

Научная статья
УДК 630.182.21
EDN IGFWTH
DOI 10.24419/LNI.2304-3083.2025.2.03

Влияние различных факторов на углеродный цикл в дубравах лесостепи и степи европейской части России

Александр Леонидович Мусиевский¹

кандидат сельскохозяйственных наук

Анастасия Сергеевна Бушуева²

Аннотация. На основе литературных источников проанализировано влияние различных факторов на углеродный цикл в дубравах лесостепного района и района степей европейской части Российской Федерации. Происходящие климатические изменения оказывают существенное воздействие на процесс депонирования углерода и скорость разложения органического вещества в почве, что приводит к повышению уровня эмиссии и снижению стока углекислого газа лесными экосистемами, содействует увеличению случаев возникновения лесных пожаров, числа и длительности засух при минимальном количестве осадков. Важнейшими факторами внешнего воздействия на цикл углерода являются лесные пожары и другие повреждения лесов, осуществление различных лесохозяйственных мероприятий, из которых только лесовосстановление и лесоразведение способствуют ежегодному накоплению запасов углерода в лесных экосистемах. В связи с этим их объёмы в условиях лесостепи и степи европейской части России (ЕЧР) следует существенно увеличить, сделав акцент на облесении, прежде всего, овражно-балочной сети, берегов рек и водоёмов, земель, не пригодных для сельскохозяйственного производства. Вследствие меняющейся экологической ситуации в ЕЧР, средообразующие и защитные функции леса, а также ведение хозяйства на «углерод» становятся приоритетными по сравнению с ресурсно-сырьевыми, превышая их по стоимости в несколько раз.

Ключевые слова: углеродный цикл, дубравы, степь, лесостепь, лесохозяйственные мероприятия.

Для цитирования: Мусиевский А.Л., Бушуева А.С. Влияние различных факторов на углеродный цикл в дубравах лесостепи и степи европейской части России. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2025. № 2. С. 37–58. DOI 10.24419/LNI.2304-3083.2025.2.03. <https://elibrary.ru/igfwth>.

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, старший научный сотрудник, доцент (Воронеж, Российская Федерация), musievsky@mail.ru

² Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, магистрант (Воронеж, Российская Федерация); Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, инженер (Воронеж, Российская Федерация), bushueva.anst@yandex.ru

Original article

EDN IGFWTH

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2025.2.03

The Influence of Various Factors on the Carbon Cycle in the Oak Forests of the Forest-Steppe and Steppe of the European part of Russia

Alexander L. Musievsky¹

Candidate of Agricultural Sciences

Anastasia S. Bushueva²

Abstract. On the basis of literary sources, the influence of various factors on the carbon cycle in the oak forests of the forest-steppe region and the steppe region of the European part of the Russian Federation is analyzed. The ongoing climatic changes have a significant impact on the process of carbon deposition and the rate of decomposition of organic matter in the soil, which leads to an increase in emissions and a decrease in carbon dioxide runoff by forest ecosystems, contributes to an increase in the occurrence of forest fires, the number and duration of droughts with minimal precipitation. The most important factors of the external impact on the carbon cycle are forest fires and other damage to forests, the implementation of various forestry activities, of which only reforestation and afforestation contribute to the annual accumulation of carbon reserves in forest ecosystems. In this regard, their volumes in the conditions of the forest-steppe and steppe of the European part of Russia (EDR) should be significantly increased, emphasizing.

Key words: carbon cycle, oak forests, steppe, forest-steppe, forestry activities.

For citation: Musievsky A., Bushueva A. The Influence of Various Factors on the Carbon Cycle in the Oak Forests of the Forest-Steppe and Steppe of the European part of Russia. – Text : electronic // Forestry Information. 2025. № 2. P. 37–58. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2025.2.03. <https://elibrary.ru/igfwth>.

¹ All-Russian Scientific Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Senior Researcher, Associate Professor (Voronezh, Russian Federation), musievsky@mail.ru

² Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Master's Student (Voronezh, Russian Federation); All-Russian Scientific Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Engineer (Voronezh, Russian Federation) bushueva.anst@yandex.ru

Введение

Выявление факторов, оказывающих влияние на углеродный цикл в лесных насаждениях, – актуальная проблема современного лесоводства не только в нашей стране, но и за рубежом. Лесорастительные условия, включающие в себя комплекс почвенных, гидрологических и климатических факторов, являются основополагающими для формирования баланса углерода (С), в том числе на землях лесного фонда лесостепного района и района степей европейской части России (ЕЧР). При этом климатические изменения уже сейчас оказывают существенное влияние как на процесс депонирования углерода, так и на скорость разложения органического вещества в почве, что приводит к повышению уровня эмиссии углекислого газа [1]. Повышение среднегодовых температур и количества осадков влияет на перераспределение запасов углерода и азота в органической форме: происходит нарастание запасов этих элементов в пулах фитомассы одновременно с обеднением пула почвы [2]. В то же время расчёты показывают, что на глобальном уровне у естественных ценозов существует баланс поглощения (4,4 Гт С/год) CO_2 и эмиссии (4,3 Гт С/год) [3].

В лесах любого региона к факторам внешнего воздействия на углеродный цикл относятся лесные пожары и другие повреждения лесов, а также осуществление различных лесохозяйственных мероприятий, влияющих на круговорот углерода в лесных экосистемах. Подобные негативные нарушения приводят к гибели или деградации лесных насаждений и, как следствие, к потерям запасов углерода в результате эмиссии парниковых газов в атмосферу. Повышение качества управления лесами путём осуществления устойчивого неистощительного их использования, основанного на эффективном лесовосстановлении и лесоразведении, оптимизации системы рубок, улучшении охраны лесов от пожаров и защиты от вредителей и болезней, позволит существенно снизить воздействие неблагоприятных факторов на леса и тем самым оказать положительное влияние на углеродный баланс и адаптацию лесных фитоценозов к изменению климата [2, 4].

В долгосрочной перспективе климат является одним из важнейших факторов, формирующих лесную экосистему [1]. Изменение гидрометеорологических показателей оказывает непосредственное влияние на физиологические процессы живых организмов, в том числе на процессы фотосинтеза и образования биологической продукции. К концу XXI в. ожидается существенное увеличение концентрации CO_2 в атмосфере и повышение среднегодовой температуры на 1,8–4,0 °С, которое в глобальном масштабе может привести к росту частоты и длительности засух в сочетании с минимальным количеством осадков, увеличению случаев возникновения лесных пожаров, нарушениям почвенно-гидрологического режима и другим негативным последствиям. При этом адаптация растительности будет происходить с отставанием от климатических изменений. В лесостепи ЕЧР повышение среднегодовой температуры до середины XXI в. будет сопровождаться некоторым ростом количества осадков, поэтому в составе насаждений возможно увеличение доли мягколиственных пород (осины и берёзы), а также дуба и его спутников. В степи ЕЧР в первой половине XXI в. может возрасти показатель лесистости за счет создания благоприятных условий для распространения древесно-кустарниковой растительности по долинам и балкам, а также роль сосны, особенно на песчаных грунтах [1].

Вероятность изменения аридности климата до середины XXI в. в ЕЧР не высока, однако к концу XXI в. в лесостепи и степи ЕЧР ожидается ее усиление. Прогнозируется и существенное снижение гидрологических ресурсов, особенно в южной части Восточно-Европейской равнины. Поэтому здесь следует не допускать значительного увеличения хозяйственных нагрузок на лесные экосистемы, что может создать дополнительные условия для катастрофического опустынивания на юге ЕЧР [1].

Уже сейчас на изучаемой территории наблюдается резкое колебание температурных показателей (сильные морозы и резкие оттепели зимой, рост числа очень жарких дней летом), увеличение количества и продолжительности засух,

других неблагоприятных погодных явлений, неравномерность выпадения осадков.

Цель исследования – на основе обобщения опубликованных результатов научных исследований проанализировать особенности углеродного цикла в дубравах лесостепи и степи ЕЧР и влияние на него различных факторов в условиях климатических изменений.

Объекты и методы исследований

Данная статья представляет собой обзор, который охватывает научные публикации за последние 30 лет, касающиеся углеродного цикла и влияющих на него факторов в семенных и порослевых дубравах лесостепного лесного района и района степей ЕЧР в условиях меняющегося климата. Обзор включает результаты современных исследований влияния на углеродный цикл различных природных и антропогенных факторов в 11-ти субъектах ЕЧР лесостепного района (Белгородская, Курская, Липецкая, Тамбовская, Орловская и Пензенская области) и района степей (Волгоградская и Ростовская области), причём некоторые субъекты входят в состав обоих районов (Воронежская, Самарская и Саратовская области). Сделанные выводы могут быть использованы при ведении лесного хозяйства в дубравах (сохранение семенных дубрав, перевод порослевых дубрав в семенные, оптимизация рубок ухода, санитарных и выборочных рубок, защита лесов и охрана их от пожаров, лесовосстановление и лесоразведение) лесостепного лесного района и района степей ЕЧР.

Результаты и обсуждение

Климатические и почвенные условия лесостепи и степи ЕЧР

Важнейшими факторами, влияющими на углеродный цикл в лесных экосистемах, в том числе в дубравных, являются климатические и почвенные условия произрастания растительности.

Климат лесостепи ЕЧР относится к переходному от умеренно-влажного лесного к засушливому степному. Испаряемость здесь преобладает над осадками, запасы тепла возрастают к югу с одновременным сокращением атмосферного увлажнения. Годовая сумма среднесуточных температур более 10 °С – 2 400–2 600 °С, количество осадков – 500–560 мм, среднегодовая температура – 5,2 °С, гидротермический коэффициент – 1,0–1,1, вероятность полусушливых и засушливых лет составляет от 30 до 50%, что ведет к постепенному исчезновению лесов на элювиальных формах рельефа. Сейчас менее 15% территории лесостепи занято древесной растительностью, большая часть которой приходится на земли сельскохозяйственного назначения. Фитомасса лиственных лесов значительно выше, чем полевых агроценозов, и в зависимости от возраста составляет от 1 000 до 5 000 ц/га. С лесным опадом на поверхность почвы ежегодно поступает от 20 до 300 ц/га сухого вещества, включающего от 50 до 700 кг/га зольных элементов, 50–90 кг/га азота и 70–100 кг/га кальция, что создает условия для формирования плодородных чернозёмовидных почв. При перемещении на юг постепенно снижается лесистость, климат становится жарче, осадков – меньше; лесостепь переходит в степь [5].

Климат степи ЕЧР характеризуется большей засушливостью: лето жаркое, средняя температура самого тёплого месяца – 21,4 °С, среднегодовая температура – 6,1 °С, годовая сумма среднесуточных температур более 10 °С – 2 600–2 800 °С, годовое количество осадков – 450–500 мм, большая их часть выпадает летом с максимумом в его первой половине, гидротермический коэффициент – 0,9–1,0. Дожди бывают редко, чаще всего в виде коротких ливней, которые слабо увлажняют землю, но смывают верхний плодородный слой почвы, усиливая образование оврагов. Часто наблюдаются засухи, суховеи, пыльные бури [5].

На севере чернозёмные степи примыкают к лесостепи, южнее они переходят в сухие степи с каштановыми почвами. Покрытых лесом участков в степи меньше, чем в лесостепи. Лес здесь располагается интразонально по пониженным

элементам рельефа, балкам (байрачные леса), в поймах рек (пойменные леса), микропонижениях (степные колки).

Из-за дефицита древесины леса в степи начали создавать еще в конце XVII в., преимущественно посевом лесных семян. Россия считается родиной степного лесоразведения, что подтверждается многими положительными примерами. Так, в Арчединском лесничестве Волгоградской обл. в условиях сухой степи за 100 лет был создан искусственный лес, преимущественно из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), на площади более 40 тыс. га. Всего, по данным М.А. Цветкова [6], с 1706 по 1914 г. в степной зоне России было создано 600 тыс. га лесных культур разного назначения. С 1917 по 1947 г. – 1 403 тыс. га полезащитных лесных насаждений (лесные полосы, облесение оврагов, балок, песков). Необходимо учитывать, что современное безлесье степей в значительной степени обусловлено рубкой лесов и распашкой этих территорий под сельскохозяйственные культуры.

В целом территория лесостепи и степи ЕЧР характеризуется недостаточным и неустойчивым увлажнением. При этом в последние десятилетия наблюдается стремительное потепление климата, в том числе в районе степей и лесостепном районе ЕЧР. Происходящие изменения температуры воздуха и количества осадков могут существенно сказаться на росте и развитии древесно-кустарниковой растительности. Температура воздуха оказывает влияние на физиологические процессы в растениях, на урожайность и качество семян, воздействует на цветение, распускание почек и созревание семян. Она определяет и процессы экосистемного уровня (рис. 1), замедляя или ускоряя деградацию и минерализацию почвы. Количество доступной влаги опосредованно воздействует на продуктивность фитоценозов и в целом на углеродный баланс лесной экосистемы. С одной стороны, её влияние на лесные экосистемы уже сейчас проявляется в увеличении содержания CO_2 в атмосфере, что при наличии достаточного количества влаги может привести к повышению продуктивности отдельных древесных пород

и эффективности использования воды некоторыми видами растений, но, с другой стороны, – это может способствовать изменению характеристик почв и экологическим нарушениям, например, повышению частоты возникновения лесных пожаров, вспышек вредителей и болезней и варьированию соотношения различных видов растений в экосистемах.

При этом изменения могут накладываться, а возникновение одного фактора может стимулировать появление и развитие другого, часто более опасного. Так, засуха часто приводит к вспышкам численности насекомых-вредителей и пожарам. Следует отметить, что в условиях повышенной температуры воздуха и удвоенной концентрации углекислоты гомеостатическая приспособленность лиственных пород будет выше, чем у хвойных. В целом ответная реакция лесных экосистем степи и лесостепи на глобальное потепление может проявиться в следующем: смещении зон растительности, трансформации структуры и состава насаждений, уменьшении биоразнообразия, изменении продуктивности и водного режима почв, возрастании пожарной опасности, снижении количества и качества семян, влиянии на лесовозобновительный процесс, увеличении количества и площадей поврежденных лесов вредителями и болезнями, снижении устойчивости лесов [1].

По данным метеостанции «Красный кордон» Шипова леса (Воронцовское лесничество Воронежской обл.), среднегодовая температура воздуха за 91 год (с 1913 по 2004 г.) повысилась с 5,9 °С до 6,8 °С – на 0,9 °С. По данным Д.Н. Гарькуши и др. [8, 9], среднемесячная температура воздуха в Воронеже с 1989 по 2022 г. возросла на 2,03 °С.

Повышение температуры воздуха в условиях недостатка влаги неблагоприятно сказывается на продуктивности лесных экосистем района степей и лесостепного района ЕЧР. На рис. 2 и 3 показано, что с увеличением средней температуры воздуха происходит снижение радиального прироста в культурах дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) семенного происхождения в наиболее продуктивной снытьевой дубраве (ТЛУ D₂) на опытных объектах, расположенных в Воронцовском

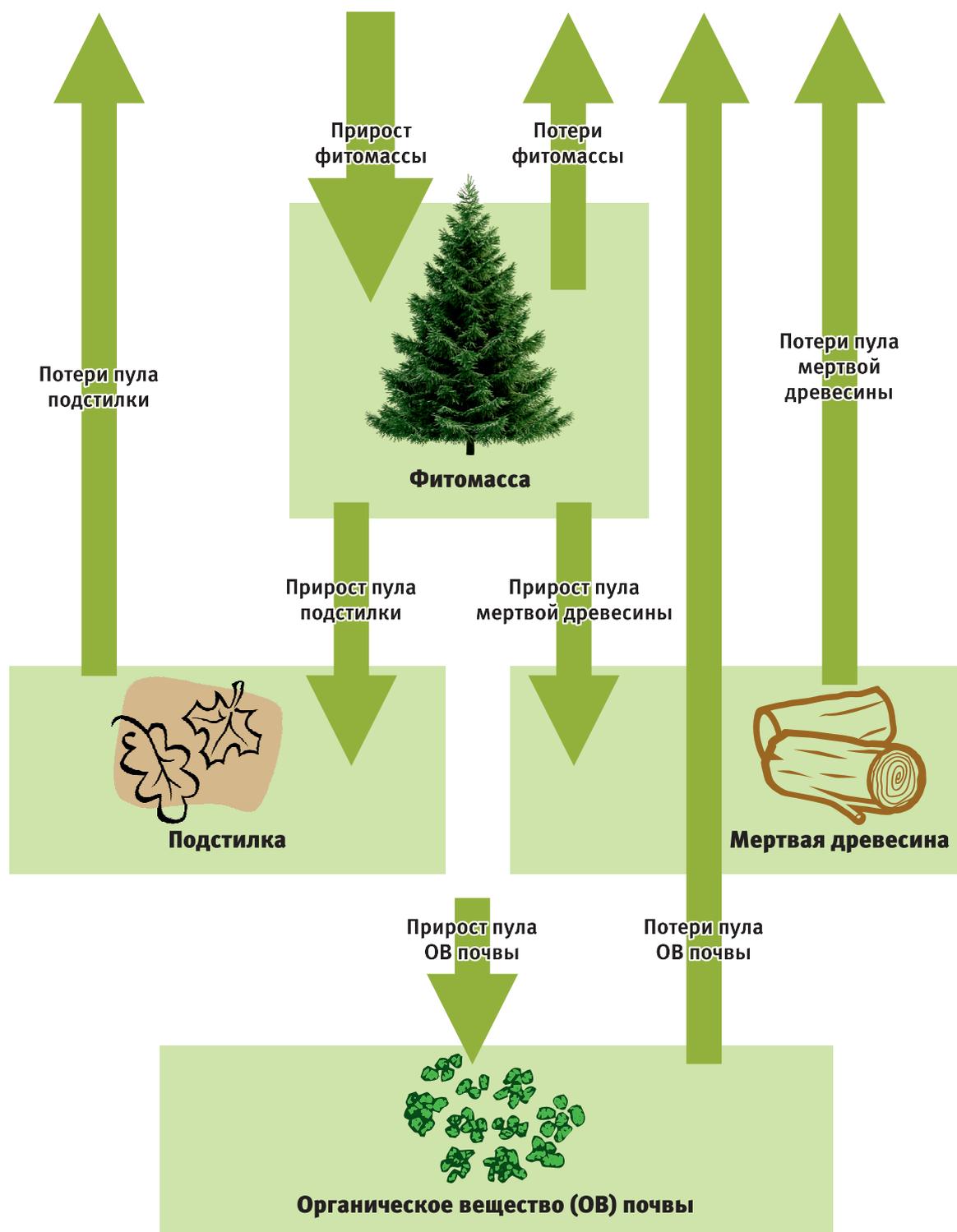


Рис. 1. СХЕМА БЮДЖЕТА УГЛЕРОДА ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ [7]

лесничестве (Шипов лес, степь) и в Пригородном лесничестве Воронежской обл. (Правобережная дубрава, лесостепь).

В вегетационный период между температурой воздуха и приростом существует обратно

пропорциональная связь – повышение температуры воздуха при недостатке влаги ведёт к уменьшению прироста древесины и снижению продуктивности древостоя [10, 11] (см. рис. 2 и 3). Математически зависимость между приростом

и летней температурой (см. рис. 3) выражается уравнением вида:

$$Y=0,42663 \times 10^{21,279/X},$$

где:

Y – индекс радиального прироста;

X – сумма среднемесячных летних температур воздуха, °С.

Слишком быстрое по сравнению с естественными природными процессами развитие климатических изменений оставляет не так много времени на адаптацию к ним лесных экосистем. Тем не менее определить первичную реакцию деревьев на изменение основных климатических показателей, хотя и с задержкой на один год, можно по величине прироста стволовой древесины, используя метод дендрохронологического анализа, основанный на взятии образцов древесины (кернах).

Согласно дендрохронологическим исследованиям Д.Г. Свиридова [12], в дубравах Центральной лесостепи ЕЧР текущий прирост достигает наибольшего значения в годы с близким к среднегодовым количеством осадков и суммой температур. Снижение прироста происходит

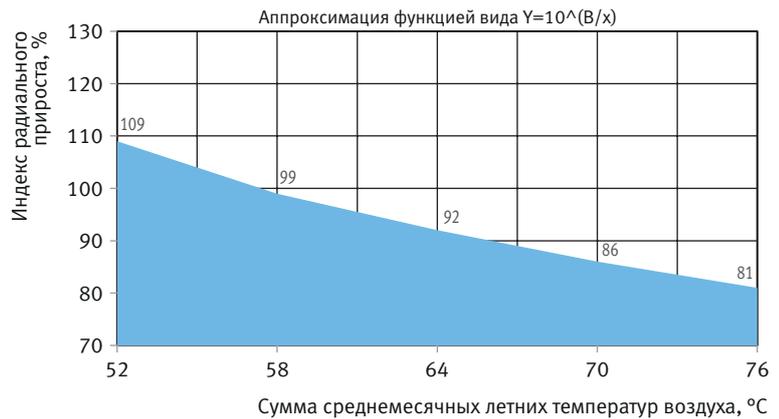


Рис. 2. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ИНДЕКСОМ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО И ЛЕТНЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА В СВЕЖЕЙ СНЫТЬЕВОЙ ДУБРАВЕ ШИПОВА ЛЕСА ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛ. [10]

в годы как с избытком, так и с недостатком влаги (при этом избыток осадков наиболее сказывается на приросте пойменных дубрав), а также вследствие резких изменений температуры воздуха. Самое негативное воздействие на прирост древостоев оказывают длительные засухи и избыточное увлажнение. Изменения прироста связаны с возрастом древостоев, колебаниями солнечной активности и динамики осадков как за вегетационный период, так и в целом за год, а в лесных экосистемах эти факторы влияют на

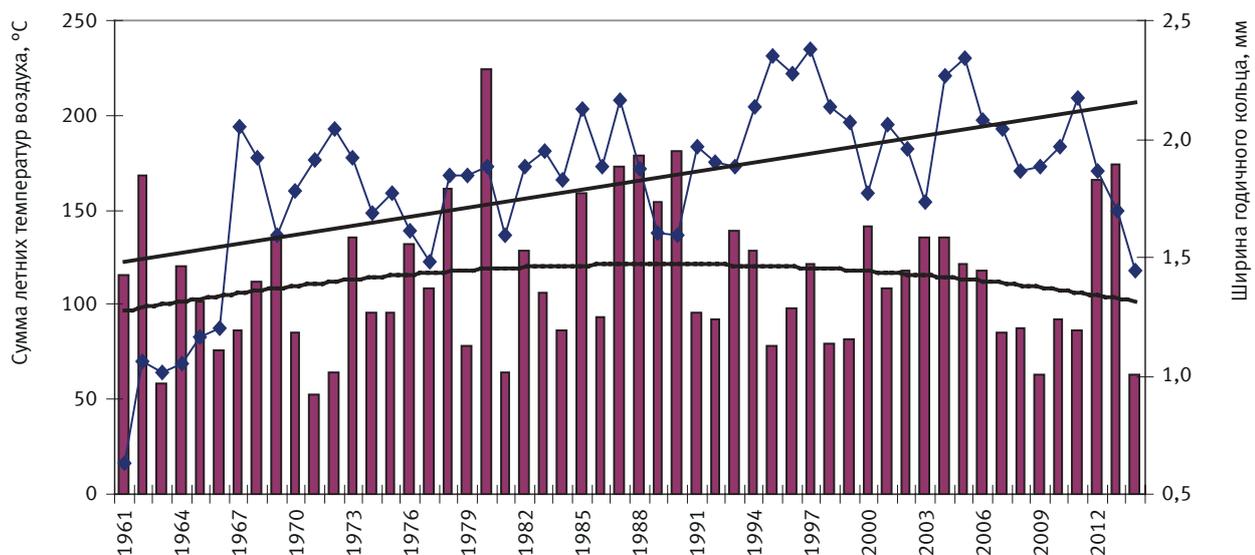


Рис. 3. ДИНАМИКА РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА И СУММЫ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ЛЕТНИХ ТЕМПЕРАТУР (СИНЯЯ КРИВАЯ) В ЛЕСОТИПОЛОГИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО СВЕЖЕЙ СНЫТЬЕВОЙ ДУБРАВЫ В ПРИГОРОДНОМ ЛЕСНИЦЕСТВЕ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛ. [11]

процесс стока углерода. Исследования показали, что обобщённая кривая динамики текущего прироста дуба по диаметру во всех типах лесорастительных условий зависит от особенностей увлажнения и совпадает с аналогичной кривой текущего прироста по диаметру сосны обыкновенной [12].

Особенности цикла углерода в дубравах лесостепи и степи в условиях потепления климата

Концентрация атмосферного CO_2 в настоящее время примерно на 40% выше, чем в доиндустриальную эпоху, варьируя по регионам. Рост деревьев под влиянием возросшего уровня CO_2 обычно ведёт к увеличению соотношения углерод/азот (C/N) вследствие снижения содержания азота в листьях и увеличения сопутствующих углеводов и фенолов. Эти изменения могут вызывать сдвиги в характере повреждения лесного полога и разложении органического вещества [13].

В последние годы, в связи с проблемой выброса в атмосферу большого количества парниковых газов (углекислый газ, метан и др.), лесные и другие природные экосистемы стали рассматриваться в новом для них аспекте. Сохранение и разведение лесов стало особенно важным как способ связывания (депонирования) атмосферного углерода, который позволяет хотя бы отчасти сбалансировать мощные выбросы углекислого газа в атмосферу.

Ряд учёных при оценке объёмов депонирования углерода лесными экосистемами лесостепного района и района степей ЕЧР [12, 14–23] используют методику, основанную на определении количества поглощаемого CO_2 и выделяемого O_2 при образовании единицы (1 т) сухого органического вещества (годового прироста древесины) в процессе фотосинтеза. Установленные по уравнению фотосинтеза величины поглощения CO_2 (1,823 т на 1 т сухой древесины) и выделения O_2 (1,393 т на 1 т сухой древесины) являются конверсионными коэффициентами

для определения этих показателей в целом для конкретных насаждений по текущему приросту древесины, выраженному в весовых единицах абсолютно сухого вещества. В процессе исследований были получены усреднённые показатели содержания углерода в фитоценозе: на древостой приходится 88%, в хвое и листьях содержится 5%, в сухостое и валежнике – 6%, в подросте, подлеске, живом напочвенном покрове – 1% [14]. В целом исходными показателями для количественной оценки экологических функций, включая кислородопродукционную и углерододепонирующую, а также энергии, аккумулированной в первичной продукции лесных экосистем, являются элементы их биологической продуктивности, выраженные в весовых единицах абсолютно сухого вещества [12, 14–21, 24–28].

В условиях лесостепи величина почвенного дыхания, играющего важную роль в углеродном цикле, колеблется от 1,5 до 5 т CO_2 /га/год. В целом годовой поток CO_2 из почв России варьирует от 0,5 т CO_2 /га/год в тундре и северной тайге до 9,4 т CO_2 /га/год на чернозёмах лесостепного района и района степей ЕЧР [29–31]. Большая часть CO_2 , выделяющегося при разложении подстилки, поступает в фитоценотическую толщу атмосферы, а меньшая может диффундировать в почву. При этом углекислота, диффундирующая в приземную толщу атмосферы, поглощается кронами древостоя в процессе фотосинтеза. Годичная продуктивность древостоев в лесных экосистемах прямо пропорциональна поглощению CO_2 [27].

По данным Л.Л. Голубятникова с соавт. [32], степные экосистемы на территории России являются резервуарами стока атмосферного углерода, средняя интенсивность которого составляет 231 ± 202 г CO_2 /га/год. Чистая первичная продукция в них изменяется от 813 ± 99 г CO_2 /га/год в зоне луговых степей до 328 ± 44 г CO_2 /га/год в опустыненных степях. Среднее значение микробного дыхания в степных почвах составляет 478 ± 95 г CO_2 /га/год, а общая эмиссия CO_2 , связанная с пожарами, может быть оценена в 30–40 Мт С ежегодно. В целом естественные степные экосистемы России ежегодно депонируют

111±97 Мт С, что составляет около 20% современного стока углерода в лесные экосистемы России, который оценивается в 530–595 Мт С/год [33].

Изменение климата оказывает существенное влияние на скорость разложения органического вещества в почве, что приводит к повышению уровня эмиссии углекислого газа. Оказалось, что для естественных ценозов эмиссия CO₂ почвой в течение вегетационного периода составляет 53–83% годовой [29].

Согласно расчётам, депонирование углерода приспевающими насаждениями колеблется от 0,1 т С/га/год у хвойных пород и 0,25 т С/га/год у твёрдолиственных до 0,65 т С/га/год у мягколиственных. Более точные данные могут быть получены только на основе системного подхода к лесному фитоценозу. На данный момент пока с недостаточной точностью определены запасы углерода в лесной подстилке, валежнике, сухостое и остатках корней, которые, в свою очередь, служат источником «дыхания» грибов, создающих значительную массу вторичной органотрофной продукции в лесах [3].

Эффективность углерододепонирующей и кислородопроизводящей функций древостоев находится в прямой зависимости от их продуктивности [20–22]. При этом полученные учёными данные свидетельствуют, что наиболее интенсивный текущий прирост древесины в порослевых дубравах ЕЧР отмечается в возрасте 15–25 лет, в семенных – в 30–50 лет [15, 17–19, 34].

В.И. Тереховым [21] для дубрав Курской обл. установлено, что увеличение запаса стволовой древесины в порослевых и семенных древостоях происходит различными темпами. Байрачная дубрава семенного происхождения до 120 лет имеет высокую энергию роста и отличается лучшим санитарным состоянием. За одинаковый промежуток времени дубрава семенного происхождения депонируют значительно большее количество углерода по сравнению с порослевыми. Превышение стока углекислого газа над его эмиссией отмечается с момента смыкания молодняков до возраста количественной спелости древостоев. В порослевой дубраве этот период находится

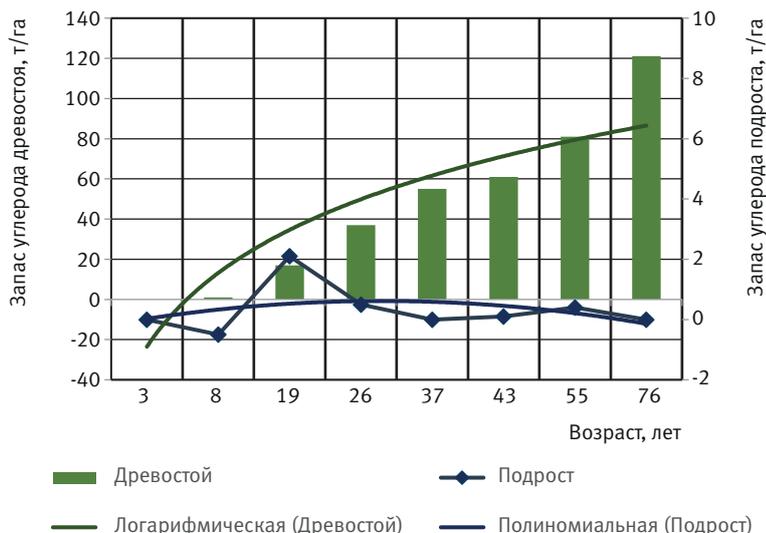


Рис. 4. ЗАПАС УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ СЕМЕННЫХ БАЙРАЧНЫХ ДУБРАВ КУРСКОЙ ОБЛ. [21]

в промежутке от 5 до 70 лет, в семенной – от 20 до 105 лет. На рис. 4 приведена динамика накопления углерода древостоем и подростом байрачных дубрав семенного происхождения. При этом запас углерода древостоя увеличивается с 0,72 т/га в 3 года до 122,5 т/га в 76 лет, а запас углерода подростка максимален в 19 лет (1,37 т/га), снижаясь до 0,02 т/га в 78 лет [21].

В ходе исследований В.И. Тереховым [21] выявлено, что семенная байрачная дубрава поглощает углекислый газ в 2 раза дольше по сравнению с порослевой, которая уже с 70 лет имеет отрицательный баланс CO₂ и становится источником его поступления в атмосферу. Суммарная масса кислорода, выделенного древостоем семенной байрачной дубравы, к 105-летнему возрасту в 1,44 раза больше (490 т/га) по сравнению с порослевой (340 т/га). Наиболее интенсивное его выделение в порослевой дубраве (2,82 т/га/год) приходится на возрастной период с 43 до 55 лет, а в семенной (6,83 т/га/год) – с 19 до 26 лет [21].

По данным учёта земель лесного фонда, площадь байрачных дубрав Курской обл. составляет 115,1 тыс. га и практически поровну распределяется между семенными (57,5 тыс. га) и порослевыми (57,6 тыс. га). Семенные дубравы представлены преимущественно древостоями 26–37-летнего возраста, большая часть

порослевых дубрав имеет возраст 65 лет и более. В силу различий в интенсивности прироста фитомассы, нетто-сток углекислого газа (разница между поглощением и выделением CO_2 в атмосферу) в биогеоценозах семенных байрачных дубрав лесостепного района Курской обл. составляет ежегодно 218,5 тыс. т, а порослевых дубрав – 144,0 тыс. т. Семенные дубравы области ежегодно выделяют в атмосферу 287,5 тыс. т кислорода, порослевые – 126,2 тыс. т. Следовательно, замена порослевых байрачных дубрав семенными оправдывает себя не только с точки зрения повышения их продуктивности, улучшения товарной структуры и санитарного состояния, но и позволяет более эффективно использовать экологические функции байрачных лесов, в том числе депонирование углерода и выделение кислорода. Расчёты показывают, что в Курской обл. замена порослевых дубрав семенными позволит улучшить баланс углекислого газа в 1,5 раза и повысить выделение кислорода в 1,8 раза [21].

Учитывая современное преобладание в ЕЧР площадей порослевых дубрав над семенными и продолжающийся процесс их деградации, считаем необходимым принять срочные меры по разработке рекомендаций, включающих конкретные способы и приёмы, а также их практическому применению с целью перевода порослевых насаждений в семенные, что, безусловно, окажет положительное влияние и на цикл углерода в данных экосистемах.

За последние несколько сотен лет количество углерода в наземных экосистемах уменьшилось, причём главными причинами являются рубка лесов и лесные пожары. Наибольшие изменения структуры экосистем и количества углерода связаны, главным образом, с уничтожением в XIX в. естественных первичных лесов, вместо которых появились возделываемые земли и вторичные леса, обладающие меньшей продуктивностью биомассы. Глобальное уменьшение биомассы (по углероду) лесных насаждений за последние 200 лет составило около 20%, т. е. весьма значительную долю атмосферного резервуара углерода. Известно, что величина биомассы экосистемы зависит не столько от продуктивности, сколько от

продолжительности жизни организмов и экосистемы. Большая биомасса характерна для лесных экосистем тропических лесов – 800–1 000 т/га, в лесах умеренной зоны она составляет 300–400 т/га, луговых травянистых сообществ – 3–5 т/га. Тенденция уменьшения биомассы сохраняется и в настоящее время. По разным оценкам, это уменьшение происходит со скоростью от $0,5 \times 10^9$ до $3,6 \times 10^9$ т С/год. Следует отметить возрастающие масштабы использования древесины в качестве топлива (на земном шаре на долю дров приходится около 60%). Потребление древесного топлива, рубку лесов, усиливающуюся минерализацию и эрозию почв можно считать дополнительными факторами, определяющими глобальную изменчивость резервуаров углерода [35, 36].

Ежегодный сток С в экосистемы России [3, 30, 35, 37] составляет около 4,4 Гт С/год (10% глобального стока в наземные экосистемы); микробное дыхание – 2,8 Гт С/год; почвенная эмиссия (лесные пожары, дыхание животных, разложение древесного детрита, продукция аграрного сектора, добыча торфа, известкование почв) – 0,8 Гт С/год. Эти показатели можно представить в виде уравнения $4,4 - (2,8 + 0,8) = 0,8$ Гт С/год. Величина, равная 0,8 Гт С/год, составляет количество углерода долговременного хранения в почве, а также в первичной продукции, в том числе в древесной фитомассе [37]. Физиологи установили, что каждый килограмм хлорофилла в ассимиляционном аппарате обеспечивает связывание около 145 кг атмосферного углерода NPP (в чистой первичной продукции) за вегетационный период. Средняя величина эмиссии углерода лесными почвами Центральной России – около 2–3 т С/га. Отсюда следует, что растительный покров, способный компенсировать почвенную эмиссию углерода, должен иметь величину хлорофилльного индекса (ХИ) не менее 13–20 кг. В настоящее время среднее по территории России значение ХИ составляет 22 кг/га, в том числе в лесостепи – 15 кг/га, что пока обеспечивает определённую стабильность процесса длительного хранения углерода [36].

Лесные ландшафты обладают природными механизмами относительно быстрого депонирования атмосферного углерода и имеют первостепенное значение в глобальном цикле углерода. Лесостепные ландшафты, вследствие небольшой лесистости (не более 10–11%) и значительно меньшей по сравнению с лесной зоной площади, по общему депонированию углерода занимают более скромное место. Для лесостепной и степной зон более целесообразным и перспективным является осуществление мероприятий, направленных на создание целевых лесных (энергетических) плантаций, и доведение показателя лесистости до оптимального (20–25%) с целью более полного использования имеющегося высокого углерододепонирующего потенциала лесных экосистем.

В настоящее время складывается критическая экологическая ситуация: в континентальной части биосферы содержание органического углерода не увеличивается, а уменьшается, причём его эмиссия в атмосферу по порядку величин приближается к выбросам от сжигаемого ископаемого топлива. В ряде регионов лесостепного района и района степей ЕЧР неумеренная эксплуатация в прошлом природных (в том числе и лесных) ресурсов, интенсивное антропогенное воздействие на биоту привели к нарушению биоценологического процесса, изменению структуры лесных экосистем, в том числе дубрав, снижению их устойчивости, а в ряде случаев к деградации и утрате экологических функций (водоохранных, водорегулирующих, почвозащитных, санитарно-гигиенических, рекреационных и т.д.). В связи с ухудшающейся экологической ситуацией в ЕЧР и происходящими климатическими изменениями, средообразующие функции леса выходят на передний план и становятся приоритетными по сравнению с ресурсно-сырьевыми [17, 18, 38, 39].

Оценка эколого-экономической продуктивности модальных искусственных дубрав II класса бонитета, произрастающих в условиях Львовского лесничества Курской обл., показала, что за 80 лет 1 га такого леса депонирует из атмосферы 371 т CO_2 , выделит 284 т O_2 и 9,63 т

биологически активных веществ, задержит 1 103 т пыли. При этом стоимость древесного сырья 1 га такого участка леса к 80 годам составит 41 500 руб. (2004 г.), а только одна выполненная им за это время кислородно-углеродная функция оценивается в 140 504 руб., что экономически подтверждает приоритетность экологических функций перед сырьевыми [17].

Изучением первичной продуктивности и углерододепонирующей функции лесов пяти регионов Центральной степи ЕЧР занимался проф. В.И. Таранков [14]. По его данным, при общей площади – 16 710 тыс. га, лесной площади – 1 618 тыс. га, средней лесистости – 8,9% и общем запасе древесины – 216,6 млн м^3 запас углерода в фитомассе лесных экосистем всех исследуемых регионов составляет 75 млн т, годовое депонирование углерода – 2,32 млн т при объёме почвенного резервуара углерода – 198,8 млн т.

Накопление запаса древесины (фитомассы) и, как следствие, углерода в условиях лесостепного района и района степей ЕЧР существенно зависит от происхождения, типа леса, экотипа и состояния дубрав [12, 15, 21, 28, 40].

Исследованиями Н.В. Караванской [15] установлено, что в возрасте 85–90 лет максимальный запас углерода депонируется в дубняке пойменном (162,2 т С/га), минимальный – в дубняке субборевого травяном (95 т С/га). Максимум накопления углерода в живом напочвенном покрове совпадает с периодом максимального накопления углерода в древостое 80–100 лет. В изучаемых дубовых экосистемах Правобережной порослевой дубравы (Воронежская обл.) Н.В. Караванской [15] отмечен положительный баланс углерода – годовой сток превышает его эмиссию в атмосферу: в дубраве осоко-снытьевой – 1,6–3,9 т С/га/год; в дубняке субборевого травяном – 0,1–0,7 т С/га/год; в дубраве снытьево-осоковой – 0,6–1,7 т С/га/год; в дубняке пойменном – 4,4–4,6 т С/га/год.

При оценке углерододепонирующей функции лесных насаждений необходимо учитывать эмиссию CO_2 в атмосферу за счёт почвенного дыхания, которое в условиях лесостепи и степи ЕЧР может варьировать в широких пределах

(особенно в связи с различными нарушениями лесных экосистем). Продуктивность лесов в значительной мере обуславливается и углекислым газом, выделяющимся из почвы. Почвенная углекислота обеспечивает потребности лесных растений в процессе фотосинтеза. Средняя величина почвенного дыхания здесь составляет 3,0–4,0 т CO₂/га/год [29].

По данным А.И. Шишкина [28], в Воронежском лесничестве Воронежской обл. (Шипов лес, район степей ЕЧР) запас углерода в фитомассе модальных дубрав больше, чем в Воронежском государственном биосферном заповеднике (ВГБЗ, лесостепной район ЕЧР) и в возрасте 90 лет составляет: в свежих дубравах (ТЛУ D₂) – 109,18 т С/га, в сухих (ТЛУ D₁) – 101,75 т С/га; в ВГБЗ запас углерода в свежих судубравах (ТЛУ С₂D) – 106,26 т С/га. Наибольшее текущее годовичное депонирование углерода происходит по достижении ими 60 лет. В свежих дубравах оно насчитывает 1,72 т С/га/год, в сухих – 1,54 т С/га/год, в свежей судубраве ВГБЗ – 1,66 т С/га/год. Доля запаса углерода в почвах экотопов в Шиповом лесу значительно выше, чем в Усманском бору (ВГБЗ): в свежих дубравах Шипова леса она составляет 65,5% (259,56 т С/га), в сухих – 47,1% (111,89 т С/га).

Влияние лесохозяйственных мероприятий и других антропогенных факторов на углеродный цикл

В лесостепном районе и районе степей ЕЧР лесные экосистемы естественного и искусственного происхождения пока еще способны осуществлять экологические и защитные функции. Эти леса (включая и систему защитных полос) являются местом стока углекислого газа из атмосферы и накопления углерода в фитомассе, почвенном гумусе; обеспечивают защиту почв от эрозии, а знаменитые российские чернозёмы – это резервуары длительного хранения углерода [29]. Однако в результате интенсивных антропогенных воздействий (нерегулируемые рубки леса, техногенное загрязнение окружающей

среды, рекреация) лесные экосистемы ЕЧР постоянно испытывают нагрузки, нередко превышающие допустимые значения, при которых происходят необратимые процессы деградации ценных в экологическом и социально-экономическом отношении сообществ основных лесобразующих пород – дуба черешчатого и других древесных пород естественного и искусственного происхождения. При этом во многих случаях антропогенный фактор является ведущим и оказывает отрицательное влияние на лесные, в том числе дубравные, экосистемы. В результате лесохозяйственной деятельности в виде заготовки древесины в спелых и перестойных древостоях и санитарных рубок, после пожаров, в очагах повреждений древостоев насекомыми и болезнями занятые лесными насаждениями земли переходят в категорию не занятых и на какой-то период становятся источником углерода, как за счёт активно протекающих процессов окисления отмершей древесины, опада, отпада, уничтоженной подстилки, так и почвенного дыхания.

По данным М.А. Цветкова [6], за последние 200 лет лесистость пяти регионов Центрально-Черноземного района (ЦЧР) уменьшилась в 2,4 раза (с 21 до 8,9%) и в настоящее время здесь преобладают малолесные регионы: Белгородская обл. – 8,5%, Воронежская – 8,3, Липецкая – 8,3, Курская – 8,2, Тамбовская – 10,6% [40]. Анализ динамики занятых лесной растительностью земель 9-ти субъектов Российской Федерации, расположенных в Центральной лесостепи (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская, Орловская, Рязанская, Пензенская и Тульская области), свидетельствует об уменьшении за 1973–2017 гг. площади дубрав на 19,4%, при этом площадь мягколиственных и прочих пород увеличилась на 47,2%, что подтверждает процессы деградации дубовых лесов, протекающие на землях лесного фонда ЕЧР, особенно в Орловской, Рязанской, Пензенской и Тульской областях [40, 41].

В результате рубки лесов, прежде всего в первой половине XX в., на землях лесного фонда ЕЧР произошли значительные негативные структурные изменения: у хвойных (сосновых)

насаждений сократилась доля естественных древостоев, на смену которым пришли менее устойчивые искусственные; у дубрав в результате длительного использования высокопродуктивные дубовые насаждения естественного семенного происхождения уступили место менее продуктивным и устойчивым порослевым насаждениям – в настоящее время преобладают порослевые дубовые древостои не выше III класса бонитета, 3–5-й генерации; возобновление леса осуществляется путём создания лесных культур, успех которого лимитируется климатическими, биотическими и экономическими факторами [38–41].

На углеродный бюджет существенное влияние оказывают лесные пожары, рубки леса, вредные насекомые и болезни, а также промышленные загрязнения [3, 26, 35, 42–47]. Суммарные эмиссии углерода от пожаров в бореальных лесах России оцениваются от 35,0 до 93,0 Мт С/год, что эквивалентно выбросу в атмосферу от 128,0 до 340,0 Мт CO₂/год. До начала 1990-х гг. в России заготавливали до 420 млн³ древесины, из которых вывозили 360 млн³ и оставляли на лесосеках 60 млн м³. Общее количество углерода в фитомассе вырубаемых насаждений составляло около 165–170 Мт CO₂/год [35, 48].

Остающиеся после проведения рубок в лесу порубочные остатки, по мнению ряда исследователей [48, 49], могут реально изменить баланс стока углерода экосистемой при её деградации, сопровождающейся процессом гетеротрофного дыхания (за счёт микроорганизмов, разлагающих растительные остатки, а также экссудата корней, осуществляющих гумификацию органического вещества).

Л.В. Стёпочкин [19], изучавший влияние лесохозяйственных мероприятий на цикл углерода в искусственных дубравах лесостепного района ЕЧР (Орловская обл.), установил, что при отсутствии уборки крупного древесного детрита лесная экосистема достигает близких к предельным запасов в 80 лет, а со 120-летнего возраста его накопление с приростом равно потерям при минерализации детрита. При периодической уборке древесины фитомасса и мортмасса выступают

в качестве пулов, непрерывно накапливающих энергию. Количественной углеродной спелости культуры дуба достигают в 60 лет, текущее депонирование углерода в этот период составляет около 1,2 т С/га/год в фитомассе и 0,2–0,6 т С/га/год в детрите. При отсутствии мероприятий по уборке захламливаемости возможно накопление запасов углерода, близких к потенциально достижимым (при модальной полноте) уже к 80-летнему возрасту – около 125,0 т С/га. В культурах дуба крупный древесный детрит может выступать в качестве существенного углеродного пула и в 70-летнем возрасте достигать 50% запаса углерода фитомассы. При регулярном проведении такого лесохозяйственного мероприятия, как уборка захламливаемости, в искусственных дубравах, произрастающих в наиболее продуктивном типе леса дубняк снытьевый (ТЛУ D₂), к 100-летнему возрасту почва недополучает около 4,7 т С/га [19].

С целью изучения влияния лесохозяйственных мероприятий и других факторов на цикл углерода в лесных экосистемах лесостепи и степи, используя методику «Региональной оценки бюджета углерода лесов» [50], А.Л. Мусиевский с соавт. [51] выполнили оценку запаса и баланса углерода для земель лесного фонда 11-ти субъектов Российской Федерации (рис. 5), расположенных

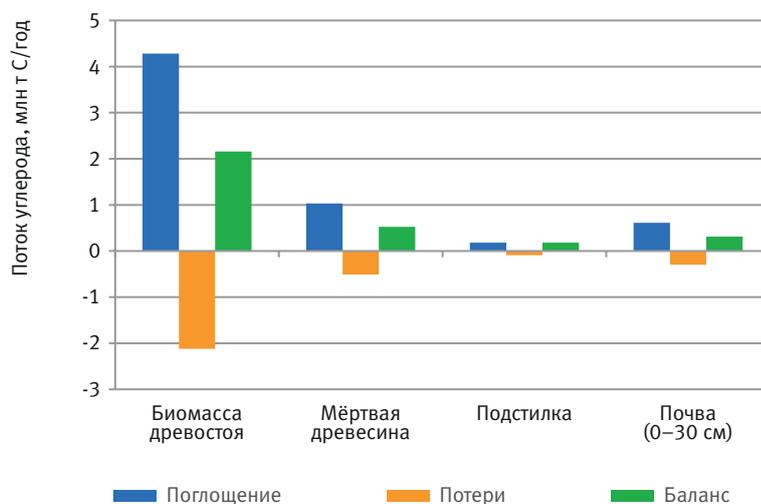


Рис. 5. ПОГЛОЩЕНИЕ, СУММАРНЫЕ ПОТЕРИ И БАЛАНС УГЛЕРОДА В УПРАВЛЯЕМЫХ ЛЕСАХ 11-ТИ СУБЪЕКТОВ РФ ЛЕСОСТЕПНОГО РАЙОНА И РАЙОНА СТЕПЕЙ ЕЧР [51]

в лесостепном районе и районе степей ЕЧР – Белгородской, Воронежской, Курской, Липецкой, Тамбовской, Орловской, Пензенской, Волгоградской, Ростовской, Самарской и Саратовской областей. Расчёты показали, что наибольший запас углерода приходится на занятые лесными насаждениями земли лесного фонда Пензенской (22,9%), Самарской (12,8%) и Саратовской (12,5%) областей при общем запасе углерода лесопокрытых земель – 535,776 млн т С. При этом ежегодно лесными экосистемами изучаемых субъектов ЕЧР поглощается в среднем 6,1 млн т С/год.

Наибольшая абсорбция наблюдается у преобладающих на землях лесного фонда твёрдолиственных пород – около 2,3 млн т С/год, что составляет 37,2% общего объёма поглощения, в том числе наиболее распространёнными дубравами порослевого происхождения – 1,3 млн т С/год (21,2%), семенного – 0,52 млн т С/год (8,5%) [51]. Другие твёрдолиственные породы поглощают 0,46 млн т С/год (7,5%). На втором месте по объёму поглощения углерода находятся мягколиственные породы – 1,9 млн т С/год (31,7% общего поглощения), среди которых наибольшая величина абсорбции приходится на прочие породы – 0,65 млн т С/год (10,7%). Насаждения осины и берёзы поглощают практически равное количество С – 0,641 млн т С/год (10,5%) и 0,642 млн т С/год (10,4%) соответственно. Несколько меньше величина абсорбции у хвойных древостоев – 1,86 млн т С/год (30,4% общего объёма поглощения), в том числе на долю сосны приходится 1,79 млн т С/год (29,3%), ели – 0,57 млн т С/год (0,9%), лиственницы – 0,08 млн т С/год (0,13%).

Распределение запаса углерода по пулам оказалось неравномерным: наибольшее его количество сосредоточено в пуле почвы – 45,5% (243,874 млн т С), наименьшее – в подстилке у хвойных (1,4%) и мягколиственных (1,5%) древостоев. Не занятые лесными насаждениями земли содержат 18,0 млн т С. Здесь наибольшее количество углерода приходится на пустыри, прогалины – 30,3% и несомкнувшиеся лесные культуры – 29,8%, наименьшее – на лесные питомники и плантации (2,4%) и естественные

редины (0,9%). Основные запасы углерода нелесных земель сосредоточены в болотах – 51,5%. В ходе исследований было установлено, что на долю лесных пожаров и прочих причин гибели лесных насаждений за 2007–2015 гг. пришлось 86,9% общих ежегодных потерь углерода лесными экосистемами, лесозащитных мероприятий (санитарные рубки) – 9,5%, рубок ухода – 3,6%. И только мероприятия по искусственному лесовосстановлению с учётом их небольших объёмов обеспечивают ежегодное накопление запаса углерода в лесных экосистемах на 0,5% [51, 52].

В рассматриваемых 11-ти субъектах Российской Федерации, входящих в состав лесостепного района и района степей ЕЧР, на землях лесного фонда преобладают дубовые насаждения порослевого происхождения – менее продуктивные, устойчивые и долговечные по сравнению с семенными. И, по мнению ряда учёных [14, 19, 45, 52], рубка дубового древостоя семенного происхождения и соответствующая потеря лесной экосистемой углерода не могут быть компенсированы в короткие сроки вновь создаваемыми лесными культурами дуба черешчатого. Поэтому с позиции ведения лесного хозяйства на «углерод» в лесостепном районе и районе степей ЕЧР целесообразней сохранять существующие семенные дубравы, а порослевые постепенно трансформировать в семенные.

Основными мероприятиями, направленными на увеличение продуктивности и углеродопонирующей способности лесных земель изучаемых территорий, должны стать: эффективное восстановление на землях лесного фонда одной из главных лесообразующих пород – дуба черешчатого семенного происхождения; перевод лесоводственно-селекционными методами порослевых дубрав в семенные; реконструкция перестойных насаждений и малоценных молодняков, чьи защитные и санитарно-гигиенические функции стали снижаться или не отвечают целевому назначению лесов; улучшение структуры и состава существующих лесов путём проведения прореживаний и проходных рубок ухода за лесными насаждениями интенсивностью не более 20%; повышение эффективности мероприятий

по охране и защите лесов; разведение дубовых лесов на маргинальных и не пригодных для сельскохозяйственного использования землях.

Выводы

1. Климат лесостепи более благоприятен для произрастания основных лесобразующих пород (дуб черешчатый и сосна обыкновенная) по сравнению с районом степей. Однако и здесь коэффициент увлажнения меньше 1,1, а в сочетании с возрастающей вероятностью полусухих и засушливых лет (30–55%) происходящие климатические изменения ведут к постепенному исчезновению лесов на элювиальных формах рельефа и преобладанию лугово-степной растительности.

2. Климат степи, характеризующийся большей засушливостью и меньшим количеством годовых осадков (на 40%), в сочетании с частыми засухами, суховеями и пыльными бурями, способствует интразональному распространению естественных лесов по пониженным элементам рельефа, балкам (байрачные леса), в поймах рек (пойменные леса), в микропонижениях (степные колки).

3. Потепление климата на 2–4 °С к 2050 г. при недостатке осадков неблагоприятно скажется на дубовых насаждениях лесостепного района и района степей ЕЧР, что подтверждается выявленными закономерностями влияния повышения температуры воздуха на уменьшение радиального прироста дуба черешчатого и, как следствие, на снижение углероддепонирующих функций дубравных экосистем.

4. По экспертным оценкам, в России в результате непочвенной эмиссии (лесные пожары, дыхание животных, разложение древесного детрита, продукция аграрного сектора, добыча торфа, известкование почв) в атмосферу поступает около 0,8 Гт С/год. Основной сток углерода обеспечивают лесные экосистемы. Поэтому сохранение и разведение лесов, особенно в малолесных лесостепном районе и районе степей ЕЧР, следует рассматривать как способ увеличения

депонирования атмосферного углерода, позволяющий хотя бы отчасти сбалансировать мощные выбросы углекислого газа в атмосферу.

5. Особенности накопления углерода существенно зависят от происхождения и типа леса. Максимальный запас углерода в насаждениях лесостепного района ЕЧР в возрасте 85–90 лет депонирован в дубняке пойменном (162,2 т С/га), минимальный – в дубняке суборевом травяном (95 т С/га).

6. Семенная байрачная дубрава, произрастающая в лесостепном районе ЕЧР (Курская обл.), поглощает углекислый газ значительно более длительный период (в 2 раза) по сравнению с порослевой, которая уже с 70 лет становится источником поступления углекислого газа в атмосферу.

7. При регулярной уборке захламливаемости в искусственных дубравах лесостепного района ЕЧР, произрастающих в наиболее продуктивном типе леса дубняк снытьевый (ТЛУ D₂), к 100-летнему возрасту почва недополучает около 4,7 т С/га.

8. Наибольшая доля общих ежегодных потерь углерода лесными экосистемами в лесостепном районе и районе степей ЕЧР в первые десятилетия XXI в. приходилась на лесные пожары и прочие причины гибели лесов – 86,9%, на лесозащитные мероприятия (санитарные рубки) – 9,5%, на рубки ухода – 3,6%.

9. Интенсивность рубок ухода за лесом и объём удалённых порубочных остатков и детрита существенно влияют на баланс углерода в лесной экосистеме и, если экономически они не оправданны, то, по крайней мере, проходные рубки в семенных дубравах проводить не следует.

10. При рубке семенного дубового древостоя потеря углерода не может быть компенсирована в короткие сроки вновь создаваемыми лесными культурами. С позиции ведения хозяйства на «углерод» в защитных лесах лесостепного района и района степей ЕЧР целесообразнее сохранять существующие семенные дубравы, а порослевые лесоводственными способами постепенно трансформировать в семенные.

Список источников

1. Влияние изменения климата на наземные экосистемы. – Текст : электронный // Кафедра лесных культур СибГТУ : официальный сайт – 2016. – Режим доступа: URL : https://forest-culture.narod.ru/Issled_gr/new1/4.html (дата обращения 04.02.2025).
2. Шимон, Т.Н. Оценка влияния биотических и антропогенных факторов лесов России на бюджет углерода : специальность 03.00.16 : автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Татьяна Николаевна Шимон. – Москва, 2008. – 21 с.
3. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России : монография / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский [и др.]. – Москва : Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 2007. – 315 с.
4. Лес и климат : монография / Д.Г. Замолотчиков, К.К. Кобяков, А.О. Кокорин [и др.]. – Москва : Всемирный фонд природы, 2015. – 40 с.
5. Коржов, С.И. Земледелие Центрального Черноземья : учебник / С.И. Коржов, Т.А. Трофимова. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2016. – 415 с.
6. Цветков, М.А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 год : монография / М.А. Цветков. – Москва : изд-во Академии наук СССР, 1957. – 212 с.
7. Биомасса растений превышает биомассу других живых существ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://immunocap.ru/photo/biomassa-rasteniy-previyshaet-biomassu-drugix-jiviyx-sushestv/> (дата обращения 19.05.2025)
8. Гарькуша, Д.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков в городе Воронеж / Д.Н. Гарькуша, В.В. Великохатская, А.С. Красюк // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 9 (147). – DOI 10.60797/IRJ.2024.147.91.
9. Мусиевский, А.Л. Особенности гидротермических показателей климата в г. Воронеже в вегетационные периоды 2019–2021 гг. / А.Л. Мусиевский // Наука и практика. – Москва : Перо, 2021. – С. 199–207.
10. Миленин, А.И. Влияние температуры воздуха на радиальный прирост дуба черешчатого в Шиповом лесу / А.И. Миленин // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 2. – С. 65–69.
11. Орлик, Е.А. Динамика радиального прироста в насаждениях экотипов дуба черешчатого в Правобережном лесничестве УОЛ ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова / Е.А. Орлик, А.И. Миленин // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации : сборник материалов IX Международной научно-практической конференции (Москва, 10 ноября 2022). – Москва : АЛЕФ, 2022. – С. 107–113. – DOI 10.34755/IROK.2022.99.58.031.
12. Свиридов, Д.Г. Депонирование углерода дубовыми насаждениями Центрального Черноземья : специальность 03.00.16 : автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Дмитрий Геннадьевич Свиридов. – Воронеж, 2007. – 18 с.
13. Крапивин, В.Ф. Моделирование глобальных циклов углерода и метана / В.Ф. Крапивин, В.С. Шалаев, В.Д. Бурков // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2015. – Т. 19. – № 1. – С. 170–178.
14. Таранков, В.И. Мониторинг лесных экосистем : учебное пособие / В.И. Таранков. – Воронеж : Воронежская государственная лесотехническая академия, 2006. – 301 с.
15. Караванская, Н.В. Биоразнообразие и потоки углерода в дубравах Центральной лесостепи : специальность 03.00.16 : автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук / Наталья Владимировна Караванская. – Воронеж, 2005. – 20 с.
16. Мартыненко, С.Н. Дендрохронологические особенности депонирования углерода дубовыми насаждениями Центральной лесостепи : специальность 03.00.16 : автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук / Сергей Николаевич Мартыненко. – Воронеж, 2005. – 23 с.
17. Мусиевский, А.Л. Комплексная оценка продуктивности искусственных дубрав 2 бонитета Льговского лесхоза Курской области / А.Л. Мусиевский // Лесное образование и лесная наука в XXI веке : материалы

Региональной научно-практической юбилейной конференции, посвященной 85-летию высшего лесного образования. – Воронеж : Воронежская государственная лесотехническая академия, 2004. – С. 175–178.

18. Мусиевский, А.Л. Эколого-экономическая оценка продуктивности порослевых дубрав III бонитета Степного лесхоза Тамбовской области / А.Л. Мусиевский, Л.А. Мусиевская // Совершенствование экономического механизма на предприятиях : материалы научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора И.В. Воронина. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2005. – С. 69–73.

19. Степочкин, Л.М. Депонирование углерода культурами дуба черешчатого Орловской области (на примере Моховского опытного лесничества Новосальского лесхоза Орловской области) : специальность 03.00.16 : автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук / Лев Михайлович Степочкин. – Воронеж, 2003. – 20 с.

20. Свиридов, Д.Г. Запасы углерода и его годовые потоки в сосново-дубовых насаждениях Воронежской области / Д.Г. Свиридов, В.И. Таранков // Лес. Наука. Молодежь. – Воронеж : Воронежская государственная лесотехническая академия, 2006. – С. 179–183.

21. Терехов, В.И. Эколого-лесоводственные основы повышения углероддепонирующей функции байрачных дубрав Курской области : специальность 03.00.16 : автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук / Владимир Иванович Терехов. – Воронеж, 2007. – 20 с.

22. Усольцев, В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии. Методы, база данных и ее приложения = Biological productivity of Northern Eurasia's forests: монография / В.А. Усольцев. – Екатеринбург, 2007. – 636 с.

23. Shvidenko, A. Dynamics of Russian Forests and the Carbon Budget in 1961–1998: An Assessment Based on Long-Term Forest Inventory Data / A. Shvidenko, S. Nilsson // Climatic Change. – 2002. – V. 55. – P. 5–37.

24. Замолодчиков, Д.Г. Система конверсионных отношений для расчета чистой первичной продукции лесных экосистем по запасам насаждений / Д.Г. Замолодчиков, А.И. Уткин // Лесоведение. – 2000. – № 6. – С. 54–63.

25. Замолодчиков, Д.Г. Система оценки бюджета углерода в лесах : научно-образовательный курс / Д.Г. Замолодчиков. – Москва : ЦЭПЛ РАН, 2012. – 59 с.

26. Исаев, А.С. Углерод в лесах Северной Евразии / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин // Круговорот углерода на территории России : избранные научные труды по проблеме «Глобальная эволюция биосферы. Антропогенный вклад» ; под общ. ред. академика Г.А. Заварзина. – Москва : Московский филиал Государственного научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф при Кубанском государственном университете Министерства общественного и профессионального образования Российской Федерации, 1999. – С. 63–95.

27. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин, В.И. Сухих [и др.]. – Москва : Центр экологической политики России, 1995. – 156 с.

28. Шишкин, А.И. Особенности структурно-функциональной организации дубрав Центральной лесостепи : специальность 03.00.16 : автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Александр Иванович Шишкин. – Воронеж, 2007. – 20 с.

29. Национальный атлас почв Российской Федерации / Н.А. Аветов, А.Л. Александровский, И.О. Алябина [и др.]. – Москва : Астрель, 2011. – 632 с.

30. Швиденко, А.З. Углеродный бюджет лесов России / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 1. – С. 69–92.

31. Тембо, А. Экологическая оценка доминирующих запасов и потоков углерода в базовых компонентах представительных модельных ландшафтов Центрально-Черноземного региона России : специальность 03.02.08 «Экология (по отраслям)» : автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Аллан Тембо. – Москва, 2014. – 24 с.

32. Голубятников, Л.Л. Оценка баланса углерода степных экосистем России / Л.Л. Голубятников, И.Н. Курганова, В.О.Л. Де Гереню // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 59. – № 1. – С. 71–87.
33. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата. – Текст : электронный / А.Н. Филипчук, Н.В. Малышева, Т.А. Золина, А.Н. Югов // Лесохозяйственная информация. – 2020. – № 1. – С. 92–114. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10. – Режим доступа: lhi.vniilm.ru.
34. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко, С. Нильссон, Ю.И. Булуй. – Москва, 2006. – 803 с.
35. Курганова, И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России : специальность 03.00.2703.00.16 : автореф. дисс. ... доктора биол. наук / Ирина Николаевна Курганова. – Москва, 2010. – 48 с.
36. Мокроносков, А.Т. Глобальный фотосинтез и разнообразие растительности / А.Т. Мокроносков // Крутооборот углерода на территории России. Глобальные изменения природной среды и климата: избранные труды по проблеме «Глобальная эволюция биосферы. Антропогенный вклад». – Москва : Московский филиал Государственного научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф при Кубанском государственном университете, 1999. – С.19–62.
37. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. – Текст : электронный / В.М. Катцо, С.М. Семенов, Г.В. Алексеев [и др.]. – Москва, 2014. – Режим доступа: URL: <https://econedr.ru/wp-content/uploads/2020/07/od2.pdf>
38. Деградация дубрав Центрального Черноземья / В.Б. Михно, Н.Н. Харченко, В.В. Царалунга [и др.]. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2010. – 604 с.
39. Царалунга, В.В. Деградация порослевых дубрав и их реабилитация с помощью санитарных рубок : специальность 06.03.03 «Агролесомелиорация, защитное лесоразведение и озеленение населенных пунктов, лесные пожары и борьба с ними» : автореф. дисс. ... д-ра с.-х. наук / Владимир Владимирович Царалунга. – Брянск, 2005. – 42 с.
40. Бугаев, В.А. Дубравы лесостепи : монография / В.А. Бугаев, А.Л. Мусиевский, В.В. Царалунга. – Воронеж, 2013. – 247 с.
41. Мусиевский, А.Л. Тенденции в динамике лесного фонда Центральной лесостепи Европейской части России за период 1966–2017 гг. / А.Л. Мусиевский // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2022. – № 2. – С. 58–69. – DOI 10.21178/2079-6080.2022.2.58.
42. Дубравы : научно-вспомогательный Библиографический указатель. – Текст : электронный / сост. А.Л. Мусиевский, Н.А. Батрак : отв. ред. О.Н. Ушакова, науч. ред. М.П. Чернышов. – Воронеж, 2009. – 786 с.
43. Влияние пожаров и заготовок древесины на углеродный баланс лесов России / Д.Г. Замолодчиков, В.И. Грабовский, П.П. Шуляк, О.В. Честных // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 36–49.
44. Замолодчиков, Д.Г. Влияние объемов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели СВМ-CFS3 / Д.Г. Замолодчиков, В.И. Грабовский, В.А. Курц // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2014. – № 1. – С. 5–18.
45. Малышева, Н.В. Лесохозяйственные мероприятия – инструмент управления углеродным циклом в лесных экосистемах. Опыт Канады / Н.В. Малышева, Т.А. Золина, П.С. Кинигопуло // Лесохозяйственная информация. – 2015. – № 2. – С. 70–94.
46. Замолодчиков, Д.Г. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее / Д.Г. Замолодчиков, В.И. Грабовский, В.П. Курц // Устойчивое лесопользование. – 2014. – № 2(39). – С. 23–31.
47. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко, Е.А. Ваганов [и др.] // Доклады Академии наук. – 2011. – Т. 441. – № 4. – С. 544.

48. Замолодчиков, Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок / Д.Г. Замолодчиков // Лесоведение. – 2009. – № 4. – С. 3–15.
49. Швиденко, А.З. Оценка запасов древесного детрита в лесах России / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко, С. Нильссон / Лесная таксация и лесоустройство. – 2009. – № 1(41). – С. 133–147.
50. Космическая научная обсерватория углерода лесов России : официальный сайт [Электронный ресурс]. – Москва. – Режим доступа: URL: <http://www.cepl.rssi.ru/carbon.htm> (дата обращения: 05.02.2025).
51. Impact of forestry practices on carbon balance in forest steppes and steppes of European Russia / A.L. Musiyevsky, M.A. Semenov, A.A. Sinitsyn, I.V. Kvitko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. – Т. 226. – № 1.
52. Мусиевский, А.Л. Влияние лесовосстановления на цикл углерода в лесостепи и степи Европейской части России / А.Л. Мусиевский // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2024. – № 152. – С. 93–102.

References

1. Vliyanie izmeneniya klimata na nazemnye ekosistemy. – Tekst : elektronnyj // Kafedra lesnyh kul'tur SibGTU : oficial'nyj sajt – 2016. – Rezhim dostupa: URL : https://forest-culture.narod.ru/Issled_gr/new1/4.html (data obrashcheniya 04.02.2025).
2. Shimon, T.N. Ocenka vliyaniya bioticheskikh i antropogennykh faktorov lesov Rossii na byudzhnet ugleroda : special'nost' 03.00.16 : avtoref. diss. ... kand. biol. nauk / Tat'yana Nikolaevna Shimon. – Moskva, 2008. – 21 s.
3. Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii : monografiya / V.N. Kudeyarov, G.A. Zavarzin, S.A. Blagodatskiy [i dr.]. – Moskva : Akademicheskij nauchno-izdatel'skij, proizvodstvenno-poligraficheskij i knigorasprostranitel'skij centr «Nauka», 2007. – 315 s.
4. Les i klimat : monografiya / D.G. Zamolodchikov, K.K. Kobayakov, A.O. Kokorin [i dr.]. – Moskva : Vsemirnyj fond prirody, 2015. – 40 s.
5. Korzhov, S.I. Zemledelie Central'nogo Chernozem'ya : uchebnik / S.I. Korzhov, T.A. Trofimova. – Voronezh : Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. Imperatora Petra I, 2016. – 415 s.
6. Cvetkov, M.A. Izmenenie lesistosti Evropejskoj Rossii s konca XVII stoletiya po 1914 god : monografiya / M.A. Cvetkov. – Moskva : izd-vo Akademii nauk SSSR, 1957. – 212 s.
7. Biomassa rastenij prevyshaet biomassu drugih zhivykh sushchestv [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: URL: <https://immunocap.ru/photo/biomassa-rastenij-prevyshaet-biomassu-drugix-jiviyx-sushestv/> (data obrashcheniya 19.05.2025)
8. Gar'kusha, D.N. Mnogoletnie izmeneniya temperatury vozduha i kolichestva atmosferynykh osadkov v gorode Voronezh / D.N. Gar'kusha, V.V. Velikohatskaya, A.S. Krasnyuk // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2024. – № 9 (147). – DOI 10.60797/IRJ.2024.147.91.
9. Musievskij, A.L. Osobennosti gidrotermicheskikh pokazatelej klimata v g. Voronezhe v vegetacionnye periody 2019–2021 gg. / A.L. Musievskij // Nauka i praktika. – Moskva : Pero, 2021. – S. 199–207.
10. Milenin, A.I. Vliyanie temperatury vozduha na radial'nyj prirost duba chereshchatogo v Shipovom lesu / A.I. Milenin // Lesotekhnicheskij zhurnal. – 2012. – № 2. – S. 65–69.
11. Orlik, E.A. Dinamika radial'nogo prirosta v nasazhdeniyah ekotipov duba chereshchatogo v Pravoberezhnom lesnichestve UOL VGLTU imeni G.F. Morozova / E.A. Orlik, A.I. Milenin // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epohu cifrovizacii : sbornik materialov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Moskva, 10 noyabrya 2022). – Moskva : ALEF, 2022. – S. 107–113. – DOI 10.34755/IROK.2022.99.58.031.

12. Sviridov, D.G. Deponirovanie ugleroda dubovymi nasazhdeniyami Central'nogo Chernozem'ya : special'nost' 03.00.16 : avtoref. diss. ... kand. biol. nauk / Dmitrij Gennad'evich Sviridov. – Voronezh, 2007. – 18 s.
13. Krapivin, V.F. Modelirovanie global'nyh ciklov ugleroda i metana / V.F. Krapivin, V.S. Shalaev, V.D. Burkov // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik. – 2015. – T. 19. – № 1. – S. 170–178.
14. Tarankov, V.I. Monitoring lesnyh ekosistem : uchebnoe posobie / V.I. Tarankov. – Voronezh : Voronezhskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya, 2006. – 301 s.
15. Karavanskaya, N.V. Bioraznoobrazie i potoki ugleroda v dubravah Central'noj lesostepi : special'nost' 03.00.16 : avtoref. diss. ... kand. s.-h. nauk / Natal'ya Vladimirovna Karavanskaya. – Voronezh, 2005. – 20 s.
16. Martynenko, S.N. Dendrochronologicheskie osobennosti deponirovaniya ugleroda dubovymi nasazhdeniyami Central'noj lesostepi : special'nost' 03.00.16 : avtoref. diss. ... kand. s.-h. nauk / Sergej Nikolaevich Martynenko. – Voronezh, 2005. – 23 s.
17. Musievskij, A.L. Kompleksnaya ocenka produktivnosti iskusstvennyh dubrav 2 boniteta L'govskogo leskhoza Kurskoj oblasti / A.L. Musievskij // Lesnoe obrazovanie i lesnaya nauka v XXI veke : materialy Regional'noj nauchno-prakticheskoj yubilejnoy konferencii, posvyashchennoj 85-letiyu vysshego lesnogo obrazovaniya. – Voronezh : Voronezhskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya, 2004. – S. 175–178.
18. Musievskij, A.L. Ekologo-ekonomicheskaya ocenka produktivnosti poroslevykh dubrav III boniteta Stepnogo leskhoza Tambovskoj oblasti / A.L. Musievskij, L.A. Musievskaya // Sovershenstvovanie ekonomicheskogo mekhanizma na predpriyatiyah : materialy nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora I.V. Voronina. – Voronezh : Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2005. – S. 69–73.
19. Stepochkin, L.M. Deponirovanie ugleroda kul'turami duba chereschatogo Orlovskoj oblasti (na primere Mohovskogo opytnogo lesnichestva Novosal'skogo leskhoza Orlovskoj oblasti) : special'nost' 03.00.16 : avtoref. diss. ... kand. s.-h. nauk / Lev Mihajlovich Stepochkin. – Voronezh, 2003. – 20 s.
20. Sviridov, D.G. Zapasy ugleroda i ego godichnye potoki v sosnovo-dubovykh nasazhdeniyah Voronezhskoj oblasti / D.G. Sviridov, V.I. Tarankov // Les. Nauka. Molodezh'. – Voronezh : Voronezhskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya, 2006. – S. 179–183.
21. Terekhov, V.I. Ekologo-lesovodstvennye osnovy povysheniya uglerododeponiruyushchej funkcii bajrachnykh dubrav Kurskoj oblasti : special'nost' 03.00.16 : avtoref. diss. ... kand. s.-h. nauk / Vladimir Ivanovich Terekhov. – Voronezh, 2007. – 20 s.
22. Usol'cev, V.A. Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoj Evrazii. Metody, baza dannyh i ee prilozheniya = Biological productivity of Northern Eurasia's forests: monografiya / V.A. Usol'cev. – Ekaterinburg, 2007. – 636 s.
23. Shvidenko, A. Dynamics of Russian Forests and the Carbon Budget in 1961–1998: An Assessment Based on Long-Term Forest Inventory Data / A. Shvidenko, S. Nilsson // Climatic Change. – 2002. – V. 55. – P. 5–37.
24. Zamolodchikov, D.G. Sistema konversionnyh otnoshenij dlya rascheta chistoy pervichnoj produkcii lesnyh ekosistem po zapasam nasazhdenij / D.G. Zamolodchikov, A.I. Utkin // Lesovedenie. – 2000. – № 6. – S. 54–63.
25. Zamolodchikov, D.G. Sistema ocenki byudzhetu ugleroda v lesah : nauchno-obrazovatel'nyj kurs / D.G. Zamolodchikov. – Moskva : CEPL RAN, 2012. – 59 s.
26. Isaev, A.S. Uglерod v lesah Severnoj Evrazii / A.S. Isaev, G.N. Korovin // Krugovorot ugleroda na territorii Rossii : izbrannye nauchnye trudy po probleme «Global'naya evolyuciya biosfery. Antropogennyj vklad» ; pod obshch. red. akademika G.A. Zavarzina. – Moskva : Moskovskij filial Gosudarstvennogo nauchno-issledovatel'skogo centra prognozirovaniya i preduprezhdeniya geoeologicheskikh i tekhnogennykh katastrof pri Kubanskom gosudarstvennom universitete Ministerstva obshchestvennogo i professional'nogo obrazovaniya Rossijskoj Federacii, 1999. – S. 63–95.
27. Ekologicheskie problemy pogloshcheniya uglekislogo gaza posredstvom lesovosstanovleniya i lesorazvedeniya v Rossii / A.S. Isaev, G.N. Korovin, V.I. Suhij [i dr.]. – Moskva : Centr ekologicheskoy politiki Rossii, 1995. – 156 s.
28. Shishkin, A.I. Osobennosti strukturno-funktional'noj organizacii dubrav Central'noj lesostepi : special'nost' 03.00.16 : avtoref. diss. ... kand. biol. nauk / Aleksandr Ivanovich Shishkin. – Voronezh, 2007. – 20 s.

29. Nacional'nyj atlas pochv Rossijskoj Federacii / N.A. Avetov, A.L. Aleksandrovskij, I.O. Alyabina [i dr.]. – Moskva : Astrel', 2011. – 632 s.
30. Shvidenko, A.Z. Uglerodnyj byudzhet lesov Rossii / A.Z. Shvidenko, D. G. Shchepashchenko // Sibirskij lesnoj zhurnal. – 2014. – № 1. – S. 69–92.
31. Tembo, A. Ekologicheskaya ocenka dominiruyushchih zapasov i potokov ugleroda v bazovyh komponentah predstavitel'nyh model'nyh landshaftov Central'no-Chernozemnogo regiona Rossii : special'nost' 03.02.08 «Ekologiya (po otraslyam)»: avtoref. diss. ... kand. biol. nauk / Allan Tembo. – Moskva, 2014. – 24 s.
32. Golubyatnikov, L.L. Ocenka balansa ugleroda stepnyh ekosistem Rossii / L.L. Golubyatnikov, I.N. Kurganova, V.O.L. De Gerenyu // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana. – 2023. – T. 59. – № 1. – S. 71–87.
33. Boreal'nye lesa Rossii: vozmozhnosti dlya smyagcheniya izmeneniya klimata. – Tekst : elektronnyj / A.N. Filipchuk, N.V. Malysheva, T.A. Zolina, A.N. Yugov // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2020. – № 1. – S. 92–114. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10. – Rezhim dostupa: lhi.vniilm.ru.
34. Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesobrazuyushchih porod Severnoj Evrazii : normativno-spravochnye materialy / A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepashchenko, S. Nil'sson, Yu.I. Buluj. – Moskva, 2006. – 803 s.
35. Kurganova, I.N. Emissiya i balans dioksida ugleroda v nazemnyh ekosistemah Rossii : special'nost' 03.00.2703.00.16 : avtoref. diss. ... doktora biol. nauk / Irina Nikolaevna Kurganova. – Moskva, 2010. – 48 s.
36. Mokronosov, A.T. Global'nyj fotosintez i raznoobrazie rastitel'nosti / A.T. Mokronosov // Krugovorot ugleroda na territorii Rossii. Global'nye izmeneniya prirodnoj sredy i klimata: izbrannye trudy po probleme «Global'naya evolyuciya biosfery. Antropogennyj vklad». – Moskva : Moskovskij filial Gosudarstvennogo nauchno-issledovatel'skogo centra prognozirovaniya i preduprezhdeniya geoekologicheskikh i tekhnogennyh katastrof pri Kubanskom gosudarstvennom universitete, 1999. – S. 19–62.
37. Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii: obshchee rezjume. – Tekst : elektronnyj / V. M. Katco, S. M. Semenov, G. V. Alekseev [i dr.]. – Moskva, 2014. – Rezhim dostupa: URL: <https://econedr.ru/wp-content/uploads/2020/07/od2.pdf>
38. Degradaciya dubrav Central'nogo Chernozem'ya / V.B. Mihno, N.N. Harchenko, V.V. Caralunga [i dr.]. – Voronezh : Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2010. – 604 s.
39. Caralunga, V.V. Degradaciya poroslevykh dubrav i ih rehabilitaciya s pomoshch'yu sanitarnykh rubok : special'nost' 06.03.03 «Agrolesomeliaciya, zashchitnoe lesorazvedenie i ozelenenie naselennykh punktov, lesnye pozhary i bor'ba s nimi»: avtoref. diss. ... d-ra s.-h. nauk / Vladimir Vladimirovich Caralunga. – Bryansk, 2005. – 42 s.
40. Bugaev, V.A. Dubravy lesostepi : monografiya / V.A. Bugaev, A.L. Musievskij, V.V. Caralunga. – Voronezh, 2013. – 247 s.
41. Musievskij, A.L. Tendencii v dinamike lesnogo fonda Central'noj lesostepi Evropejskoj chasti Rossii za period 1966–2017 gg. / A.L. Musievskij // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva. – 2022. – № 2. – S. 58–69. – DOI 10.21178/2079-6080.2022.2.58.
42. Dubravy : nauchno-vspomogatel'nyj Bibliograficheskij ukazatel'. – Tekst : elektronnyj / sost. A.L. Musievskij, N.A. Batrak : otv. red. O.N. Ushakova, nauch. red. M.P. Chernyshov. – Voronezh, 2009. – 786 s.
43. Vliyanie pozharov i zagotovok drevesiny na uglerodnyj balans lesov Rossii / D.G. Zamolodchikov, V.I. Grabovskij, P.P. Shulyak, O.V. Chestnyh // Lesovedenie. – 2013. – № 5. – S. 36–49.
44. Zamolodchikov, D.G. Vliyanie ob'emov lesopol'zovaniya na uglerodnyj balans lesov Rossii: prognoznyj analiz po modeli SVM-SFS3 / D.G. Zamolodchikov, V.I. Grabovskij, V.A. Kurc // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva. – 2014. – № 1. – S. 5–18.
45. Malysheva, N.V. Lesohozyajstvennye meropriyatiya – instrument upravleniya uglerodnym ciklom v lesnyh ekosistemah. Opyt Kanady / N.V. Malysheva, T.A. Zolina, P.S. Kinigopulo // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2015. – № 2. – S. 70–94.

46. Zamolodchikov, D.G. Upravlenie balansom ugleroda lesov Rossii: proshloe, nastoyashchee i budushchee / D.G. Zamolodchikov, V.I. Grabovskij, V.P. Kurc // Ustojchivoe lesopol'zovanie. – 2014. – № 2(39). – S. 23–31.
47. Vliyanie prirodnyh pozharov v Rossii 1998–2010 gg. na ekosistemy i global'nyj uglerodnyj byudzhet / A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepashchenko, E.A. Vaganov [i dr.] // Doklady Akademii nauk. – 2011. – T. 441. – № 4. – S. 544.
48. Zamolodchikov, D.G. Ocenka pula ugleroda krupnyh drevesnyh ostatkov v lesah Rossii s uchetom vliyaniya pozharov i rubok / D.G. Zamolodchikov // Lesovedenie. – 2009. – № 4. – S. 3–15.
49. Shvidenko, A.Z. Ocenka zapasov drevesnogo detrita v lesah Rossii / A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepashchenko, S. Nil'sson / Lesnaya taksaciya i lesoustrojstvo. – 2009. – № 1(41). – S. 133–147.
50. Kosmicheskaya nauchnaya observatoriya ugleroda lesov Rossii : oficial'nyj sayt [Elektronnyj resurs]. – Moskva. – Rezhim dostupa: URL: <http://www.cepl.rssi.ru/carbon.htm> (data obrashcheniya: 05.02.2025).
51. Impact of forestry practices on carbon balance in forest steppes and steppes of European Russia / A.L. Musiyevsky, M.A. Semenov, A.A. Sinitsyn, I.V. Kvitko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. – T. 226. – № 1.
52. Musievskij, A.L. Vliyanie lesovosstanovleniya na cikl ugleroda v lesostepi i stepi Evropejskoj chasti Rossii / A.L. Musievskij // Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada. – 2024. – № 152. – S. 93–102.