опыта были сходными: максимальные температуры воздуха и почвы приходились на июнь–август ( $\approx 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а суммарные осадки и почвенная влагоёмкость демонстрировали близкие величины на всех площадках. Следовательно, различия в газообмене обусловлены изменением структуры растительности.

Механизмом снижения  $NEE$  в варианте 1000 шт./

га является активное развитие фотосинтетически активного травяного яруса под разреженным пологом при сохранении относительно высокой древесной составляющей, даже после прореживания. Увеличение проективного покрытия трав и их листовой поверхности на хорошо освещённых участках приводит к увеличению поглощения  $CO_2$  в дневное время, тогда как снижение плотности деревьев и частичное уменьшение толщины подстилки ограничивает объём дыхания субстрата. В результате при тех же температурах почвы и сходной влагоёмкости ( $\approx 0,39\text{--}0,40 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) суммарный нетто-экосистемный обмен  $CO_2$  в почвенно-приземном комплексе оказывается минимальной.

Данный вывод согласуется с результатами исследований в сосновых лесах Китая, где умеренное прореживание способствовало увеличению биомассы не только верхнего, но и нижнего яруса за счёт улучшения светового режима и почвенных условий [26]. Авторы отмечают, что увеличение освещённости и разнообразия подлеска являются ключевыми факторами, стимулирующими продуктивность нижних ярусов.

В варианте с более сильным прореживанием (800 шт./га) реакция была более сложной. Удельные потоки  $NEE$  и  $R_{eco}$  в среднем снижались относительно контроля, однако летом фиксировались высокие положительные значения  $NEE$ , сопоставимые с контролем, прежде всего в августе ( $477 \pm 85 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ ). Подобное увеличение эмиссии можно объяснить благоприятным сочетанием абиотических факторов: август характеризовался относительно обильными осадками сезона (113 мм/мес.) при высокой температуре почвы ( $\approx 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и влажностью почвы  $0,39\text{--}0,40 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , оптимальными для микробной активности. В этот же период происходит отмирание надземной части травяного покрова, обильно развившегося под пологом разреженного древостоя, что обеспечивало дополнительный приток свежего лабильного органического вещества в верхние горизонты почвы и подстилку. В таких условиях поступление большого количества легкоразлагаемого растительного материала могло стимулировать гетеротрофное дыхание микроорганизмов и усиливать эмиссию  $CO_2$ , частично компенсируя эффект повышения фотосинтеза трав. Подобный краткосрочный всплеск эмиссии после нарушения древостоя описан и в других исследованиях по березовым и хвойным молоднякам [16, 28]. Однако, как показывают долгосрочные исследования, в перспективе (10 лет и более) прореживание способствует перераспределению углерода в более стабильные пулы и может повысить общий секвестрационный потенциал насаждения [32].

Связь потоков  $CO_2$  с температурой и увлажнением хорошо согласуется с результатами многолетних работ по почвенному дыханию в умеренном климате. Максимумы  $R_{eco}$  и  $NEE$  во всех вариантах приходят-

ся на период сочетания высоких температур воздуха и почвы ( $\approx 18^\circ\text{C}$ ) и достаточного увлажнения почвы, когда отсутствует дефицит влаги. Весной и осенью снижение потоков сопровождается понижением температуры и, в меньшей степени, уменьшением доступной влаги. При этом межвариантные различия по NEE и Reso сохраняются на протяжении всего сезона, что позволяет рассматривать структуру насаждения и развитие травяного яруса как доминирующий фактор регулирования газообмена на временном горизонте первых лет после прореживания.

Полученные значения NEE в почвенно-приземном комплексе сопоставимы с данными по другим поставленным березнякам, где при низком проективном покрытии трав NEE устойчиво положителен, а по мере развития травяного яруса возможен переход к околонулевому или слабостокковому режиму [23, 34]. При увеличении проективного покрытия травяного яруса (в нашем случае – за счет инсоляции) возможны околонулевые или слабоотрицательные значения NEE. Осенью же может наблюдаться положительный рост NEE, связанный с разложением свежего опада и усилением гетеротрофного дыхания [7].

В нашем случае контрольная площадка с минимальным травостоем демонстрировала максимальную эмиссию  $\text{CO}_2$ , тогда как умеренное прореживание до 1000 шт./га переводило систему в состояние заметно меньшего источника углерода при сохранении функций древесного яруса.

Важно отметить, что NEE, измеренное камерным методом в данном исследовании, не эквивалентно чистой экосистемной продуктивности всей экосистемы, поскольку учитывает только травяной ярус и почвенно-подстилочный комплекс, но не включает фотосинтез древесного яруса. По данным Кургановой и др. [8], эмиссия  $\text{CO}_2$  из почвы под древесной растительностью за летний сезон составила 268–282  $\text{гСм}^{-2}$ , в то время как чистая экосистемная продуктивность (NEE), измеренная методом турбулентных пульсаций в разнотравном березняке летом 2024 г., была отрицательной и составила  $-2,14 \text{ гСм}^{-2}$ , а общий сток углеро-

да за июнь–август 2024 г. оценивался в 160–180  $\text{гСм}^{-2}$ . Эти данные подтверждают, что зарастающие березой бывшие пахотные земли являются устойчивым стоком углерода, способствуя снижению парникового эффекта [8].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа, выполненная в контексте актуальной проблемы повышения углеродного потенциала экосистем заброшенных сельскохозяйственных земель, подтвердила, что управление их структурой через прореживание является эффективным инструментом воздействия на углеродный баланс. В связи с поставленной целью оценки влияния прореживания на нетто-экосистемный обмен  $\text{CO}_2$  установлено, что прореживание древостоя до целевой плотности 1000 шт./га способствует наиболее существенному снижению удельных потоков углекислого газа в почвенно-приземном комплексе по сравнению с контролем, что объясняется развитием фотосинтетически активного травяного яруса. В то же время, прореживание до 800 шт./га в летний период может приводить к относительно высоким значениям чистого экосистемного обмена, вероятно, из-за усиления дыхательных процессов на фоне накопления легкоразлагаемой органики.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке природно-климатических проектов. Однако, учитывая длительность экосистемных откликов, для выявления устойчивых закономерностей и оптимизации режимов ухода необходим более продолжительный цикл наблюдений.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на тему «Оценка объёма эмиссии и поглощения парниковых газов репрезентативными типами экосистем на участках Евразийского карбонового полигона и поиск оптимальных технологических решений для декарбонизации Республики Башкортостан» (Номер для публикации: FEUR-2024-0007).

## ЛИТЕРАТУРА

### Список русскоязычной литературы

1. Глаголев МВ, Сабреков АФ, Казанцев ВС. Измерение газообмена на границе почва/атмосфера. Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета; 2010.
2. Глаголев МВ, Филиппов ИВ. Измерение потоков парниковых газов в болотных экосистемах. Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет; 2011.
3. Дёмин ЕА, Миллер СС. Влияние температуры и влажности почвы на продуцирование диоксида углерода под действием различных способов основной обработки в условиях Зауралья. *Зерновое хозяйство России*. 2025;17(1):98-105. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-98-105.

4. Дубровина ИА, Мошкина ЕВ, Туунен АВ, Геникова НВ, Карпечко АЮ, Медведева МВ. Динамика свойств почв и экосистемные запасы углерода при разных типах землепользования (средняя тайга Карелии). Почвоведение. 2022;(9):1112-1125. DOI: 10.31857/S0032180X22090052.
5. Карелин ДВ, Люри ДИ, Горячкин СВ, Лулин ВН, Кудиков АВ. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи. Почвоведение. 2015;(11):1354. DOI: 10.7868/S0032180X1511009X.
6. Курганова ИН, Лопес де Гереню ВО, Мякшина ТН, Сапронов ДВ, Хорошаев ДА, Аблеева ВА. Температурная чувствительность дыхания почв луговых ценозов в зоне умеренно-континентального климата: анализ данных 25-летнего мониторинга. Почвоведение. 2023;(9):1059-1076. DOI: 10.31857/S0032180X23600476.
7. Курганова ИН, Лопес Де Гереню ВО, Хорошаев ДА, Мякшина ТН, Сапронов ДВ, Жмурич ВА, Кудеяров ВН. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов. Почвоведение. 2020; (10):1220-1236. DOI 10.31857/S0032180X20100111.
8. Курганова ИН, Маханцева ВА, Лебедева ТН, Лопес Де Гереню ВО, Кивалов СН, Волкова ТЮ, Ходжаева АК, Сапронов ДВ, Хорошаев ДА, Соколов ДА, Зинякова НБ, Митрохина ЕС, Личко ВИ, Семенов ВМ. Оценка основных пулов и потоков углерода в экосистеме постагрогенного березового леса на эколого-климатической станции «Пушино». Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В.А. Ковды, г. Пушино. 2024:17-19.
9. Наквасина ЕН, Шумилова ЮН. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях. Изв. вузов. Лесн. журн. 2021;(1):46-59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.
10. Перепечина ЮИ, Глушенков ОИ, Корсиков РС. Оценка лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения в Брянской области. Лесотехнический журнал. 2015;5(1):74-84. DOI 10.12737/11265.
11. Терехин ЭА. Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи. Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022;86(4):594-604. DOI: 10.31857/S2587556622040112.
12. Туктамышев ИР, Федорова ЮА, Федоров НИ, Широких ПС. Закономерности современного использования заброшенных сельскохозяйственных земель в широколиственно-лесной и лесостепной зонах Республики Башкортостан. Экобиотех. 2022;5(3):152-160. DOI: 10.31163/2618-964X-2022-5-3-152-160.
13. Халилов ИИ, Хуснутдинов ИИ, Мирсияпов НИ, Гайсин РХ, Мухаметшина АР, Мусин ХГ. Изучение произрастания основных лесобразующих пород на неиспользуемых землях сельскохозяйственного назначения Республики Татарстан в контексте лесомелиорации и лесоразведения. International agricultural journal. 2025;68(2):679-700. DOI: 10.55186/25880209\_2025\_9\_2\_21.
14. Чумбаев АС, Прохорова НА, Миллер ГФ, Шарков ИН. Эмиссия CO<sub>2</sub> из почв репрезентативных экосистем лесостепи Западной Сибири. Материалы международной конференции «Enviromis 2024». Томск. 2024:115-118.

#### Общий список литературы/Reference List

1. Glagolev MV, Sabrekov AF, Kazantsev VS. [Measuring gas exchange at the soil/atmosphere interface]. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta; 2010.
2. Glagolev MV, Filippov IV. [Measuring greenhouse gas fluxes in wetland ecosystems]. Khanty-Mansiysk: Yugorskiy gosudarstvennyy universitet; 2011.
3. Demin EA, Miller SS. [The influence of soil temperature and moisture on carbon dioxide production under various primary tillage methods in the Trans-Urals region]. Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2025;17(1):98-105. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-98-105.
4. Dubrovina IA, Moshkina EV, Tuyunen AV, Genikova NV, Karpechko AYU, Medvedeva MV. [Dynamics of soil properties and ecosystem carbon stocks under different types of land use (middle taiga of Karelia)]. Pochvovedenie. 2022;(9):1112-1125. DOI: 10.31857/S0032180X22090052.
5. Karelin DV, Lyuri DI, Goryachkin SV, Lunin VN, Kudikov AV. [Changes in soil carbon dioxide emission during post-agrogenic succession in the chernozem forest-steppe]. Pochvovedenie. 2015;(11):1354. DOI: 10.7868/S0032180X1511009X.
6. Kurganova IN, Lopes de Gerenyu VO, Myakshina TN, Sapronov DV, Khoroshev DA, Ableeva VA. [Temperature sensitivity of soil respiration in meadow communities in the temperate continental climate zone: analysis of 25-year monitoring data]. Pochvovedenie. 2023;(9):1059-1076. DOI: 10.31857/S0032180X23600476.

7. Kurganova IN, Lopes De Gerenyu VO, Khoroshev DA, Myakshina TN, Sapronov DV, Zhmurin VA, Kudayarov VN. [Analysis of long-term dynamics of soil respiration in forest and meadow communities of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in light of modern climate trends]. *Pochvovedenie*. 2020;(10):1220-1236. DOI 10.31857/S0032180X20100111.
8. Kurganova IN, Makhantseva VA, Lebedeva TN, Lopes De Gerenyu VO, Kivalov SN, Volkova TYu, Khodzhaeva AK, Sapronov DV, Khoroshev DA, Sokolov DA, Zinyakova NB, Mitrokhina ES, Lichko VI, Semenov VM. [Assessment of the main carbon pools and fluxes in the ecosystem of post-agrogenic birch forest at the Pushchino ecological and climatic station]. *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 120-letiyu so dnya rozhdeniya chl.-korr. AN SSSR V.A. Kovdy, g. Pushchino*. 2024;17-19.
9. Nakvasina EN, Shumilova YuN. [Dynamics of carbon stocks during forest formation on post-agrogenic lands]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*. 2021;(1):46-59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.
10. Perepechina YuI, Glushenkov OI, Korsikov RS. [Assessment of forests located on agricultural lands in the Bryansk region]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2015;5(1):74-84. DOI 10.12737/11265.
11. Terekhin EA. [Features of reforestation on fallow lands of the Central Russian forest-steppe]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2022;86(4):594-604. DOI: 10.31857/S2587556622040112.
12. Tuktamyshev IR, Fedorova YuA, Fedorov NI, Shirokikh PS. [Patterns of modern use of abandoned agricultural lands in the broadleaf forest and forest-steppe zones of the Republic of Bashkortostan]. *Ekobiotekh*. 2022;5(3):152-160. DOI: 10.31163/2618-964X-2022-5-3-152-160.
13. Khalilov II, Khusnutdinov II, Mirsiyapov NI, Gaysin RKh, Mukhametshina AR, Musin KhG. [Study of the growth of the main forest-forming species on unused agricultural lands of the Republic of Tatarstan in the context of forest reclamation and afforestation]. *International agricultural journal*. 2025;68(2):679-700. DOI: 10.55186/25880209\_2025\_9\_2\_21.
14. Chumbaev AS, Prokhorova NA, Miller GF, Sharikov IN. [CO<sub>2</sub> emission from soils of representative forest-steppe ecosystems of Western Siberia]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Enviromis 2024»*. Tomsk. 2024:115-118.
15. Angst G, Pokorný J, Mueller CW, Prater I, Preusser S, Kandeler E, Meador T, Straková P, Hájek T, van Buiten G, Angst Š. Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation. *Soil Biology and Biochemistry*. 2021;159:108302. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108302.
16. Aun K, Kukumägi M, Varik M, Becker H, Aosaar J, Uri M, Buht M, Uri V. Short-term effect of thinning on the carbon budget of young and middle-aged silver birch (*Betula pendula* Roth) stands. *Forest Ecology and Management*. 2021;480:118660. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118660.
17. Chen Z, Yu G, Wang Q. Effects of climate and forest age on the ecosystem carbon exchange of afforestation. *J. For. Res.* 2020;31:365-374. DOI: 10.1007/s11676-019-00946-5.
18. Cojzer M, Diaci J, Brus R. Tending of Young Forests in Secondary Succession on Abandoned Agricultural Lands: An Experimental Study. *Forests*. 2014;5(11):2658-2678. DOI: 10.3390/f5112658.
19. Davison AC, Hinkley DV. *Bootstrap methods and their application*. Cambridge: Cambridge University Press; 1997. 582 p.
20. Dłużewski P, Wiatrowska K, Kuśmierz S. The Role of Stand Age in Soil Carbon Dynamics in Afforested Post-Agricultural Ecosystems: The Case of Scots Pine Forests in Dfb-Climate Zone. *Forests*. 2024;15(12):2127. DOI: 10.3390/f15122127.
21. Fayet CMJ, Reilly KH, Van Ham C, Verburg PH. What is the future of abandoned agricultural lands? A systematic review of alternative trajectories in Europe. *Land Use Policy*. 2022;112:105833. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105833.
22. Fedorov N, Shirokikh P, Zhigunova S, Baisheva E, Tuktamyshev I, Bikbaev I, Urazgildin R, Kulagin A, Suleymanov R, Gabbasova D, Muldashev A, Maksyutov S. Dynamics of Biomass and Carbon Stocks during Reforestation on Abandoned Agricultural Lands in Southern Ural Region. *Agriculture*. 2023;13(7):1427. DOI: 10.3390/agriculture13071427.
23. Gawęda T, Błońska E, Małek S. Soil Organic Carbon Accumulation in Post-Agricultural Soils under the Influence Birch Stands. *Sustainability*. 2019;11(16):4300. DOI: 10.3390/su11164300.
24. Gong C, Tan Q, Liu G, Xu M. Forest thinning increases soil carbon stocks in China. *Forest Ecology and Management*. 2021;482:118812. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118812.
25. Lagomarsino A, Elio Agnelli A. Influence of vegetation cover and soil features on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in northern Finnish Lapland. *Polar Science*. 2020;24:100531. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100531.
26. Liu F, Liu X, Zeng M, Li J, Tan C. Thinning Effects on Aboveground Biomass Increments in Both the

- Overstory and Understory of Masson Pine Forests. *Forests*. 2024;15(7):1080. DOI: 10.3390/f15071080.
27. McGunnigle NK, Bardsley DK, Nuberg IK. Rewilding in the developing world as an alternative development pathway: The example of forest regeneration in the middle hills of Nepal. *Environmental Development*. 2025;55:101225. DOI: 10.1016/j.envdev.2025.101225.
  28. Meng Y, Zhang Y, Li C, Wang Z, Li Y. The Effect of Thinning Management on the Carbon Density of the Tree Layers in Larch--Birch Mixed Natural Secondary Forests of the Greater Khingan Range, Northeastern China. *Forests*. 2022;13(7):1035. DOI: 10.3390/f13071035.
  29. Pan Y, Birdsey RA, Phillips OL, Houghton RA, Fang J, Kauppi PE, Keith H, Kurz WA, Ito A, Lewis SL, Nabuurs G, Shvidenko A, Hashimoto S, Lerink B, Schepaschenko D, Castanho A, Muryarso D. The enduring world forest carbon sink. *Nature*. 2024;631:563-569. DOI: 10.1038/s41586-024-07602-x.
  30. Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T, Havránková K, Iivesniemi H, Janous D, Knohl A, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Matteucci G, Valentini R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*. 2005;11:1424-1439.
  31. Rytter RM, Rytter L. Carbon sequestration at land use conversion – Early changes in total carbon stocks for six tree species grown on former agricultural land. *Forest Ecology and Management*. 2020;466:118129. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118129.
  32. Sandim A, Lopes D, Louzada JL, Silva ME. Influence of Thinning on Carbon Balance in Natural Regeneration of *Pinus pinaster* in Portugal. *Land*. 2025;14(3):493. DOI: 10.3390/land14030493.
  33. Skovsgaard JP, Johansson U, Holmström E, Tune RM, Ols C, Attocchi G. Effects of Thinning Practice, High Pruning and Slash Management on Crop Tree and Stand Growth in Young Even-Aged Stands of Planted Silver Birch (*Betula pendula* Roth). *Forests*. 2021;12(2):225. DOI: 10.3390/f12020225.
  34. Varik M, Kukumägi M, Aosaar J, Becker H, Ostonen I, Lõhmus K, Uri V. Carbon budgets in fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) chronosequence stands. *Ecological Engineering*. 2015;77:284-296. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.01.041.
  35. Voicu M, Shaw C, Kurz W, Huffman T, Liu J, Fellows M. Carbon dynamics on agricultural land reverting to woody land in Ontario, Canada. *Journal of Environmental Management*. 2017;193:318-325. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.019.

