

УДК 645.01.631

## РОЛЬ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ В АДАПТАЦИИ УРБОЭКОСИСТЕМ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА<sup>1</sup>

© 2023 г. О. В. Семенюк<sup>а</sup>, \*, В. М. Телеснина<sup>а</sup>, Л. Г. Богатырев<sup>а</sup>, О. Ю. Баранова<sup>б</sup><sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1-12, Москва, 119991 Россия<sup>б</sup>Центральный научно-исследовательский и проектный институт Минстроя России,  
просп. Вернадского, д. 29, Москва, 119331 Россия

\*E-mail: olgatour@rambler.ru

Поступила в редакцию 13.09.2022 г.

После доработки 11.10.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В целях разработки предложений по управлению функционированием зеленого каркаса города проведено изучение древесных насаждений и их подстилок, а также некоторых аспектов биологического круговорота городских экосистем в рамках оптимизации углеродного следа. Актуальность темы обусловлена условиями глобального потепления климата и необходимостью выявления источников прямого и косвенного антропогенного воздействия на углеродный баланс, а также необходимостью оценки вклада эмиссии углерода в атмосферу урбанизированных территорий. Подстилка, несмотря на небольшой вклад в общий запас углерода экосистемы, является наиболее мобильным горизонтом, связывающим растительность и минеральные горизонты почвы, а ее типология и свойства — важнейшие характеристики, которые могут быть использованы для проведения мониторинга городских экосистем. Установлено, что в урбоэкосистемах, по сравнению с природными аналогами, отмечается увеличение интенсивности биологического круговорота, что связано с изменением соотношения древесных пород в зеленом каркасе города в сторону существенного увеличения доли лиственных, применением системы ухода за зелеными насаждениями и деструктивным воздействием рекреации на подстилки. Снижение количества углерода в подстилках хвойных насаждений в результате рекреационного воздействия в процентном выражении составляет 20–57%, в случае сбора опада лиственных пород — до 90%, при этом в абсолютном выражении утрата запасов углерода сопоставима и равна 20–23 кг/100 м<sup>2</sup> (отметим, что вариант подстилок лиственных насаждений показывает абсолютные величины потерь углерода в 3 раза выше). Все исследованные варианты городских зеленых насаждений, подверженные выраженному антропогенному воздействию, демонстрируют снижение замкнутости биологического круговорота по сравнению с ненарушенными. Изменение направленности круговорота органического вещества урбоэкосистем в сторону его депонирования в составе наземного детрита может быть реализовано как путем регулирования интенсивности ухода за зелеными насаждениями, так и за счет снижения его потери при рекреации — проектными решениями организации ландшафтных объектов с отведением транзитных потоков посетителей от мест расположения хвойных экосистем.

*Ключевые слова:* урбоэкосистемы, биологический круговорот, баланс углерода, лесная подстилка, зеленый каркас, мониторинг.

DOI: 10.31857/S0024114823040083, EDN: XSCXDX

В последние десятилетия на фоне значительного увеличения площади урбанизированных территорий возрастает интерес к проблеме устойчивого развития городов и разработке подходов к оптимизации экологического состояния урбандолиафтов. Данная тема приобретает особую

актуальность в рамках проблемы глобального потепления климата, выявления источников прямого и косвенного антропогенного влияния на углеродный баланс, а также оценки вклада эмиссии углерода в атмосферу территориями городов.

Зеленый каркас города является механизмом мягкого регулирования экологического состояния урбоэкосистем за счет реализации разнообразных экосистемных функций, снижает загрязненность и запыленность атмосферы, влияет на влажность и температуру воздуха, ветровой и радиационный режимы, содержание кислорода и

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания НИР № 121040800321-4 “Индикаторы трансформации биогеохимических циклов биогенных элементов в природных и антропогенных экосистемах” и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

углекислого газа в атмосфере и т.д. В настоящее время особую актуальность приобретают климатообразующие функции как для природных лесных территорий, так и зеленого каркаса городов (Лукина и др., 2020).

С другой стороны, городские зеленые насаждения функционируют в условиях различных антропогенных воздействий, таких как влияние транспорта, промышленного производства и рекреационных воздействий и др. В мегаполисах зеленый каркас выступает как важнейший фактор, регулирующий его общее экологическое состояние, и в то же время является компонентом, который формируется городской средой и человеком. С усилением урбанизации возрастает рекреационная роль зеленых насаждений (Зонн, Карпачевский, 1987).

На сегодня выделяется несколько направлений в исследованиях городских экосистем. Одно из них – это работы теоретической направленности, куда входят разработка концепции рекреационного лесопользования на урбанизированных территориях (Рысин С., Рысин Л., 2011), а также выделение приоритетных направлений развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами (Лукина и др., 2015). В их числе представлены об экосистемных услугах, среди категорий которых выделены поддерживающие услуги, к ним относятся исследования почвообразования, фотосинтеза и круговорота элементов, что имеет непосредственное отношение к проблеме функционирования лесных насаждений в условиях мегаполисов. Подчеркивается, что при управлении городскими лесами необходим междисциплинарный подход, включающий все уровни управления, чтобы обеспечить реализацию максимального потенциала городского озеленения (O'Brien et al., 2022).

Другие направления включают работы, связанные с решением практических задач. Одним из примеров является изучение роли древостоя в сохранении ассимиляционных возможностей экосистемы и характера их изменчивости в условиях возможного запыления (Казанцева, Соловьева, 2009).

Активно изучается влияние на городские насаждения рекреации, которое сопровождается деградацией почвенного покрова и появлением нелесных видов. В подстилке происходит целый ряд важнейших процессов, таких как уменьшение ее запасов, мощности, увеличения доли трудно разлагаемых компонентов (Рысин, 2007; Калякина и др., 2017; Спицына, Дашева, 2020).

В практической плоскости рассматривается проблема баланса углерода в условиях урбоэкосистем (Chen et al., 2022), подчеркивается его слабое закрепление в городских аналогах по сравнению с естественными лесами при анализе триады – запасов углерода в насаждениях, в подстилке и

почве (Mandal et al., 2022). Обзор публикаций показывает, что именно этим трем компонентам уделяется особое внимание. Так, в древостое оценка запасов углерода решается в рамках методики Д.Г. Замолотчикова с соавторами (1998). Для почв исследованиями Л.Г. Богатырева и И.О. Алябиной (2011) дана оценка поведению углерода, а его запасы по территории России картографически определены работами Д.С. Орлова с соавторами (1996) и Д.Г. Щепашенко (2013).

Подстилка является важным компонентом баланса углерода экосистемы. При оценке поглощения углерода учитывают его прирост во всех пулах лесной экосистемы – фитомассы, в том числе и подстилки (Замолотчиков и др., 2018). В современный период моделирования циклов углерода подчеркивается важность оценки органического вещества, сосредоточенного в сопряженных горизонтах подстилки (Чертов, Надпорожская, 2016).

Для подстилок городских насаждений проведена оценка скорости круговорота органического вещества с использованием подстилочно-опадного коэффициента, (предложен в классической работе Н.И. Базилевич и Л.Е. Родина (1965)), который был выражен в процентах и назван коэффициентом запаса подстилки (Казимилова, 1987).

Таким образом, изучение растительности и подстилок, а также связанных с ними некоторых аспектов биологического круговорота городских экосистем является весьма актуальной задачей в рамках проблемы углеродного баланса. Полученная в данной работе информация послужит основой для разработки предложений по управлению и оптимизации функционирования зеленого каркаса города.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В качестве объектов исследований выступили два городских лесопарка, особо охраняемые природные территории (ООПТ) Москвы – природно-исторический парк “Битцевский лес” и природно-исторический парк “Измайлово”, а также территории ботанического сада и парковой зоны кампуса МГУ. Исследованы такие компоненты экосистем, как древесные насаждения и подстилки. Характеристики подстилок получены в результате проведения полевых и лабораторных исследований. Оценка особенностей городских зеленых насаждений проводилась на основе обобщения и анализа собственных и литературных данных.

Исследуемые насаждения представлены двумя группами – листовыми и хвойными породами в условиях различного антропогенного воздействия. Для листовых насаждений актуальным и масштабным в городских условиях является сбор подстилки, влияние которого на биологический круговорот было предметом исследования. Лист-

венные насаждения представлены породами, наиболее распространенными в Москве (липа, клен, береза), при этом подобраны и условно эталонные насаждения, и насаждения, где применяются системы ухода и сбор подстилок (регулярный или периодический). При регулярном уходе сбор подстилки проводится каждый год, при периодическом — раз в несколько лет, в условно эталонных экосистемах сбор подстилок не проводится. Подробное описание этих лиственных насаждений представлено в более ранней работе авторов (Телеснина, Семенюк, 2022).

Хвойные насаждения (ели и лиственницы) были выбраны на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) и изучены на предмет воздействия рекреации. Эти два еловых фитоценоза расположены на территории Битцевского парка, а также два лиственничных фитоценоза — на территории парка “Измайлово”. И ельники, и лиственничники представлены в двух вариантах — с незначительной рекреационной нагрузкой (1 стадия депрессии (Рысин и др., 2006)) и с умеренной рекреационной нагрузкой (3–4 стадия депрессии).

Ельник ясенниково-зеленчуковый, не подверженный рекреации, представляет собой искусственные насаждения ели возрастом около 100 лет с участием липы сердцелистной (*Tilia cordata*) (формула древостоя 9Е1Л). Ельник крапивно-живучковый вытоптан и засорен, в древостое незначительно участвует липа (8Е2Л), возраст которой также около 100 лет.

Лиственничник кислично-зеленчуковый, не подверженный рекреации, представляет собой искусственные насаждения, древостой состоит из двух ярусов — лиственницы (10Л) и клена с липой (9К1Л). Лиственничник недотрогово-крапивно-зеленчуковый, подверженный вытаптыванию, также состоит из двух ярусов — 10Л (лиственница) и 10К (клен). Возраст обоих лиственничников составляет около 120 лет.

С точки зрения методических подходов авторами предложен ряд показателей, характеризующих структурно-функциональную организацию подстилок и связанных напрямую с биологическим круговоротом. В группу параметров, определяющих структурную организацию подстилок, включены общие запасы и мощность подстилок. Особенности долговременного функционирования органического вещества и скорость его разложения характеризуются типологией подстилок. Деструктивные маломощные подстилки морфологически представляют собой однослойные подстилки, состоящие из опада прошлых лет (горизонт L). Они свидетельствуют о высокой скорости переработки растительного опада, что чаще встречается в лиственных насаждениях. При низкой скорости разложения опада формируются мощные многослойные подстилки — ферментативные и гуми-

фицированные (Богатырев, 1990), соответственно с 2 или 3 горизонтами (горизонты F и H), что в большей мере характерно для хвойных насаждений и указывает на низкую скорость биологического круговорота в экосистеме. Параметры, характеризующие особенности функционирования, включают в себя долю детрита и легкоразлагаемых компонентов, соотношение мощности и запасов органического вещества в верхнем горизонте L по отношению к сумме нижележащих горизонтов.

Подстилку в хвойных насаждениях отбирали на площади 25 × 25 см в 5 тессерах с учетом пространственного положения (приствольные пространства, кроны и окна). Для подстилок определена классификационная принадлежность по Л.Г. Богатыреву (1990), мощность, запасы на абсолютно сухое вещество. Определялся фракционный состав верхнего горизонта L подстилок (хвоя, ветки, шишки и др.). К детриту были отнесены мелкие фракции, происхождение которых нельзя определить, их долевое участие свидетельствует об активности разложения органического вещества подстилок и указывает на скорость биологического круговорота. Легко разлагаемые компоненты представлены суммой листьев и ветоши. Для оценки интенсивности биологического круговорота были использованы такие показатели функционирования подстилки, как отношение мощности и запасов в верхних горизонтах подстилки к аналогичным показателям в нижележащих. Ежегодно реализуемый объем органического вещества подстилок рассчитывался как разница запасов легко разлагаемых компонентов в до- и послелистопадный периоды. Методика и результаты исследования подстилок лиственных насаждений представлены в более ранних работах (Семенюк и др., 2021).

Запасы углерода в подстилках лиственных и хвойных насаждений рассчитывали на 100 м<sup>2</sup>, поскольку это соответствует площади исследованной части фитоценоза, на которой осуществляли геоботаническое описание. Для хвойных насаждений, характеризующихся высокой пространственной дифференциацией свойств подстилок, при расчетах учитывалось соотношение площадей, занимаемых приствольными повышениями, подкороновыми пространствами и окнами. Площадь приствольных и подкороновых пространств определяли исходя из их примерного радиуса, площадь окон соответствовала разности 100 м<sup>2</sup> и совокупности площадей приствольных, подкороновых пространств и площадей сечений стволов. Запасы углерода в подстилках всех изучаемых экосистем определены на основе данных содержания углерода в подстилках еловых и лиственных насаждений, приведенных в работе Д.Г. Щепашенко с соавторами (2013). Для статистической обработки полученных результатов использова-

ны программы Exel и Statistica. На основании ранее полученных данных по свойствам подстилок (Семенюк и др., 2021а; Семенюк и др., 2021б) были рассчитаны величина снижения мощности и запасов подстилок и углерода в результате применения системы ухода за насаждениями, величина убыли запаса углерода в ежегодном цикле разложения подстилок в условно эталонных экосистемах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Растительность городских экосистем*

Зеленый каркас города включает как природные и слабо преобразованные экосистемы, которые располагаются в пределах особо охраняемых природных территорий, так и искусственные насаждения. В искусственных насаждениях преобладают экосистемы с монодоминантным древостоем, что определяется особенностью проектных решений по формированию древесных групп и массивов (Горохов, 2005). Насаждения часто характеризуются упрощенной ярусной структурой и специфическими режимами ухода (удаление подростка и подлеска, кошение травостоя и сбор подстилок (Телеснина, Семенюк, 2022)).

Массив городских насаждений состоит из отдельных представителей древесно-кустарниковой растительности, которая может быть охарактеризована с точки зрения видового состава, его аборигенности или “привнесенности” (так называемые инвазивные и интродуцированные виды), и с точки зрения состояния (от неудовлетворительного до хорошего), и с точки зрения содержания этих зеленых насаждений (применения различных мероприятий по уходу) и т.д. (Баранова, Семенюк, 2018). Городские искусственно созданные зеленые насаждения отличаются особенностями видового состава, в частности высокой долей инвазивных видов (клен ясенелистный (*Acer negundo* L.), различные виды тополей и др.), а также своеобразием живого напочвенного покрова (Полякова, 1992). Согласно данным за 2020 год, которые представлены в Докладе о состоянии окружающей среды в г. Москве, на территории города произрастает почти 300 видов деревьев, самой распространенной древесной породой (без учета территорий ООПТ) является клен ясенелистный (18.9% от общего количества), затем по мере убывания: клен (другие виды) – 13.8%, липа – 11.7%, береза – 11.3%, тополь – 7.5%, сосна и ель – по 1.7% и др. В отличие от городских, зеленые насаждения пригородных зон и всей территории Московской области, которые можно назвать “фоновыми” по отношению к московским, обладают несколько иным соотношением древесных пород: береза – 40.6%, ель – 23.5%, сосна – 20.2%, осина – 8.6%, дуб – 1.5%, ольха серая (*Alnus incana* (L.)) – 2.5%, ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.)) – 1.8%, ли-

па – 0.7%, остальные породы – 0.6% (Лесной план ..., 2018).

По сравнению с фоновыми территориями (рис. 1), в урбоэкосистемах значительно увеличена доля лиственных пород (с 50 до 96%), которые создают повышенную скорость биологического круговорота, что определяет город как систему активного движения органического вещества. Формирование зеленого каркаса города с низким долевым участием хвойных насаждений, которые активно накапливают углерод как в многолетних органах, включая хвою, так и в подстилках, приводит к формированию ландшафтов с низкой способностью сохранять органическое вещество в составе наземного детрита. Таким образом, от соотношения лиственных и хвойных насаждений будет зависеть интенсивность круговорота, а также депонирование углерода на ландшафтном уровне.

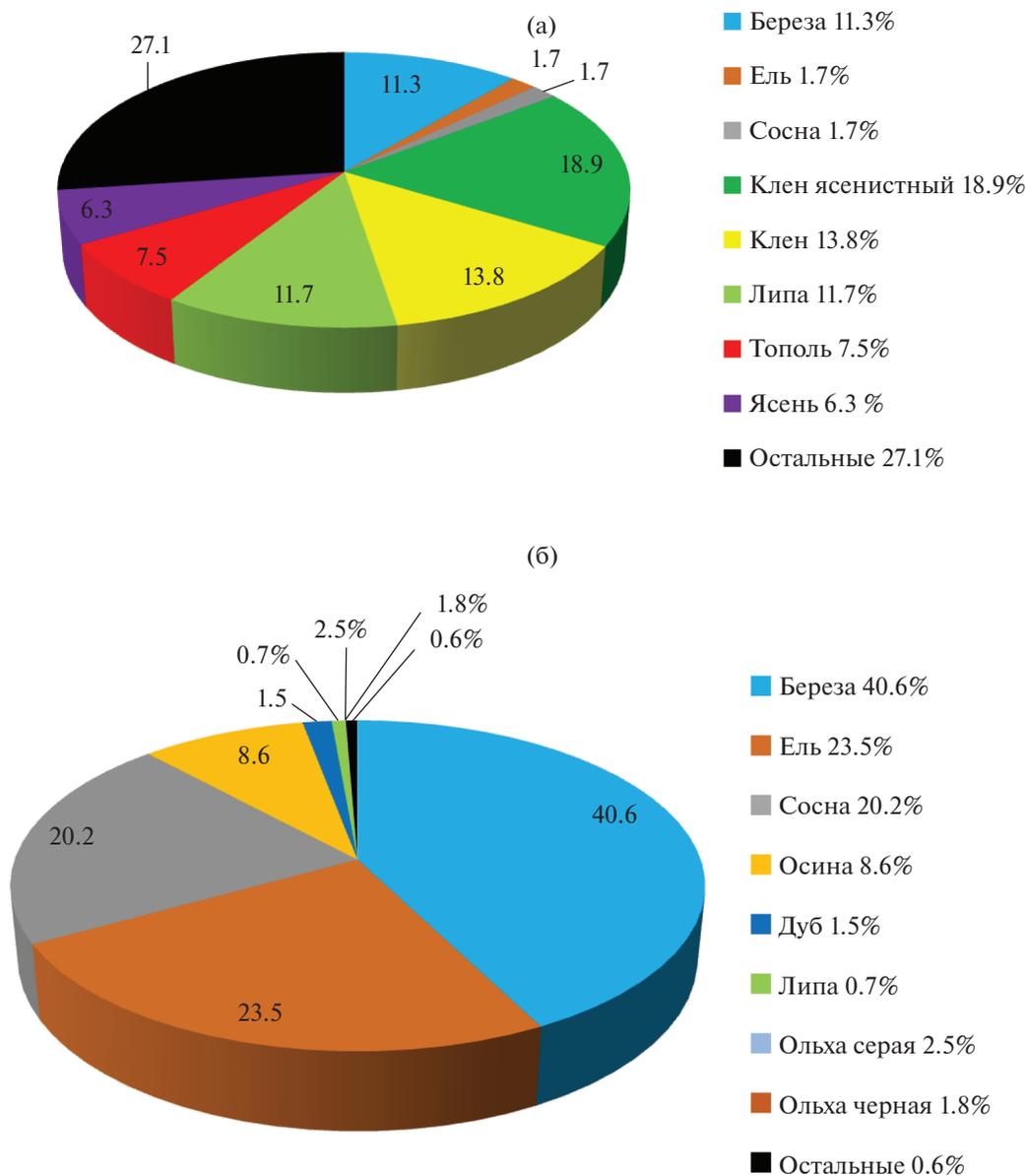
Несмотря на то, что запасы органического вещества в древостое значительно выше его запасов в подстилках, постоянный поток поступающего органического вещества за счет ежегодного опада и динамичность свойств подстилок определяют высокие риски смещения сбалансированного соотношения процессов формирования подстилок в сторону ускорения их минерализации и изменения углеродного баланса.

Изменения баланса органического вещества и углерода в условиях города, прежде всего, связано с антропогенными воздействиями на экосистемы.

### *Лиственные насаждения: применение системы ухода и сбора подстилки*

Особенности биологического круговорота, протекающего в условиях городских насаждений, осложняются целым рядом мероприятий, представляющих собой специальную систему ухода за зелеными насаждениями. Среди них следует назвать удаление подростка и подлеска, сбор опада и кошение травостоя. Удаление подростка и подлеска приводит к упрощению вертикальной структуры фитоценоза, уменьшению запасов растительного опада, поступающего на поверхность почвы, а также проникновению светлюбивых видов в живой напочвенный покров (Телеснина, Семенюк, 2022).

Сбор опада обуславливает изъятие органического вещества из цикла углерода, тем самым снижая его включение в процессы биологического круговорота. Уборка и вывоз подстилки зачастую являются предметом дискуссий, т.к. подстилка выполняет широкий спектр экологических функций и ее удаление приводит к трансформации биогеоценозов. Мероприятия по сбору и вывозу подстилки проводятся для селитебных и селитебно-транспортных ландшафтов, а также тех частей парковых территорий, которые активно



**Рис. 1.** Породный состав зеленых насаждений Москвы (2020) и Московской области (2018) (Доклад “О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2020 году”. Москва, 2021; Лесной план Московской области на 2019–2028 годы. Книга 2 (Приложения). Красногорск. 2018. URL: <https://klh.mosreg.ru/download/document/3613606>): (а) – Москва, (б) – Московская область.

используются в рекреационных целях, и эта необходимость обосновывается несколькими причинами. Удаление подстилки снижает возможность ее самопроизвольного возгорания, что снижает пожароопасность, уменьшаются вероятность поступления опада в водостоки с последующим их загрязнением, негативное влияние аллергического компонента подстилки на здоровье населения, вероятность травм для пешеходов в сырую погоду при попадании листьев на пешеходные дорожки, уровень потенциального загрязнения почвы и грунтовых вод.

Результаты исследования влияния ухода за насаждениями на подстилки показали, что периодический и регулярный сбор опада приводит к значительному изменению свойств подстилок, снижая их мощность и запасы. В условиях ухода снижение мощности подстилок оценивается от 50 до 100%, что часто выражается в фрагментарном покрытии поверхности почвы.

В условиях ухода за насаждениями и сбора подстилки потери углерода оказываются в 2–3 раза выше, чем при убыли запасов подстилки в результате годового цикла преобразования органического

**Таблица 1.** Ежегодно реализуемый углерод подстилок в естественном биологическом круговороте и снижение его запасов в условиях ухода за листовыми насаждениями (кг/100 м<sup>2</sup> и %)

Насаждения	Общий запас углерода в подстилках, кг/100м <sup>2</sup> (после листопада)	Снижение запасов углерода в подстилках					
		ежегодно реализуемый углерод в естественном биологическом круговороте		потеря углерода при сборе подстилки в условиях ухода			
		потеря углерода, кг/100 м <sup>2</sup>	доля от общего запаса, %	периодический уход		регулярный уход	
				потеря углерода, кг/100 м <sup>2</sup>	доля от общего запаса, %	потеря углерода, кг/100 м <sup>2</sup>	доля от общего запаса, %
Береза	23.9	5.7	24	13.6	57	20.8	87
Липа	23.6	8.7	37	9.4	40	19.1	81
Клен	30.4	10.3	34	6.1	20	22.5	74

вещества (табл. 1). Из круговорота удаляется при периодическом уходе 45–60%, а при регулярном – до 90% от общих запасов подстилки.

Как показывают исследования, в процессе естественного функционирования подстилок ежегодно реализуется 25–40% от общих запасов подстилки, в то время как в результате сбора подстилки в осенний период из экосистем удаляется до 80–90% запасов органического вещества детрита, что приводит практически к полной потере углерода детрита из данных экосистем (табл. 1). Однако сбор детрита предполагает дальнейшую переработку и вторичное использование изъятых органического вещества, что на уровне глобального цикла углерода определяет его относительно невысокие потери и характеризует данный подход утилизации как весьма экологичный.

В условиях ухода снижение запасов подстилок главным образом связано с механическим удалением опада. Однако потери органического вещества подстилок отмечаются также и в результате интенсификации биологического круговорота в листовых насаждениях, подверженных уходу. По причине упрощения вертикальной структуры, приводящей к увеличению освещенности, а также в результате кошения травостоя и, как следствие, увеличения видового разнообразия травянистых растений и доли видов с высоким содержанием зольных элементов, поступающих в почву, усиливается активность микробиоты, разлагающей органическое вещество (Телеснина и др., 2018), что приводит к интенсификации круговорота, снижению запасов подстилки и высвобождению углерода из детрита.

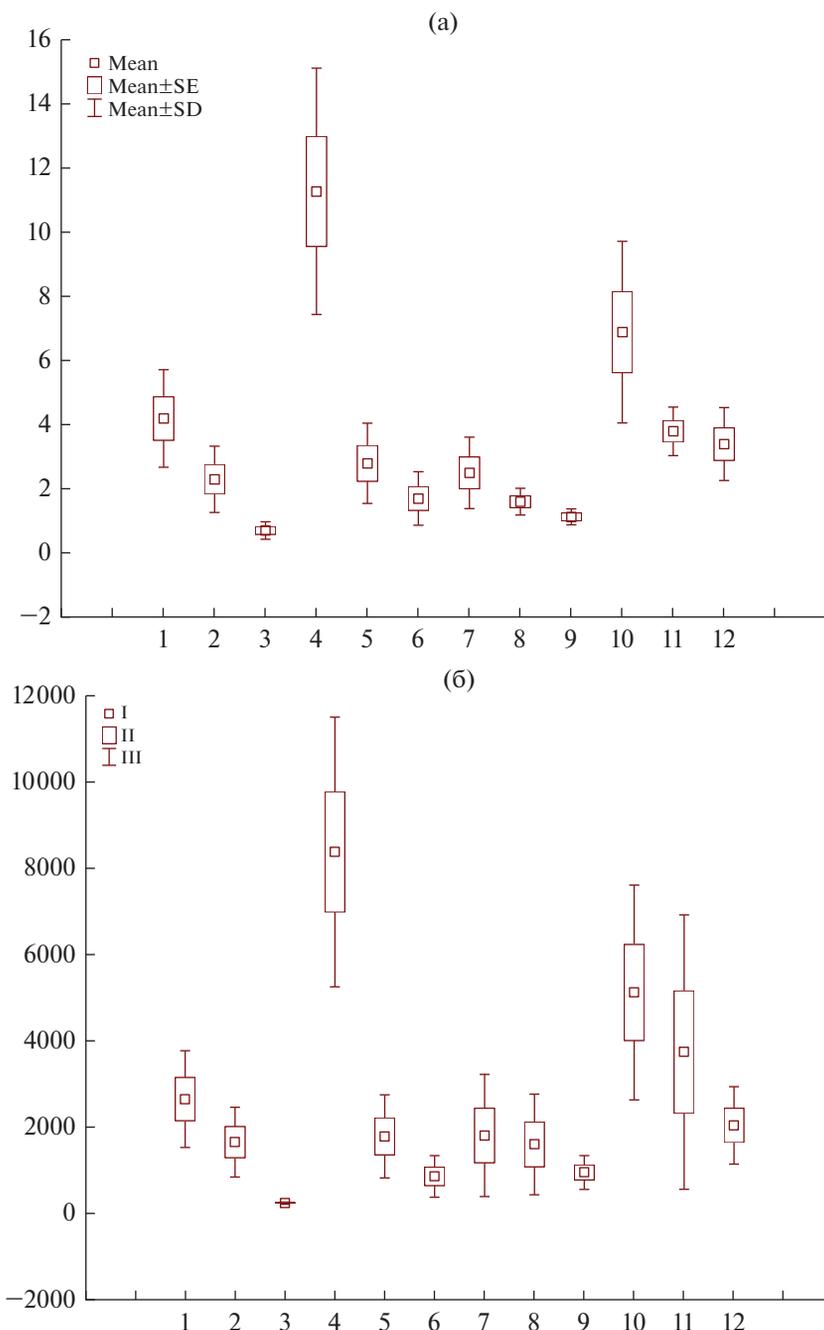
*Хвойные насаждения: влияние рекреации на свойства подстилок и баланс углерода*

По сравнению с подстилками листовых насаждений, подстилки еловых насаждений характеризуются значительным накоплением органического вещества (до 10000 г/м<sup>2</sup>), в ельниках

раньше наступает дигрессия в результате рекреации (Карпачевский, 2005; Ильина, Сапожников, 2007; Кузнецов и др., 2017), поэтому ельники наиболее показательны в плане оценки антропогенного воздействия на свойства подстилок. Функция депонирования углерода в подстилках приобретает особую актуальность в рамках проблемы глобального потепления климата, выявления источников прямого и косвенного антропогенного влияния на углеродный баланс, а также оценки вклада эмиссии углерода в атмосферу урбанизированными территориями. В отличие от листовых насаждений, для хвойных отмечается высокая неоднородность пространственного распределения свойств подстилок в результате дифференцирующего влияния кроны дерева-эдификатора. Перечисленные выше особенности подстилок определили необходимость проведения детального изучения детрита хвойных фитоценозов при решении вопроса об оценке изменения состояния детрита и запаса углерода подстилок хвойных насаждений в условиях рекреации.

Результаты исследований рекреационного воздействия на подстилки хвойных насаждений показали, что в условиях рекреации в системе ствол-крона-окно наблюдаются значительные изменения свойств подстилок. Отмечено упрощение строения подстилок в результате антропогенного воздействия, что наиболее ярко проявляется в еловых насаждениях – если в ненарушенных насаждениях встречаются 3 типа подстилок – гумифицированные (горизонты L-F-H), ферментативные (горизонты L-F) и деструктивные (горизонт L) подстилки, то в рекреационном ельнике гумифицированные подстилки не встречаются, а деструктивные преобладают над ферментативными. В контрольном листовничнике встречаются исключительно ферментативные подстилки, тогда как в рекреационном появляются деструктивные.

При рекреационном воздействии сокращается мощность подстилок, что наиболее ярко проявляется в приствольных пространствах (рис. 1) – в



**Рис. 2.** Мощность (а) и запасы (б) подстилок. Ельник рекреационный: 1 – ствол, 2 – крона, 3 – окно; ельник контрольный: 4 – ствол, 5 – крона, 6 – окно; лиственничник рекреационный: 7 – ствол, 8 – крона, 9 – окно; лиственничник контрольный: 10 – ствол, 11 – крона, 12 – окно.

3 раза – в ельниках, в 2.5 – в лиственничниках. При этом в ельниках выявлено значимое уменьшение мощности только в приствольных пространствах и окнах, а в лиственничниках во всех компонентах тессеры (рис. 2). Форма кроны лиственницы в течение жизни меняется от конической до цилиндрической, что также отражается на равномерности поступления опада и формировании пространственного распределения под-

стилки (Коропачинский, Встовская, 2012). Следовательно, поскольку ель и лиственница принципиально различаются по строению кроны, периодичности опада и составу хвои, это сказывается на свойствах подстилок и их пространственном распределении.

Установленные различия свойств подстилок по элементам тессеры на контрольных участках выражены в ельнике более отчетливо, чем в лист-

**Таблица 2.** Показатели функционирования подстилок хвойных насаждений

Участок тессеры	Запасы мелких фракций, г/м <sup>2</sup>	Долевое участие мелких фракций, %	L/F + H (мощность)	L/F + H (запас)
Ельник нарушенный				
Ствол	44.0	3.3	0.8	0.4
Крона	37.0	5.3	0.4	0.5
Окно	8.4	3.2	0.7	0.7
Ельник контрольный				
Ствол	185.4	14.3	0.3	0.2
Крона	248.2	19.8	1.0	1.5
Окно	90.1	13.3	0.5	0.8
Лиственничник нарушенный				
Ствол	215.7	8.0	0.6	0.8
Крона	415.7	7.3	1.7	0.8
Окно	239.4	12.1	3.6	7.6
Лиственничник контрольный				
Ствол	240.6	10.5	0.7	0.2
Крона	111.2	8.0	0.3	0.1
Окно	72.9	6.9	0.6	0.2

венничнике (табл. 2). Пространственное распределение мощности и запасов подстилки в ненарушенных насаждениях весьма неоднородно — в приствольных повышениях мощность и запасы выше, чем в других точках тессеры, особенно в ельнике (в 4–8 раз).

Ненарушенные хвойные насаждения, особенно еловые, в условиях города накапливают значительные запасы органического вещества, сопоставимые с запасами аналогичных природных ненарушенных насаждений (Семенюк и др., 2022), и депонируют углерод в форме наземного детрита. Мощность подстилок и их запасы существенно сокращаются при рекреационном воздействии, особенно в приствольных пространствах, нивелируется ее различие под разными частями кроны. В рекреационном ельнике запасы подстилок значимо снижаются в приствольных пространствах и окнах по сравнению с контролем, тогда как в нарушенном лиственничнике уменьшение запасов во всех компонентах тессеры имеет характер тенденции. Применительно к еловым насаждениям наиболее уязвимыми зонами тессеры в плане влияния рекреации являются приствольные пространства и зона окон, которые наиболее перспективны для использования при мониторинговых исследованиях наземного детрита. В лиственничных насаждениях такими зонами являются приствольные пространства, хотя дифференциация свойств подстилок выражена меньше — как в ненарушенных, так и в рекреационных насаждениях.

Перечисленные различия в свойствах подстилок изученных насаждений дополняются показателями функционирования подстилок (табл. 2). Одним из показателей интенсивности биологического круговорота является доля мелких фракций, относительное увеличение которой свидетельствует о меньшей активности разложения органического вещества и его депонировании (Семенюк и др., 2021a; Семенюк и др., 2021b и др.). В еловых ненарушенных насаждениях во всех компонентах тессер доля этой фракции в 4–5 раз выше, чем в подстилках рекреационного ельника, различия еще более существенны для запасов мелких фракций. Для лиственничных насаждений подобной тенденции не наблюдается, что, возможно, связано со своеобразием биологии лиственницы — с одной стороны, это хвойная порода, с другой — хвоя более легко разлагается и ежегодно опадает со всех частей кроны, в отличие от ели. Поэтому в определенном смысле лиственничные подстилки подобны лиственным, и некоторые показатели могут не реагировать существенно на рекреационную нагрузку.

Что касается отношения мощности (или запасов) горизонта L к сумме мощностей (или запасов) других горизонтов, увеличение этого показателя в рекреационных насаждениях хорошо выражено в лиственничниках, тогда как в ельниках — только в приствольных пространствах.

Запасы углерода подстилок, рассчитанные на 100 м<sup>2</sup>, различаются для ненарушенных еловых и лиственничных насаждений, в ненарушенных насаждениях ели запасы углерода почти в 1.5 раза

**Таблица 3.** Запасы углерода (кг/100 м<sup>2</sup>) и его потери (%) из подстилок хвойных насаждений в условиях рекреации

Насаждения		Запасы углерода		
		общий запас, кг/100м <sup>2</sup>	потеря запаса, кг/м <sup>2</sup>	доля потери от общего запаса, %
Ельник	Контроль	83.2	22.6	27
	Рекреация	60.6		
Лиственничник	Контроль	116.1	66.1	57
	Рекреация	50.0		

ниже, чем в лиственничнике (табл. 3). В ходе рекреации эти различия несколько нивелируются.

В хвойных насаждениях, подверженных рекреации, отмечается существенное снижение запасов углерода, накопленного наземным детритом, в 1.4 раз и в 2.3 раза в ельниках и лиственничниках соответственно. Потери углерода составляют для подстилок еловых насаждений 27%, а для лиственничных насаждений – 57% от общего запаса углерода подстилок.

При сопоставлении абсолютных потерь углерода в результате уборки подстилки для лиственных насаждений и в результате рекреации для хвойных (рис. 3) максимальные потери выявлены для лиственничных насаждений, тогда как минимальные – для кленовых насаждений с периодическим уходом. Таким образом, периодический уход наименее травматичен для углеродного баланса экосистемы. Если рассматривать потерю углерода в долях от изначального запаса, картина несколько другая – 70–90% углерода подстилки теряется при регулярном уходе за лиственными насаждениями, в то время как потеря при рекреации в хвойных насаждениях примерно сопоставима с потерей при периодическом уходе. Однако потеря углерода в лиственничниках и здесь превышает аналогичный показатель в ельниках.

Потери запасов углерода, накапливаемого наземным детритом, определяются суммой биогенных, абиогенных процессов и антропогенного воздействия – физическим измельчением компонентов подстилки, перемешиванием подстилки с минеральными горизонтами, активностью микробиоты и т.д. В результате происходит перераспределение углерода в другие компоненты экосистемы, в том числе и поступление в атмосферу в составе диоксида углерода. Возможно, более интенсивные потери углерода наземного детрита в результате рекреационного воздействия в лиственничных насаждениях, нежели в еловых, обусловлены изначально большей микробиологической активностью при разложении опада, что отражается в повышении скорости биологического круговорота органического вещества.

В биологическом круговороте экосистем, в том числе и городских, зеленые насаждения, их опад и формирующиеся из него подстилки (назем-

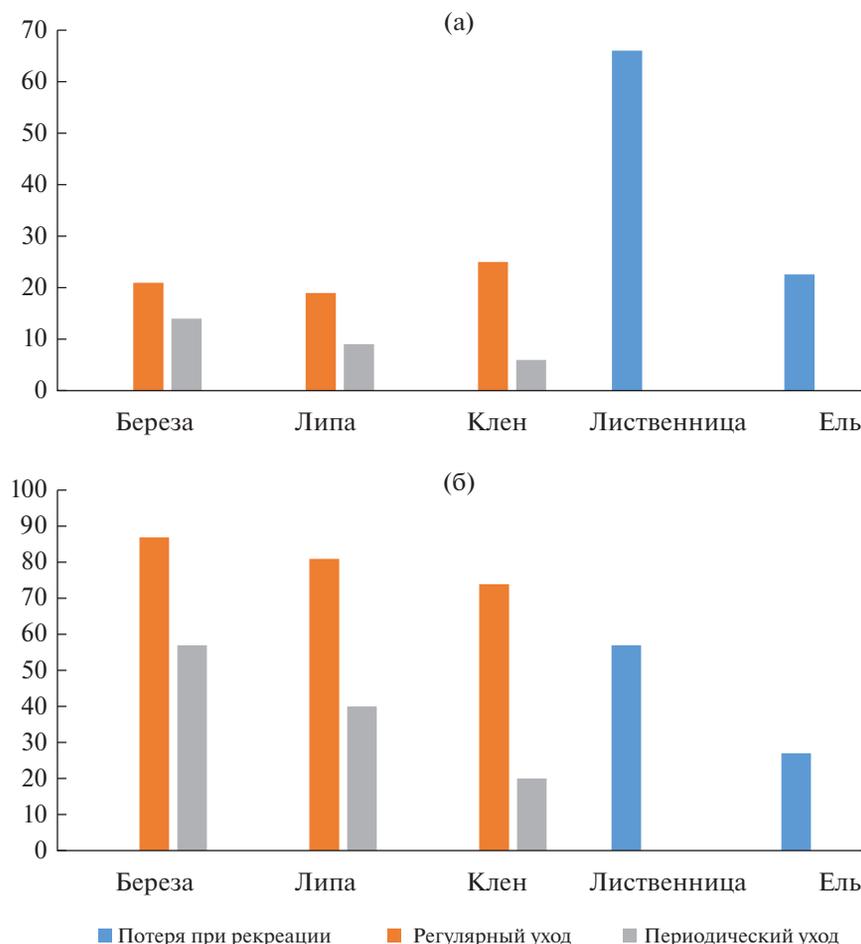
ный детрит) являются важнейшими составляющими механизма, который обеспечивает депонирование углерода. Подстилка является интегральным показателем биологического круговорота, отражающим основные направления функционирования экосистем, которая чрезвычайно отзывчива на смену локальных экологических условий и антропогенных воздействий, в том числе на и городских территориях (Богатырев и др., 1999; Семенюк и др., 2021; Семенюк и др., 2022). На основе изучения свойств подстилок можно диагностировать особенности экологического состояния и биологического круговорота насаждений в различных экологических условиях, оценить влияние антропогенных факторов и определить соотношение потери и депонирования органического вещества в системе, что имеет несомненную ценность при изучении баланса углерода.

Доступность изучения, простота получения информации об основных свойствах в полевых условиях и высокая чувствительность к антропогенным воздействиям позволяют использовать подстилки, прежде всего, хвойных насаждений, в качестве индикаторов для экспресс-оценки состояния органического вещества и направленности биологического круговорота в системе городского мониторинга.

Адаптация урбоэкосистем к антропогенным воздействиям возможна на основе управления углеродным балансом в направлении снижения антропогенных поступлений CO<sub>2</sub> в атмосферу как за счет его накопления в живом и мертвом веществе зеленых насаждений, так и за счет предотвращения или снижения интенсивности разложения органического вещества наземного детрита.

Полученные в результате исследования материалы позволяют сформулировать некоторые предложения по управлению зеленым каркасом города.

К наиболее экологически ценным среди городских насаждений относятся ненарушенные и слабо нарушенные экосистемы по причине стабильного состояния баланса углерода. В контексте вопроса углеродного следа особое экологическое значение приобретают особо охраняемые природные территории (ООПТ), которые являются основными депозитариями природных и квазиприрод-



**Рис. 3.** Потеря углерода наземного детрита (подстилки) в ходе антропогенного воздействия: (а) – абсолютная, кг/100 м<sup>2</sup>, (б) – в % от исходного запаса.

ных экосистем. ООПТ нуждаются в сохранении, в том числе путем уменьшения активности использования с минимальным размещением на их территории объектов инфраструктуры, а также в увеличении их площади, что положительно скажется на балансе углерода как на локальном, так и глобальном уровне.

В зеленом каркасе города в целом применение периодического ухода за лиственными насаждениями по сравнению с регулярным оказывает минимальное влияние на углеродный баланс, что является основанием для рекомендации к его широкому применению в пределах городских территорий.

Несмотря на то, что хвойные породы по сравнению с лиственными менее устойчивы в городской среде, они являются более затратными как при выращивании посадочного материала, так и в уходе, относительно низкая скорость биологического круговорота в хвойных биогеоценозах и формирование значительного запаса органического вещества в подстилках позволяют рассмат-

ривать еловые насаждения как наиболее эффективные с точки зрения депонирования углерода и рекомендовать увеличение их долевого участия в формировании зеленого каркаса города.

Для оптимального функционирования и углеродного баланса в хвойных насаждениях необходим режим их максимальной сохранности, особенно для лиственничных насаждений, которые в ходе рекреации теряют больше углерода из наземного детрита, чем еловые, поэтому нуждаются в особом регулировании рекреационной нагрузки.

При организации мониторинга за запасами наземного детрита в качестве точек отбора образцов рекомендуется использование зоны окон и приствольных пространств еловых насаждений как наиболее чувствительных к рекреационной нагрузке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В урбоэкосистемах по сравнению с природными отмечается увеличение интенсивности биоло-

гического круговорота, что связано с изменением соотношения древесных пород в зеленом каркасе города в сторону существенного увеличения доли лиственных, применением системы ухода за зелеными насаждениями и деструктивным воздействием рекреации на подстилки. Потери углерода подстилок хвойных насаждений (20–57%) в результате рекреационного воздействия в процентном выражении ниже, чем его убыль (до 90%) при сборе опада лиственных пород, однако в абсолютном выражении снижение запасов углерода сопоставимы и составляют 20–23 кг/100м<sup>2</sup> за исключением варианта подстилок лиственных насаждений, где потери углерода в 3 раза выше. Все исследованные варианты городских зеленых насаждений, подверженные выраженному антропогенному воздействию, демонстрируют снижение замкнутости биологического круговорота по сравнению с ненарушенными.

Подстилка, несмотря на небольшой вклад в общий запас углерода экосистемы, является наиболее мобильным горизонтом, связывающим растительность и минеральные горизонты почвы, а ее типология и свойства – важнейшие характеристики, которые могут быть использованы для проведения мониторинга городских экосистем.

В городских условиях изменение направленности круговорота органического вещества в сторону его депонирования в составе наземного детрита может быть осуществлено как путем регулирования интенсивности ухода за зелеными насаждениями, так и за счет снижения его потерь при рекреации – путем реализации проектных решений по организации ландшафтных объектов с отведением транзитных потоков посетителей от мест расположения хвойных экосистем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранова О.Ю., Семенов О.В. Экологические подходы и особенности проектирования на озелененных природоохранных городских территориях // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2018. № 4(39). С. 23–32.
- Богатырев Л.Г. О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
- Богатырев Л.Г., Алябина И.О. Поведение органического углерода в почвах // Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Изд-во “Астрель”, 2011. С. 226–228.
- Богатырев Л.Г., Сапожникова В.А., Воедино А.А. Трансформация органического вещества в сосновых экосистемах как один из критериев оценки интенсивности круговорота // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. 1999. № 3. С. 13–23.
- Горохов В.А. Зеленая природа города. М.: Архитектура-С, 2005. 592 с.
- Доклад “О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2020 году”. / Под ред. А.О. Кульбачевского. 2021. 330 с.
- Замолодчиков А.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Вопросы лесной науки. 2018. Т. 1. № 1. С. 1–24.
- Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.
- Зонн С.В., Карпачевский Л.О. Проблемы лесного почвоведения и современные методы лесорастительной оценки почв // Почвоведение. 1987. № 9. С. 6–15.
- Ильина Т.М., Сапожников А.П. Лесные подстилки как компонент лесного биогеоценоза // Вестник КрасГАУ. 2007. № 5. С. 45–47.
- Казанцева М.Н., Соловьева А.А. Экологические последствия радикальной обрезки крон тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в городских насаждениях Тюмени // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2009. № 9. С. 128–135.
- Казимирова Р.Н. Почвенно-биогеоценозические исследования в парках и лесах южного берега Крыма // Почвоведение. 1987. № 7. С. 89–95.
- Калякина Р.Г., Ангальт Е.М., Бурлуцкий А.Ю. Формирование лесной подстилки в городских лесах (на примере урочища Качкарский мар) // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 4(66). С. 250–252.
- Карпачевский Л.О. Экологическое почвоведение. М.: ГЕОС, 2005. 336 с.
- Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения азиатской России. Новосибирск: Гео, 2012. 707 с.
- Кузнецов В.А., Рыжова И.М., Стома Г.В. Изменение свойств почв лесопарков Москвы при высоком уровне рекреационной нагрузки // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1270–1280.
- Лесной план Московской области на 2019–2028 годы. Книга 2. Красногорск, 2018. 345 с. URL: <https://klh.mosreg.ru/download/document/3613606>
- Лукина Н.В., Исаев А.С., Крышень А.М., Онучин А.А., Сирин А.А., Гагарин Ю.Н., Барталев С.А. Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами // Лесоведение. 2015. № 4. С. 243–254.
- Лукина Н.В., Гераськина А.П., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Куприн А.В., Чернов Т.И., Чуmachenко С.И., Шанин В.Н., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Горнова М.В. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 4. С. 1–90.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 253 с.
- Полякова Г.А. Флора и растительность старых парков Подмосковья. М.: Наука, 1992. 224 с.
- Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.: Наука, 1965. 264 с.
- Рысин Л.П., Абатуров А.В., Савельева Л.И., Меланхольд П.Н., Полякова Г.А., Рысин С.Л. Динамика и устойчивость рекреационных лесов. М.: Т-во научных изданий КМК, 2006. 165 с.

- Рысин Л.П.* Рекреационное лесопользование: научные и практические аспекты // Лесобиологические исследования на Северо-Западе таежной зоны России: итоги и перспективы. Материалы научной конференции, посвященной 50-летию Института леса Карельского научного центра РАН (3–5 октября). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 83–94.
- Рысин С.Л., Рысин Л.П.* О необходимости разработки концепции рекреационного лесопользования на урбанизированных территориях // Лесной вестник. 2011. № 4. С. 129–138.
- Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И.* Использование особенностей структурно-функциональной организации подстилок для оценки интенсивности круговорота в городских насаждениях (на примере Москвы) // Почвоведение. 2021а. № 5. С. 592–605.
- Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И.* Оценка влияния ухода за городскими насаждениями на свойства подстилок в условиях мегаполиса // Вестник Моск. ун-та. Серия 17. Почвоведение. 2021б. № 2. С. 3–10.
- Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д.* Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43.
- Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Земсков Ф.И.* Подстилки городских насаждений как индикатор интенсивности биологического круговорота в условиях мегаполиса // Почвоведение. 2022. № 6. С. 1–14.
- Спицына Н.Т., Дашеева О.С.* Комплексная оценка состояния рекреационных насаждений города Улан-Удэ Республики Бурятия // Хвойные бореальной зоны. 2020. Т. 38. № 3–4. С. 136–145.
- Телеснина В.М., Семенюк О.В.* Индикационная роль травяного яруса в почвенно-экологических исследованиях в условиях ухода за озелененными территориями г. Москвы (на примере территории МГУ) // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. 2022. № 1. С. 42–51.
- Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И.* Особенности напочвенного покрова и лесных подстилок в искусственных липовых насаждениях в зависимости от характера ухода (на примере УОПЭЦ “Чашниково”) // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. 2018. № 2. С. 3–11.
- Чертов О.Г., Надпорожская М.А.* Модели динамики органического вещества почв: проблемы и перспективы // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 2. С. 391–399.
- Щенаценко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
- Chen X., Zhang X., Xu Zh., Wei H.* Urbanization induced changes in the accumulation mode of organic carbon in the surface soil of subtropical forests. *Catena*. 2022. V. 214. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106264>
- Mandal S., Chatterjee P., Das N., Banerjee R., Batabual S., Gangopadhyay S., Mondal A.* Modelling the role of urban forest in the regulation of carbon balance in an industrial area of India. *Acta Ecologica Sinica*. 2022. V. 42. № 5. P. 553–564. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.05.005>
- O'Brien L.E., Urbanek R.E., Gregory J.D.* Ecological Functions and human benefits of urban of urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2022. V. 75. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127707>

## The Role of Greenery in Adaptation of Urban Ecosystems to Climate Change

O. V. Semenyuk<sup>1</sup>\*, V. M. Telesnina<sup>1</sup>, L. G. Bogatyryov<sup>1</sup>, and O. Yu. Baranova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

<sup>2</sup>Central research and engineering institute of the Construction Ministry of the Russian Federation, Vernadskogo ave., 29, Moscow, 119331 Russia

\*E-mail: olgatour@rambler.ru

In order to develop proposals for managing the functioning of the city's green frame, a study has been carried out, regarding tree plantations and their litter layers, as well as some aspects of the urban ecosystems' biological cycle of as part of the optimisation of the carbon footprint. The topic's relevance is due to the global warming and the need to identify sources of direct and indirect anthropogenic impact on the carbon balance, as well as the need to assess the contribution of carbon emissions to the atmosphere of urban areas. The litter, despite its small contribution to the total carbon stock of the ecosystem, is the most mobile horizon, connecting vegetation and mineral soil horizons, thus its typology and properties are the most important characteristics that can be used to monitor urban ecosystems. It has been established that in urban ecosystems, compared to the natural analogues, there is an increase in the biological cycle intensity, which is associated with the following factors: a shift in the ratio of tree species in the city's green frame towards a significant increase in the proportion of deciduous trees, the use of a greenery maintenance system and the destructive impact of recreation on litter layers. The percentage decrease in the amount of carbon in the litter of coniferous plantations as a result of recreational impact is 20–57%, in the case of the leaf litter collection – up to 90%, while in absolute terms the loss of carbon reserves is comparable and equal to 20–23 kg/100 m<sup>2</sup> (we note that that the litter variant of larch plantations shows the absolute values of carbon losses 3 times higher). All studied variants of urban greenery subject to pronounced anthropogenic impact, demonstrate a decrease in the biological cycle isolation compared to undisturbed ones. A change in the organic matter circulation direction in urban ecosystems towards its depositing as a part of terrestrial detritus can be implemented both by regulating

the intensity of the greenery maintenance, and by reducing its loss during recreation – design solutions for the organisation of landscape objects with the diversion of visitors' transit flows from the locations of conifers ecosystems.

*Keywords:* urban ecosystems, biological cycle, carbon balance, forest floor, green frame, monitoring.

**Acknowledgements:** The study has been carried out within the framework of the State contract № 121040800321-4 “The indicators of the transformation of biogeochemical cycles of biogenic elements in natural and anthropogenic ecosystems” and the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow State University. “The future of the planet and global environmental changes”.

## REFERENCES

- Baranova O.Y., Semenyuk O.V., *Ekologicheskoe proektirovanie na ozelenennykh prirodookhrannykh gorodskikh territoriyakh* (Environmental approaches and features of design for green specially protected natural urban areas), *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN*, 2018, No. 4(39), pp. 22–27.
- Bogatyrev L.G., Alyabina I.O., *Povedenie organicheskogo ugleroda v pochvakh* (Behavior of organic carbon in soils), In: *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* (National Atlas of Soils of the Russian Federation), Moscow: Izd-vo “Astrel”, 2011, pp. 226–228.
- Bogatyrev L.G., *O klassifikatsii lesnykh podstilok* (On forest litter classification), *Pochvovedenie*, 1990, No. 3, pp. 118–127.
- Bogatyrev L.G., Sapozhnikova V.A., Voedilo A.A., *Transformatsiya organicheskogo veshchestva v sosnovykh ekosistemakh kak odin iz kriteriev otsenki intensivnosti krugovorota* (Transformation of organic matter in pine ecosystems as one of the criteria for assessing the intensity of the cycle), *Vestnik MGU. Seriya 17. Pochvovedenie*, 1999, No. 3, pp. 13–23.
- Chen X., Zhang X., Xu Zh., Wei H., *Urbanization induced changes in the accumulation mode of organic carbon in the surface soil of subtropical forests*, *Catena*, 2022, Vol. 214. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106264>
- Chertov O.G., Nadporozhskaya M.A., *Modeli dinamiki organicheskogo veshchestva pochv: problemy i perspektivy* (Models of soil organic matter dynamics: problems and perspectives), *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*, 2016, Vol. 8, No. 2, pp. 391–399.
- Doklad “O sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2020 godu”*, (Report “On the state of the environment in the city of Moscow in 2020”), 2021, 330 p.
- Gorokhov V.A., *Zelenaya priroda goroda* (Green nature of the city), Moscow: Arkhitektura-S, 2005, 592 p.
- Il'ina T.M., Sapozhnikov A.P., *Lesnye podstilki kak komponent lesnogo biogeotsenoza* (Forest litter as a component of forest biogeocenosis), *Vestnik KrasGAU*, 2007, No. 5, pp. 45–48.
- Kalyakina R.G., Angal't E.M., Burlutskii A.Y., *Formirovanie lesnoi podstilki v gorodskikh lesakh (na primere urochishcha Kachkarskii mar)* (Forest litter formation in urban forests (on the pattern of the Kachkarsky Mar natural boundary)), *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, No. 4(66), pp. 250–252.
- Karpachevskii L.O., *Ekologicheskoe pochvovedenie* (Ecological soil science), Moscow: GEOS, 2005, 336 p.
- Kazantseva M.N., Solov'eva A.A., *Ekologicheskie posledstviya radikal'noi obrezki kron topolya bal'zamicheskogo (Populus balsamifera L.) v gorodskikh nasazhdeniyakh Tyumeni* (Ecological consequences of crowns radically cuttings of balsam poplar (*Populus balsamifera L.*) in urban plantations of Tyumen), *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*, 2009, No. 9, pp. 128–135.
- Kazimirova R.N., *Pochvenno-biogeotsenoticheskie issledovaniya v parkakh i lesakh yuzhnogo berega Kryma* (Soil-biogeocenotic studies in parks and forests of the southern coast of Crimea), *Pochvovedenie*, 1987, No. 7, pp. 89–95.
- Koropachinskii I.Y., Vstovskaya T.N., *Drevesnye rasteniya aziatskoi Rossii* (Woody plants of Asian Russia), Novosibirsk: Geo, 2012, 707 p.
- Kuznetsov V.A., Ryzhova I.M., Stoma G.V., *Changes in the properties of soils of Moscow forest parks under the impact of high recreation loads*, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 10, pp. 1225–1235.
- Lesnoi plan Moskovskoi oblasti na 2019–2028 gody*, (Forest plan of the Moscow region for 2019–2028), Krasnogorsk, 2018, Book 2, available at: <https://klh.mosreg.ru/download/document/3613606>
- Lukina N.V., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Chernov T.I., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N., Gornova M.V., *Bioraznობrazie i klimatoreguliruyushchie funktsii lesov: aktual'nye voprosy i perspektivy issledovaniya* (Biodiversity and climate regulating functions of forests: current issues and prospects for research), *Voprosy lesnoi nauki*, 2020, Vol. 3, No. 4, pp. 1–90.
- Lukina N.V., Isaev A.S., Kryshen' A.M., Onuchin A.A., Sirin A.A., Gagarin Y.N., Bartalev S.A., *Prioritetnye napravleniya razvitiya lesnoi nauki kak osnovy ustoichivogo upravleniya lesami* (Research priorities in forest science – the basis of sustainable forest management), *Lesovedenie*, 2015, No. 4, pp. 243–254.
- Mandal S., Chatterjee P., Das N., Banerjee R., Batabual S., Gangopadhyay S., Mondal A., *Modelling the role of urban forest in the regulation of carbon balance in an industrial area of India*, *Acta Ecologica Sinica*, 2022, Vol. 42, No. 5, pp. 553–564. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.05.005>
- O'Brien L.E., Urbanek R. E., Gregory J.D., *Ecological Functions and human benefits of urban of urban forests*, *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, Vol. 75. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127707>
- Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I., *Organicheskoe veshchestvo pochv Rossiiskoi Federatsii* (Organic matter in soils of the Russian Federation), Moscow: Nauka, 1996, 253 p.

- Polyakova G.A., *Flora i rastitel'nost' starykh parkov Podmoskov'ya* (Flora and vegetation of old parks of Podmoskov'ye), Moscow: Nauka, 1992, 224 p.
- Rodin L.E., Bazilevich N.I., *Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskii krugovorot zol'nykh elementov i azota v osnovnykh tipakh rastitel'nosti zemnogo shara* (Organic matter dynamics and biogeochemical cycles of mineral constituents and nitrogen across the dominant vegetation types around the world), Moscow–Leningrad: Nauka, 1965, 253 p.
- Rysin L.P., Abaturov A.V., Savel'eva L.I., Melankholin P.N., Polyakova G.A., Rysin S.L., *Dinamika i ustoychivost' rekreatsionnykh lesov* (Dynamics and sustainability of recreational forests), Moscow: T-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2006, 165 p.
- Rysin L.P., *Rekreatsionnoe lesopol'zovanie: nauchnye i prakticheskie aspekty* (Recreational forest management: scientific and practical aspects), *Lesobiologicheskie issledovaniya na Severo-Zapade taezhnoi zony Rossii: itogi i perspektivy* (Forest biological research in the North-West of the taiga zone of Russia: results and prospects), Petrozavodsk, Proc. of Sci. Conf., dedicated to the 50th anniversary of Forest Institute of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences, 3–5 October, 2007, Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2007, pp. 83–94.
- Rysin S.L., Rysin L.P., *O neobkhodimosti razrabotki kontseptsii rekreatsionnogo lesopol'zovaniya na urbanizirovannykh territoriyakh* (On the necessity of developing of a concept of recreational use of forests in the urbanized areas), *Lesnoi vestnik*, 2011, No. 4, pp. 129–138.
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F., *The pool of organic carbon in the soils of Russia*, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 2, pp. 107–116.
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Kuznetsova Y.D., *Assessment of intra-biogeocenotic variability of forest litters and dwarf shrub–herbaceous vegetation in spruce stands*, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 1, pp. 27–38.
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., *Structural and functional organization of forest litters as indicators of biological cycling intensity in urban forest stands (an example of Moscow)*, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 5, pp. 738–749.
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., *Otsenka vliyaniya ukhoda za gorodskimi nasazhdeniyami na svoystva podstilok v usloviyakh megapolisa* (The features of urban ecosystem litters according to type of planting care), *Vestnik Mosk. un-ta. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2021, No. 2, pp. 3–10.
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Zemskov F.I., *Litters of urban stands as an indicator of the intensity of biological cycling in a megapolis (by the example of Bitsevsky park, Moscow)*, *Eurasian Soil Science*, 2022, Vol. 55, No. 6, pp. 710–721.
- Spitsyna N.T., Dasheeva O.S., *Kompleksnaya otsenka sostoyaniya rekreatsionnykh nasazhdenii goroda Ulan-Ude Respubliki Buryatiya* (Comprehensive assessment of the state of recreational plantations in Ulan-Ude of the Republic of Buryatia), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2020, Vol. 38, No. 3–4, pp. 136–145.
- Telesnina V.M., Semenyuk O.V., *Indikatsionnaya rol' travyanogo yarusy v pochvenno-ekologicheskikh issledovaniyakh v usloviyakh ukhoda za ozelenennymi territoriyami g. Moskvy (na primere territorii MGU)* (The indicative role of the grass tier in soil-ecological research in the conditions of caring for the green areas of Moscow (case study of the MSU territory)), *Vestnik MGU. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2022, No. 1, pp. 42–51.
- Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., *Osobennosti napochvennogo pokrova i lesnykh podstilok v iskusstvennykh lipovykh nasazhdeniyakh v zavisimosti ot kharaktera ukhoda* (Features of a ground cover and forest litter of artificial lime plantations depending on the nature of care), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2018, No. 2, pp. 3–11.
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Chestnykh O.V., *Dinamika balansa ugleroda v lesakh federal'nykh okrugov Rossiiskoi Federatsii* (Dynamic pattern of carbon balance in the forests of federal districts of the Russian Federation), *Voprosy lesnoi nauki*, 2018, Vol. 1, No. 1, pp. 1–24.
- Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N., *Opreделение zapasov ugleroda po zavisimym ot vozrasta nasazhdenii konversionno-ob"emnym koeffitsientam* (Determination of carbon stocks by age-dependent conversion-volume coefficients), *Lesovedenie*, 1998, No. 3, pp. 84–93.
- Zonn S.V., Karpachevskii L.O., *Problemy lesnogo pochvovedeniya i sovremennye metody lesorastitel'noi otsenki pochvy* (Issues of forest soil science and modern methods of forest soil assessment), *Pochvovedenie*, 1987, No. 9, pp. 6–15.