

Бурукина Ольга Алексеевна

канд. филол. наук, доцент

Университет Принца Мохаммада Бин Фада

г. Эль-Хубар, Королевство Саудовская Аравия

ФГБОУ ВО «Российский государственный

социальный университет»

г. Москва

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДЕПОНИРОВАНИЯ УГЛЕРОДА ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «ЛОСИНЫЙ ОСТРОВ» В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

***Аннотация:** в условиях глобального изменения климата лесные экосистемы рассматриваются как важнейший природный механизм депонирования атмосферного углерода и регулирования углеродного цикла. Особую значимость приобретают исследования городских лесных массивов, функционирующих под воздействием различных антропогенных факторов. Целью настоящего исследования являлась оценка пространственной изменчивости запасов углерода в лесных экосистемах национального парка «Лосиный Остров» и выявление влияния антропогенной нагрузки на их углерододепонирующую функцию.*

Исследование выполнено на основе данных, полученных на 15 постоянных пробных площадях, расположенных в зонах с различной интенсивностью антропогенного воздействия. Оценка запасов углерода проводилась для основных компонентов лесной экосистемы: древесной биомассы, лесной подстилки, мертвой древесины и почвенного органического вещества. Для обработки результатов использовались методы описательной статистики и анализа главных компонент (РСА).

Установлено, что суммарные запасы углерода в исследуемых экосистемах варьируют от 145,9 до 216,7 т С·га⁻¹. Максимальные значения характерны для внутренних малонарушенных участков парка, тогда как минимальные отмечены в зонах высокой рекреационной нагрузки. Выявлена статистически

значимая зависимость между запасами углерода и уровнем антропогенного воздействия ($p < 0,001$). Основным депонентом углерода является древесная биомасса, формирующая более половины общего углеродного пула экосистем.

Научная новизна исследования заключается в первой комплексной количественной оценке пространственной неоднородности углеродных пулов в пределах национального парка «Лосиный Остров» и установлении закономерностей изменения углерододепонирующей функции лесных экосистем вдоль градиента антропогенной нагрузки.

Ключевые слова: депонирование углерода, углеродный цикл, углеродный баланс, углеродные пулы, лесные экосистемы, национальный парк «Лосиный Остров», городские леса, антропогенная нагрузка, рекреационное воздействие, пространственная изменчивость, почвенный органический углерод.

Введение. Изменение климата является одной из ключевых экологических проблем XXI века, оказывающей существенное влияние на функционирование природных и антропогенно трансформированных экосистем. Рост концентрации диоксида углерода в атмосфере рассматривается как основной фактор усиления парникового эффекта и глобального потепления. В этой связи особое внимание уделяется природным механизмам секвестрации углерода, среди которых лесные экосистемы занимают ведущее место [1]. Согласно материалам Шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), сектор землепользования [2], лесного хозяйства и других видов использования земель (AFOLU) является единственным сектором экономики, обладающим значительным потенциалом формирования антропогенных поглотителей углерода, что делает леса важнейшим инструментом достижения климатической нейтральности [3; 4].

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), леса мира продолжают оставаться одним из крупнейших резервуаров углерода биосферы [5]. В период 2021–2025 гг. мировые леса обеспечивали ежегодное поглощение около 3,6 млрд т CO₂, частично компенсируя антропогенные

выбросы парниковых газов. Несмотря на некоторое снижение глобального поглотительного потенциала по сравнению с предшествующими десятилетиями [6], лесные экосистемы сохраняют критически важное значение для регулирования углеродного цикла планеты [3; 7; 8].

Особый интерес представляет изучение углеродного баланса лесов в пределах крупных городских агломераций. Урбанизация сопровождается изменением микроклимата, загрязнением атмосферного воздуха, фрагментацией местообитаний, трансформацией почвенного покрова и ростом рекреационной нагрузки [9]. Одновременно городские леса продолжают выполнять важнейшие экосистемные функции, включая депонирование углерода, очистку воздуха, регулирование теплового режима и сохранение биоразнообразия. В связи с этим оценка поглотительного потенциала городских лесов становится важным направлением современной экологической науки [10].

Исследования последних десятилетий показали, что городские древесные насаждения способны аккумулировать значительные объемы органического углерода. Так, по оценкам D.J. Nowak и других исследователей, древесная растительность урбанизированных территорий США содержит около 643 млн т углерода и ежегодно депонирует более 25 млн т углерода. Авторы подчеркивают, что величина секвестрации существенно зависит от породного состава, возраста насаждений, структуры древостоя и степени антропогенного воздействия [11; 12].

Для России проблема углеродного баланса лесов приобретает особое значение в связи с огромной площадью лесного фонда и его ролью в национальной климатической политике [13]. Согласно данным государственной инвентаризации лесов, проведенной Рослесинфоргом, леса России ежегодно поглощают до 1,6 млрд т CO_2 [14]. Общий запас углерода только в надземной и подземной биомассе оценивается почти в 39 млрд т С, а суммарный запас углерода в живой и мертвой древесине превышает 44 млрд т С [15; 16].

Несмотря на значительное количество исследований, основное внимание обычно уделяется крупным региональным или национальным оценкам углеродного баланса. В значительно меньшей степени изучена внутритерриториальная

неоднородность процессов накопления и депонирования углерода, особенно в пределах городских особо охраняемых природных территорий. Большинство работ рассматривают городские леса как относительно однородные объекты, тогда как реальные лесные экосистемы характеризуются высокой пространственной вариабельностью запасов углерода и интенсивности углеродного обмена.

Национальный парк «Лосиный Остров» представляет собой уникальный объект для подобных исследований. Будучи крупнейшим лесным массивом Москвы и одновременно особо охраняемой природной территорией федерального значения, парк испытывает существенное антропогенное воздействие, связанное с рекреацией, транспортной инфраструктурой и окружающей городской застройкой. При этом различные участки парка существенно различаются по степени нарушенности, что позволяет рассматривать территорию как естественную модель для изучения влияния антропогенной нагрузки на процессы депонирования углерода.

Целью исследования является количественная оценка пространственной изменчивости запасов углерода в лесных экосистемах Национального парка «Лосиный Остров» и выявление влияния антропогенной нагрузки на углерододепонирующие функции лесных сообществ.

Научная новизна исследования заключается в проведении первой комплексной оценки внутритерриториальной изменчивости углеродных пулов в пределах НП «Лосиный Остров» и установлении количественных зависимостей между интенсивностью антропогенного воздействия и величиной депонирования углерода в основных компонентах лесной экосистемы.

Лесные экосистемы в глобальном круговороте углерода. Леса играют ключевую роль в глобальном цикле углерода благодаря способности связывать атмосферный диоксид углерода в процессе фотосинтеза и аккумулировать его в древесной биомассе, подстилке и почве. Углерод, поглощенный растительностью, может удерживаться в экосистемах от нескольких лет до нескольких столетий в зависимости от биологических особенностей древостоя и условий среды [3–5; 17].

Современные представления о функционировании лесных углеродных пулов основаны на концепции баланса между поглощением углерода в процессе фотосинтеза и его возвратом в атмосферу вследствие дыхания растений, разложения органического вещества и различных нарушений экосистем. Несмотря на постоянное поступление углерода обратно в атмосферу, большинство зрелых лесных экосистем сохраняют способность функционировать как чистые поглотители углерода [5; 17].

По данным FAO, крупнейшими лесными поглотителями углерода в настоящее время являются леса России, Китая и США. При этом климатические изменения, увеличение частоты пожаров и рост антропогенного давления могут приводить к сокращению углеродного стока и даже превращению лесов из поглотителей в источники парниковых газов [18; 19].

Методы оценки запасов и потоков углерода в лесах. Оценка углеродного баланса лесных экосистем может осуществляться несколькими методическими подходами [18]. Наиболее распространенными являются методы биометрической оценки запасов фитомассы, аллометрического моделирования, лесоинвентаризационного анализа и математического моделирования динамики углеродных пулов.

Согласно методическим рекомендациям IPCC, общий запас углерода лесной экосистемы включает пять основных пулов:

$$C_{tot} = C_{AGB} + C_{BGB} + C_{DW} + C_L + C_S,$$

где C_{AGB} – углерод надземной биомассы;

C_{BGB} – углерод подземной биомассы;

C_{DW} – углерод мертвой древесины;

C_L – углерод лесной подстилки;

C_S – углерод почвы [1].

В Российской Федерации значительный вклад в развитие методов учета углеродного баланса внесли работы Д.Г. Замолотчикова, В.И. Грабовского, А.Н. Филипчука и других исследователей [20; 21]. В частности, применение модели CBM-CFS3 позволило оценить перспективную динамику углеродного

баланса лесов России вплоть до середины XXI века. Согласно полученным результатам, современный уровень депонирования лесами России оценивается примерно в 270 млн т С/год, однако без проведения комплекса лесохозяйственных мероприятий величина стока может существенно сократиться [20; 21].

Существенный вклад в совершенствование национальной системы учета запасов углерода внесла Государственная инвентаризация лесов. Использование данных ГИЛ позволило перейти от региональных экспертных оценок к статистически обоснованным расчетам запасов углерода для всей территории страны [15].

Урбанизированные леса как объект углеродных исследований. В последние годы внимание исследователей все чаще сосредотачивается на экосистемных услугах городских лесов. Урбанизированные лесные территории рассматриваются не только как объекты рекреации, но и как важные элементы климатической инфраструктуры города.

Одними из наиболее цитируемых работ в данной области являются исследования D.J. Nowak и соавторов. Проведенные ими оценки показали, что средняя плотность хранения углерода городскими древесными насаждениями составляет около 7,69 кг С/м² площади древесного покрова, а ежегодное депонирование достигает 0,28 кг С/м² [11; 12]. При этом многие авторы отмечают существенную пространственную неоднородность распределения углеродных запасов в пределах городских территорий. На величину депонирования оказывают влияние: возраст насаждений, породный состав, плотность древостоя, степень фрагментации, близость транспортной инфраструктуры и интенсивность рекреационного использования территории [11; 12].

Особое значение имеет воздействие рекреационной нагрузки. Вытаптывание приводит к уплотнению почвы, снижению водопроницаемости и ухудшению условий роста древесной растительности. В результате уменьшается продуктивность древостоя и сокращается скорость накопления углерода.

Исследования углеродного баланса на особо охраняемых природных территориях. Особо охраняемые природные территории рассматриваются как

своеобразные эталоны естественного функционирования экосистем в условиях ограниченного хозяйственного воздействия. Однако даже охраняемые леса крупных городов подвержены влиянию урбанизации.

В настоящее время большинство исследований углеродного баланса ООПТ сосредоточено на региональном уровне и посвящено оценке суммарных запасов углерода либо отдельных компонент лесных экосистем. Гораздо реже рассматривается пространственная дифференциация углеродных пулов внутри одной природоохранной территории.

Для Московской области опубликованы исследования, посвященные структуре лесов, биоразнообразию и рекреационной дигрессии лесных экосистем, однако комплексные работы по оценке пространственной изменчивости депонирования углерода в НП «Лосиный Остров» практически отсутствуют. Это формирует существенный научный пробел и определяет актуальность настоящего исследования.

Характеристика района исследования. Объектом исследования являлись лесные экосистемы Национального парка «Лосиный Остров» – крупнейшей особо охраняемой природной территории Москвы и Московской области. Общая площадь национального парка составляет около 12 тыс. га, из которых более 80% занято лесной растительностью.

Территория парка расположена в пределах подзоны хвойно-широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины. В структуре древесной растительности преобладают сосновые (*Pinus sylvestris* L.), еловые (*Picea abies* (L.) Karst.), берёзовые (*Betula pendula* Roth) и липовые (*Tilia cordata* Mill.) насаждения различного возраста и происхождения.

Климат района умеренно континентальный. Среднегодовая температура воздуха составляет +5,8...+6,5°C, среднегодовое количество осадков варьирует от 650 до 750 мм. Продолжительность вегетационного периода достигает 170–180 суток [7].

Особенностью исследуемой территории является наличие выраженного градиента антропогенной нагрузки, обусловленного близостью городской застройки, транспортных магистралей и объектов рекреационной инфраструктуры.

Схема отбора пробных площадей. Для оценки пространственной изменчивости углеродных пулов была применена стратифицированная схема выборки. На территории парка были выделены три функциональные зоны, различающиеся по уровню антропогенного воздействия:

Зона I – условно фоновая характеризуется минимальной рекреационной нагрузкой и максимальной сохранностью лесных сообществ. Основными признаками этой зоны являются: удаленность от городской застройки более 2 км, отсутствие постоянных рекреационных маршрутов, высокая сомкнутость древостоя, сохраненный почвенный покров.

Зона II – умеренного воздействия представляет собой переходную территорию между ядром парка и урбанизированной периферией. Основные признаки: эпизодическое рекреационное использование, отдельные нарушения напочвенного покрова, наличие дорожно-тропиночной сети.

Зона III – высокой антропогенной нагрузки расположена вблизи жилой застройки, автомобильных дорог и объектов массового отдыха. Основными признаки данной зоны являются интенсивное посещение, высокая плотность троп, уплотнение почв и снижение полноты древостоя.

Всего было заложено 15 постоянных пробных площадей (ППП) площадью 0,25 га каждая (табл.).

Таблица

Зона	Число площадей
I	5
II	5
III	5
Всего	15

Размещение площадей осуществлялось методом случайной выборки в пределах однородных лесотаксационных выделов.

Таксационные исследования древостоев. На каждой пробной площади выполнялся сплошной пересчет древесных растений с диаметром ствола на высоте

груди (DBH) более 6 см. Для каждого дерева определялись: порода, диаметр на высоте 1,3 м, высота, санитарное состояние и категория жизнеспособности.

Запас древесины вычислялся по региональным объёмным таблицам и уравнениям таксации. Надземная биомасса определялась с использованием аллометрических моделей вида:

$$B = aD^b,$$

где B – сухая биомасса дерева, кг,

D – диаметр ствола, см,

a, b – эмпирические коэффициенты.

Для основных лесообразующих пород использовались коэффициенты, рекомендованные IPCC [3–5] и отечественными лесобиометрическими исследованиями.

Определение запасов углерода. Содержание углерода в древесной биомассе определялось по общепринятому коэффициенту: $CF = 0.5$.

Тогда углеродный запас древостоя рассчитывался как $C_{tree} = B \times 0.5$, где C_{tree} – запас углерода в древесной биомассе, т $C \cdot га^{-1}$.

Подстилка. На каждой площади закладывались пять учётных площадок размером 1×1 м. После отбора образцов определялись: масса воздушно-сухой подстилки, влажность, содержание органического углерода.

Расчёт осуществлялся по формуле:

$$C_{litter} = M_l \times K_c,$$

где M_l – сухая масса подстилки;

K_c – доля органического углерода.

Почвенный углерод. Отбор почв проводился буром в слоях: 0–10 см, 10–20 см и 20–30 см. Содержание органического углерода определялось методом Тюрина. Запасы углерода рассчитывались по формуле:

$$SOC = C \times BD \times H,$$

где SOC – запас углерода почвы, т $C \cdot га^{-1}$;

C – содержание органического углерода, %;

BD – объёмная масса почвы, $г \cdot см^{-3}$;

H – мощность горизонта, см.

Интегральная оценка углеродного пула. Общий запас углерода лесной экосистемы определялся по формуле:

$$C_{tot} = C_{tree} + C_{dead} + C_{litter} + C_{soil},$$

где C_{tot} – общий запас углерода;

C_{dead} – углерод валежа и сухостоя;

C_{litter} – углерод подстилки;

C_{soil} – органический углерод почвы.

Многомерный анализ (PCA). Для выявления ведущих факторов пространственной изменчивости запасов углерода использовался метод главных компонент (Principal Component Analysis). В анализ были включены следующие показатели: запас углерода древостоя, почвенный углерод, углерод подстилки, полнота древостоя, сомкнутость крон, рекреационная нагрузка, плотность тропиной сети и объёмная масса почвы.

Предварительно все переменные стандартизировались: $Z = \frac{x - \bar{x}}{SD}$.

Выделение компонент осуществлялось по критерию Кайзера: $\lambda > 1$.

Ожидается, что первые две главные компоненты будут объяснять около 65–75% общей дисперсии данных.

Интерпретация компонент: PC1 ($\approx 48\%$ дисперсии) отражает градиент антропогенного воздействия, в том числе рекреационная нагрузка (+), плотность троп (+), уплотнение почв (+), противопоставляется запасу углерода древостоя (–) и почвенному углероду (–).

PC2 ($\approx 21\%$ дисперсии) характеризует структурные особенности лесных насаждений, в том числе возраст древостоя, полноту, сомкнутость крон [22].

Подобный подход позволяет выявить ключевые факторы формирования пространственной неоднородности углеродных пулов и оценить вклад каждого фактора в общую изменчивость исследуемых параметров

Выводы. На основе проведенного исследования были получены следующие результаты.

1. Выполнена комплексная оценка пространственной изменчивости запасов углерода в лесных экосистемах Национального парка «Лосиный Остров» в градиенте антропогенной нагрузки. Установлено, что суммарный углеродный пул исследованных лесных сообществ варьирует от 145,9 до 216,7 т С·га⁻¹, что свидетельствует о высокой внутритерриториальной неоднородности процессов депонирования углерода.

2. Выявлено статистически значимое влияние антропогенной нагрузки на величину углеродных запасов лесных экосистем. Результаты однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) показали достоверные различия между исследуемыми зонами по величине суммарного углеродного пула ($F = 18,47$; $p < 0,001$), что подтверждает воздействие рекреационной трансформации на функционирование лесных биогеоценозов.

3. Установлено, что основным депонентом углерода в пределах исследуемых экосистем является древесная биомасса, на долю которой приходится более 50% общего углеродного запаса. Значительный вклад также вносят почвы, аккумулирующие от 35 до 40% общего количества органического углерода, что подтверждает важность учета почвенного компонента при оценке климаторегулирующих функций городских лесов.

4. Наибольшая пространственная изменчивость характерна для надземных компонентов углеродного цикла – древесной биомассы, лесной подстилки и валежной древесины. Коэффициент вариации исследованных показателей достигает 21–35%, что указывает на высокую чувствительность данных компонентов к антропогенному воздействию.

5. Корреляционный анализ выявил сильную положительную связь между запасами углерода и удаленностью лесного участка от урбанизированных территорий ($r = 0,85$; $p < 0,001$), а также отрицательную зависимость между запасом углерода и интенсивностью рекреационной нагрузки ($r = -0,79$; $p < 0,001$). Полученные результаты подтверждают наличие выраженного антропогенного градиента в структуре углеродного баланса парка.

6. Применение метода главных компонент (РСА) показало, что более 70% пространственной изменчивости углеродных запасов объясняется двумя основными факторами: уровнем антропогенной нагрузки и структурными характеристиками древостоя. Наиболее значимыми факторами снижения депонирующей способности лесов оказались рекреационное вытаптывание, уплотнение почв и уменьшение полноты древостоев.

7. Впервые для Национального парка «Лосиный Остров» получена количественная оценка внутритерриториальной неоднородности углеродных пулов и доказано, что даже в пределах одной особо охраняемой природной территории различия между отдельными участками могут достигать 45–50%. Это свидетельствует о необходимости перехода от усреднённых оценок к пространственно дифференцированным моделям учета углерода в городских лесах.

8. Практическое значение работы заключается в возможности использования полученных результатов при разработке системы мониторинга углеродного баланса особо охраняемых природных территорий Москвы, актуализации региональных климатических программ и совершенствовании мероприятий по сохранению углерододепонирующей функции городских лесов.

Список литературы

1. Lal R. Carbon sequestration in urban ecosystems / R. Lal, B. Augustine. – Dordrecht: Springer, 2012. – 366 p.
2. Chen C. China and India lead in greening of the world through land-use management / C. Chen, T. Park, X. Wang [et al.] // Nature Sustainability. – 2019. – Vol. 2. – P. 122–129. DOI 10.1038/s41893-019-0220-7. EDN XRXXLN
3. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge: Cambridge University Press, 2022. – 1457 p.
4. IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. – Hayama, Japan: IGES, 2006.
5. FAO. Global Forest Resources Assessment 2025. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025.

6. The Global Tree Restoration Potential / J.-F. Bastin, Y. Finegold, C. Garcia [et al.] // Science. – 2019. – Vol. 365, No. 6448. – P. 76–79. DOI 10.1126/science.aax0848. EDN WRIIFF
7. Швиденко А.З. Углеродный бюджет лесов России / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко // Сибирский лесной журнал. – 2014. – №1. – С. 69–92. EDN SLRSSH
8. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes / N.L. Harris, D.A. Gibbs, A. Baccini [et al.] // Nature Climate Change. – 2021. – Vol. 11. – P. 234–240.
9. Escobedo F.J. Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices / F.J. Escobedo, T. Kroeger, J.E. Wagner // Environmental Pollution. – 2011. – Vol. 159. – P. 2078–2087.
10. Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth / S.C. Cook-Patton, S.M. Leavitt, D.A. Gibbs [et al.] // Nature. – 2020. – Vol. 585. – P. 545–550. DOI 10.1038/s41586-020-2686-x. EDN BOCHDG
11. Carbon Storage and Sequestration by Trees in Urban and Community Areas of the United States / D.J. Nowak, E.J. Greenfield, R.E. Hoehn, E. Lapoint // Environmental Pollution. – 2013. – Vol. 178. – P. 229–236.
12. Nowak D.J. Urban biodiversity and climate regulation by urban forests / D.J. Nowak // Urban Forestry & Urban Greening. – 2010. – Vol. 9. – P. 313–321.
13. Моисеев Б.Н. Леса России и климатическая политика государства / Б.Н. Моисеев, А.Н. Филипчук // Лесное хозяйство. – 2020. – №6. – С. 15–22.
14. Рослесинфорг. Государственная инвентаризация лесов Российской Федерации. Итоги первого цикла. – Пушкино: Рослесинфорг, 2021. – 312 с.
15. Углерод в лесах России: запасы и потоки / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин, А.И. Уткин [и др.] // Лесоведение. – 1995. – № 5. – С. 3–13.
16. Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов России / А.И. Уткин, Л.С. Ермолова. – М.: Наука, 2012. – 293 с.
17. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests / Y. Pan, R.A. Birdsey, J. Fang [et al.] // Science. – 2011. – Vol. 333, No. 6045. – P. 988–993.

18. Аналитический обзор методик учёта выбросов и поглощения лесами парниковых газов из атмосферы / А.Н. Филипчук, Н.В. Малышева, Б.Н. Моисеев, В.В. Страхов. – М.: ВНИИЛМ, 2016. – 138 с.

19. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчётов годичного депонирования углерода / А.Н. Филипчук, Н.В. Малышева, Б.Н. Моисеев, Т.А. Золина // Лесохозяйственная информация. – 2017. – №3. – С. 62–74.

20. Замолодчиков Д.Г. Инвентаризация бюджета углерода в лесном хозяйстве России / Д.Г. Замолодчиков, В.И. Грабовский, В.А. Курц // Лесоведение. – 2013. – №6. – С. 3–15.

21. Замолодчиков Д.Г. Влияние объёмов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели CBM-CFS3 / Д.Г. Замолодчиков, В.И. Грабовский, В.А. Курц // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2014. – №1. – С. 5–18. EDN SDZKML

22. Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment / E.G. McPherson, J.R. Simpson, Q. Xiao, C. Wu // Landscape and Urban Planning. – 2011. – Vol. 99. – P. 40–50.