

УДК 504.064.2:330.15

ОЦЕНКА ДЕПОНИРОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ЗЕЛЕНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ УРБОЛАНДШАФТОВ г. МОГИЛЁВА И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ОБЪЕМА

И. И. СЧАСТНАЯ¹⁾, В. В. НИКИФОРЕНКО²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾БелНИИП градостроительства, пр. Машерова, 29, 220002, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Одной из важнейших функций системы озеленения городов является способность зеленых насаждений к депонированию углекислого газа (CO_2). Для оценки этого показателя выполнен анализ природной и градостроительной структуры г. Могилёва, составлена карта урболандшафтов, на которой выделено 13 видов урболандшафтов, объединенных в 5 групп. В весенне-летний период 2021–2023 гг. проведены полевые исследования, изучено экологическое состояние зеленых насаждений выделенных комплексов города, собрана необходимая информация об их породном и возрастном составе, бонитете. На основании полученных данных с использованием разнообразных методов (картографического, картометрического, историко-географического, дистанционного) и ГИС-технологий выполнена оценка углерододепонирующей способности зеленых насаждений урболандшафтов и рассчитана ее ценность в денежном эквиваленте в соответствии с ТКП 17.02-10-2013 (02120), адаптированным для городских насаждений. Поэлементная стоимостная оценка отражает стоимость услуги по поглощению углекислого газа в качестве ресурса, заложенного для растений природой. Установлено, что общий объем накопления диоксида углерода зелеными насаждениями г. Могилёва составляет 15 827,2 т в год (в стоимостном выражении 1 382 551,9 евро в год, или в среднем 116,7 евро на 1 га). Распределение этого показателя колеблется от 8688,4 т в год (730 014,0 евро в год) в группе юго-восточных урболандшафтов (максимум) до 426,6 и 1113,1 т в год (36 262,3 и 94 613,0 евро в год) в группах южных и северо-западных урболандшафтов соответственно (минимумы). Для повышения объема депонирования CO_2 зелеными насаждениями в комплексах с небольшим его количеством предложен новый подход к озеленению городских территорий (на примере микрорайона Казимировка в границах группы северо-западных урболандшафтов), основанный на учете углерододепонирующей способности древостоев различного породного и возрастного состава и позволяющий создать оптимальную структуру озелененных территорий. Данный подход поможет повысить уровень накопления CO_2 (в 2 раза) в развивающихся районах города, что в перспективе положительно скажется на состоянии городской среды.

Ключевые слова: городская среда; урболандшафт; озелененные территории; зеленые насаждения; депонирование углекислого газа; стоимостная оценка.

Образец цитирования:

Счастная ИИ, Никифоренко ВВ. Оценка депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урболандшафтов г. Могилёва и пути повышения его объема. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:75–88.

EDN: LKPBDY

For citation:

Shchasnaya II, Nikiforenko VV. Assessment of carbon dioxide sequestration by green spaces of urban landscapes of Mogilev and ways to increase its volume. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:75–88. Russian.
EDN: LKPBDY

Авторы:

Ирина Иосифовна Счастная – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры географической экологии факультета географии и геоинформатики.

Виктория Викторовна Никифоренко – инженер-проектировщик 1-й категории.

Authors:

Iryna I. Shchasnaya, PhD (geography), docent; associate professor at the department of geographical ecology, faculty of geography and geoinformatics.

irina.schastnaya@gmail.com

https://orcid.org/0000-0001-6228-8861

Victoria V. Nikiforenko, project engineer of the 1st category.

nikiforenko.victoria@yandex.ru



ASSESSMENT OF CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION BY GREEN SPACES OF URBAN LANDSCAPES OF MOGILEV AND WAYS TO INCREASE ITS VOLUME

I. I. SHCHASNAYA^a, V. V. NIKIFORENKO^b

^aBelarusian State University, 4 Nizaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bBelNIIP gradostroitelstva, 29 Masherava Avenue, Minsk 220002, Belarus

Corresponding author: V. V. Nikiforenko (nikiforenko.victoria@yandex.ru)

Abstract. One of the most important functions of urban greening systems is the ability of green spaces to sequester carbon dioxide (CO₂). To assess this capability, we analysed the natural and urban structure of Mogilev, producing a map of urban landscapes that identifies 13 types of urban landscapes united into 5 groups. Field studies conducted during the spring and summer of 2021–2023 examined the ecological state of the urban green spaces in the selected complexes, gathering necessary information regarding their species composition, age structure, and quality. Based on the collected data and using various methods (cartographic, cartometric, historical-geographic, remote) and GIS technologies, the carbon sequestration potential of the green spaces of urban landscapes was evaluated and its monetary value was calculated in accordance with the TCP 17.02-10-2013 (02120) adapted for urban plantings. The element-based cost assessment reflects the economic value of the carbon dioxide absorption services that nature provides to the plants. We found that the total carbon dioxide accumulation by the green spaces in Mogilev amounts to 15 827.2 t per year (in value terms 1 382 551.9 euro per year, or an average of 116.7 euro per 1 ha). The distribution of this indicator ranges from 8688.4 t per year (730 014.0 euro per year) in the south-eastern urban landscape group (maximum) to 426.6 and 1113.1 t per year (36 262.3 and 94 613.0 euro per year) in the southern and north-western urban landscape groups, respectively (minimums). To increase the volume of CO₂ deposition by green spaces in complexes with low carbon accumulation, we propose a new approach to urban greening (using the example of the Kazimirovka microdistrict within the boundaries of the north-western urban landscape group). This method considers the carbon sequestration potential of plantings with different species and age compositions, allowing for the creation of an optimal structure for green areas. The proposed approach will help to increase the CO₂ accumulation level (by 2 times) in developing districts of the city, which will positively affect the urban environment in the long term.

Keywords: urban environment; urban landscape; green areas; green spaces; carbon dioxide deposition; cost assessment.

Введение

Современные города постоянно сталкиваются с растущими проблемами в области экологии, здоровья населения и общественного благосостояния. Огромную роль в создании качественной городской среды для жизни людей играют зеленые насаждения как уникальные системы, обладающие способностью депонировать углекислый газ (CO₂). В результате этого создание и сохранение озелененных территорий в городе становится важной задачей. Озеленение не только придает городской среде эстетическую привлекательность, но и играет ключевую роль в смягчении негативных последствий урбанизации, таких как загрязнение воздуха, увеличение температуры и потеря биоразнообразия.

Историческое развитие озеленения в городах отражает эволюцию человеческого отношения к окружающей среде и представляет собой фундаментальную часть истории градостроительства. Озеленение городских территорий, начавшееся с древних цивилизаций, развивалось на протяжении последующих веков. В XX в. вследствие роста численности городского населения и увеличения урбанизации вопрос озеленения стал актуальным для сохранения здоровья и качества жизни горожан. Данное обстоятельство привело к разработке современных концепций устойчивого городского озеленения, включая создание вертикальных садов, зеленых крыш, а также учет экологических аспектов при планировании городской застройки.

Большинство современных крупных городов мира имеют длинную историю, на протяжении которой их развитие происходило под влиянием различных внешних и внутренних факторов, что сформировало уже сложившиеся к настоящему времени структуру и облик городов. Исторические центры с плотной застройкой, жилые кварталы и промышленные зоны характеризуются локальным развитием озеленения, которое в связи с создавшимися условиями на данный момент сложно исправить. Отсутствие земельного ресурса и внешних инвестиций, подземные инженерные сети, сложившаяся застройка (зачастую имеющая статус историко-культурной ценности), внушительное количество твердых покрытий – все это и многое другое затрудняет оптимизацию системы озеленения в некоторых районах города.

В настоящее время развитие городов часто происходит в периферийном направлении путем создания новых микрорайонов на окраинах и формирования в этих местах локальных центров. Постепенное освоение свободной территории в микрорайонах открывает много перспектив для организации в них системы озеленения, которая поможет создать комфортную среду обитания для местных жителей.

Важным аспектом, определяющим эффективность системы озеленения в городе, является способность зеленых насаждений к поглощению и накоплению углекислого газа. В условиях городской среды, где уровень автомобилизации и промышленной деятельности значительно выше, чем в сельской местности, проблема углеродного загрязнения воздуха становится особенно актуальной. Интерес к исследованию способности деревьев накапливать углекислый газ начал возрастать с середины XX в., когда научное сообщество пришло к пониманию роли деревьев в круговороте углерода и климатических изменениях. Этому способствовали активные исследования процесса фотосинтеза. Зеленые насаждения, в частности деревья, кустарники и травы, являются естественными фильтрами, поглощающими углекислый газ и выделяющими кислород в процессе фотосинтеза [1]. Положительное воздействие зеленых насаждений на снижение уровня CO_2 в городской среде подчеркивает важность интеграции такого подхода в систему озеленения городских территорий.

Цель данного исследования заключается в том, чтобы выявить урбокарбонаты, зеленые насаждения которых депонируют недостаточное количество углекислого газа, и предложить путь повышения его уровня на стадии создания микрорайона. В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи: изучить структуру урбокарбонатов города, провести оценку объема депонирования CO_2 зелеными насаждениями общего пользования по группам урбокарбонатов, создать оценочные карты, выявить перспективные микрорайоны с недостаточным уровнем депонирования углекислого газа и предложить пути его повышения на этих территориях.

Обзор литературы

В настоящее время существуют различные методики проведения расчетов объема депонирования углекислого газа. Так, в 2003 г. была принята методика МГЭИК, которая предусматривает расчет по пяти наиболее крупным накопителям углерода: надземной фитомассе, подземной фитомассе, сухостойной и влажной древесине, подстилке и органическому веществу. Суть данной методики заключается в том, что любое существенное уменьшение объема накопления углерода преобразуется в эквивалент выброса CO_2 . Для расчетов используются данные лесного фонда, таблицы хода роста, а также различные конверсионные коэффициенты¹.

Некоторые страны, поддержавшие положения Рамочной конвенции ООН об изменении климата, разработали собственные модели проведения расчетов объема накопления углекислого газа. Так, в Канаде создана модель *CBM-CFS3* [2], учитывающая таксационные данные лесов, собранные на пробных площадях. В США непосредственно для лесов этой страны разработана модель *FORCARB2* [3], которая позволяет выполнять расчеты и прогнозы с 5-летними интервалами и учитывает площади всех категорий лесов, где основным накопителем CO_2 выступают деревья.

Принятые конвенции, существующие модели и методики расчетов в основном затрагивают возможность эффективного накопления углерода лесными массивами. Однако современные подходы, направленные на устойчивое развитие как природных, так и антропогенных комплексов, предполагают их взаимовыгодное сосуществование в качестве единой системы. Следовательно, когда речь идет о городе как о системе, учитывается и доля природной составляющей в нем. Именно поэтому законодательством и нормативно-правовыми актами регулируется площадь природных территорий в городах, а конкретнее площадь зеленых насаждений². Создание новых или модернизация уже существующих методик в перспективе поможет вести учет накопленного углекислого газа в населенных пунктах, где город при этом будет являться отдельной ячейкой, способной в каком-то смысле компенсировать влияние своих выбросов.

Оценку депонирования CO_2 можно проводить с экономической [4–6] и экологической [7] точек зрения. Экономический подход позволяет выразить углерододепонирующую способность зеленых насаждений в денежном эквиваленте, тем самым обозначив ее как материальную ценность. Экологический подход направлен на выявление закономерностей, условий и качественного влияния процесса депонирования CO_2 на окружающую среду.

¹Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства : программа МГЭИК по нац. кадастрам парниковых газов / ред.: Дж. Пенман [и др.]. Женева : Всемир. метеорол. орг., 2003. [649] с.

²Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 18.07.2017 : ввод. в действие с 01.10.2017. Минск : Минприроды, 2023. 186 с.

Понятие «депонирование углекислого газа» тесно связано с термином «экосистемные услуги», получившим развитие в последние десятилетия. В таком контексте депонирование CO_2 считается «бесплатной» выгодой (или услугой), которую получает общество от экосистемы. Взаимосвязям и определениям данных понятий посвящены публикации большого количества зарубежных авторов³ [8–15].

В Беларуси в последнее десятилетие были выполнены научные работы, результатами которых стали оценка уровня депонирования углекислого газа и стоимостная оценка экосистемных услуг зеленых насаждений [16–19]. В большинстве из них объектом исследования является либо территория всей страны, либо отдельные лесные массивы, для которых рассчитывается количество накопленного углекислого газа. Есть авторы, обозначившие в качестве объекта исследования город, а в качестве предмета исследования депонирование CO_2 его зелеными насаждениями. В ряде рассмотренных работ территориальной единицей, выбранной для исследования зеленых насаждений и их оценки, является урбандшафт [20–22].

Материалы и методы исследования

Источниками данных для проведения исследования послужили информация научно-проектного республиканского унитарного предприятия «БелНИИП градостроительства», таксационные данные государственного лесохозяйственного учреждения «Могилёвский лесхоз», коммунального производственного унитарного предприятия «Могилёвзеленстрой», отчеты Витебской лесоустроительной экспедиции, проводившейся для участков городского леса в 2018 г., а также материалы собственных полевых исследований города в весенне-летний период 2021–2023 гг. Также использовались космические снимки «Landsat-8» и данные некоммерческого веб-картографического проекта «OpenStreetMap».

Оценка депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбандшафтов основана в первую очередь на анализе качественных и количественных характеристик зеленых насаждений города, а также на учете природных, исторических, функционально-планировочных особенностей городской среды. В исследовании широко используются картографический, картометрический, историко-географический и дистанционный методы. Применение ГИС-технологий является инновационным инструментом в рамках проведения оценки депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбандшафтов. ГИС-технологии позволяют осуществить пространственную привязку качественных и количественных данных, создать территориальную основу для последующего анализа полученных результатов, а также их визуализации.

Исследование можно разделить на три структурно-логических этапа.

Этап 1: анализ города как пространственно неоднородного природно-антропогенного комплекса. На выбор г. Могилёва в качестве объекта исследования для изучения депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбандшафтов оказали влияние несколько факторов: физико-географическое расположение, исторические особенности развития города и высокий потенциал для оптимизации и совершенствования системы озелененных территорий, так как развитие г. Могилёва в архитектурно-планировочном аспекте продолжается.

Операционной пространственной единицей исследования, которая логично отражает территориальную дифференциацию в распределении зеленых насаждений, а также их стоимостных оценок, выбран урбандшафт. В рамках городского комплекса четко выделяются однородные функциональные зоны и особенности их застройки, влияющие на наличие, состояние и благоустройство зеленых насаждений.

Выделение урбандшафтов осуществляется по принципу соответствия природных и антропогенных компонентов, так как урбандшафт – это сформировавшийся в результате градостроительного преобразования территории городской ландшафт, характеризующийся однородной природной основой и определенным типом градостроительного использования⁴.

Исходя из градостроительной и природной структуры, характерных для г. Могилёва, выделено 13 видов урбандшафтов, объединенных в 5 групп.

Этап 2: анализ зеленых насаждений. В современном мире, где урбанизация продолжает неуклонно возрастать, зеленые насаждения играют важную роль в формировании городской среды.

Каждый город отличается специфической системой распределения зеленых насаждений, которая формировалась параллельно с его историческим и градостроительным развитием. Эта система представляет собой организованное распределение зеленых насаждений внутри города, направленное на создание баланса между городской и природной средой.

Данный этап включает в себя сбор, обработку и анализ исходных данных о зеленых насаждениях общего пользования, их породном составе, возрасте и распространении в рамках города и границах групп урбандшафтов.

³Социально-экономические и правовые основы сохранения биоразнообразия : учеб. пособие / Д. Н. Кавтарадзе [и др.]. М. : Изд-во Науч. и учеб.-метод. центра, 2002. 420 с. (Сохранение биоразнообразия).

⁴Фалолеева М. А. Пространственная структура городских ландшафтов и оценка их экологического потенциала: на примере г. Минска : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.23. Минск, 2004. 19 с.

Суммарная площадь озелененных территорий общего пользования в г. Могилёве составляет около 1750 га. Проведено полевое исследование зеленых насаждений парков, скверов, бульваров, городских лесов, озелененных участков общественных центров и озелененных участков жилой застройки⁵. Всего обследовано 250 площадок, на которых располагается 16 парков, 85 скверов, 15 бульваров, 22 участка городского леса (около 50 кварталов), 20 озелененных участков общественных центров и 54 озелененных участка жилой застройки. Основные площади зеленых насаждений сконцентрированы на периферии города, они представляют собой городской лес. Остальные озелененные территории рассредоточены по всему городу с наибольшей плотностью в центральной части. Исследование породного и возрастного состава древостоев проведено с помощью глазомерной таксации.

Полученные фактические данные занесены в реляционную и картографическую базы данных, после чего созданы тематические векторные слои, включающие атрибутивную информацию о типе озелененной территории (парк, сквер, бульвар и т. д.), ее наименовании (при наличии), преобладающей древесной породе, возрасте деревьев, местоположении и площади насаждений. Структурирование данной информации облегчило анализ депонирования углекислого газа зелеными насаждениями, так как обеспечило возможность визуализации существующего пространственного распространения объектов в рамках всего города и границах выделенных урбокомплексов, что послужило основой для проведения оценки объема депонирования CO_2 .

Этап 3: анализ депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбокомплексов. Данный этап включает количественную и качественную оценку накопления CO_2 зелеными насаждениями каждого комплекса.

Методика оценки аккумуляции диоксида углерода зелеными насаждениями основана на анализе информации о породном составе насаждений, их площади, возрасте, бонитете и запасе⁶. При расчетах использованы сведения о находящихся на балансе лесхоза древостоях (городские леса), дополненные данными полевых исследований зеленых насаждений парков, скверов и бульваров. В результате проведенной глазомерной таксации определены группы возрастов по типу древостоев (хвойные, твердо-листственные, мягколиственные) и уточнены их площади по оцифрованным данным дистанционного зондирования Земли, что позволило выполнить расчеты объема депонирования углекислого газа для всей системы озелененных территорий общего пользования (A_{ij} , т в год) по формуле

$$A_{ij} = \sum_{ij} V_{ij} \cdot K_{o.k} \cdot K_n \cdot I \cdot K_\phi \cdot S_{ij},$$

где V_{ij} – объемный показатель среднего изменения запаса стволовой древесины, т. е. средний ежегодный прирост (определяется как отношение древесного запаса i -й лесообразующей породы j -й возрастной группы (в разрезе I и II групп леса) к фактическому возрасту насаждения по лесоустроительным данным, а в их отсутствие по таблицам хода роста модальных насаждений (по главной породе) для конкретного типа и бонитета), $\text{m}^3/\text{га в год}$; $K_{o.k}$ – объемно-конверсионные коэффициенты для перевода объемного запаса (изменения запаса) стволовой древесины ($\text{m}^3/\text{га}$) в массу отдельных фракций фитомассы (т/га); K_n – переводной коэффициент для перевода объема компонента лесного ресурса в количество поглощенного углерода (принимается равным 0,5); I – коэффициент перевода пулов углерода в количество диоксида углерода (принимается на уровне 3,67); K_ϕ – коэффициент, учитывающий запас углерода в органическом веществе почвы и мортмассе (принимается на уровне 2,04); S_{ij} – площадь оцениваемого участка насаждений i -й породы j -го типа леса, га.

Стоимостная оценка экосистемных услуг проводится в соответствии с углерододепонирующей способностью озелененных экологических систем⁷.

Стоимостная оценка ежегодного поглощения диоксида углерода для озелененной экологической системы ($O_{удл}$, евро) определена по формуле

$$O_{удл} = \mathcal{C}_{\text{CO}_2} \cdot A_{ij},$$

где $\mathcal{C}_{\text{CO}_2}$ – средняя мировая цена квоты на выброс 1 т CO_2 , евро (по данным Системы торговли квотами на выбросы Европейского союза (*European Union Emissions Trading System, EU ETS*) за 2023 г.).

⁵О растительном мире [Электронный ресурс] : Закон Респ. Беларусь, 14 июня 2003 г., № 205-З : с изм. и доп. : текст по состоянию на 1 дек. 2023 г. // Эталон. Законодательство Респ. Беларусь / Нац. центр законодательства и правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2023.

⁶Охрана окружающей среды и природопользование. Порядок проведения стоимостной оценки экосистемных услуг и определения стоимостной ценности биологического разнообразия : ТКП 17.02-10-2013 (02120) : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 15.03.2013 : ввод. в действие с 01.06.2013. Минск : Минприроды, 2013. III, 23 с.

⁷Там же.

Расчет оценки ежегодной углерододепонирующей способности лесов в натуральном выражении (А, т) выполнен по формуле

$$A = \sum V_{ij} \cdot K_{o, k} \cdot K_p \cdot I \cdot K_\phi \cdot S_{ij}.$$

На основе проведенных расчетов составлены карты, которые отражают пространственное распределение городских комплексов с различным объемом депонирования углекислого газа их зелеными насаждениями. Эти карты позволили выявить урболовандшафты с недостаточным уровнем CO₂, найти в их составе перспективный интенсивно развивающийся микрорайон (Казимировка) и предложить вариант оптимизации системы его озеленения, опираясь на углерододепонирующую способность зеленых насаждений.

Результаты и их обсуждение

Город Могилёв, основанный в 1267 г., имеет богатое историческое, культурное и природное наследие, что сказалось на формировании отдельных групп урболовандшафтов. Всего в городе выделено 13 видов урболовандшафтов, объединенных в 5 групп (рис. 1).

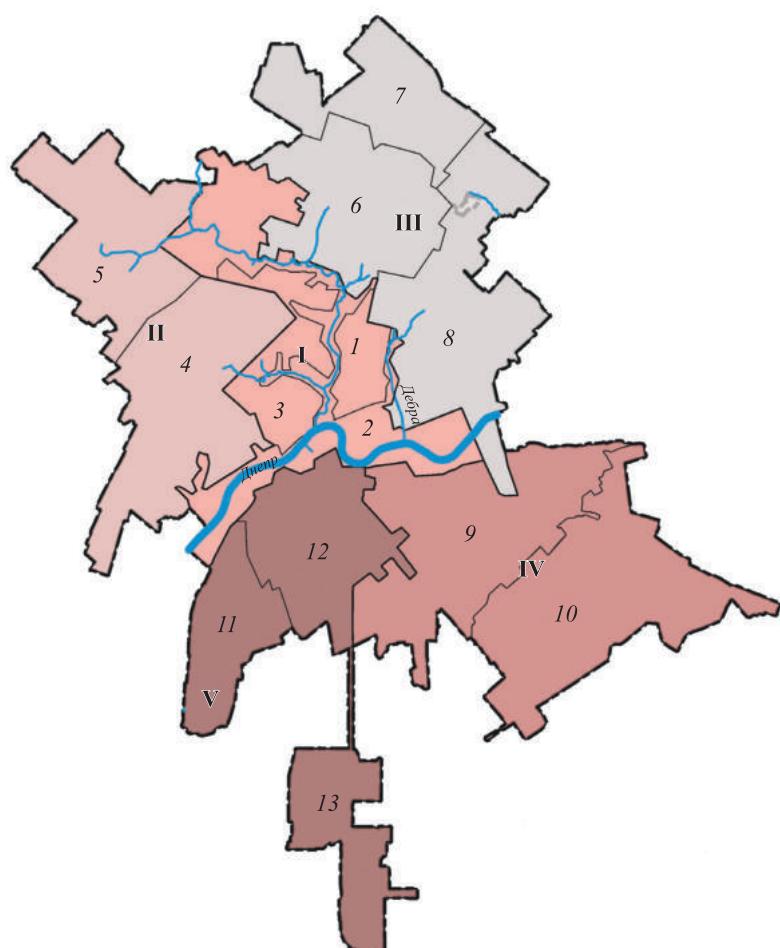


Рис. 1. Группы (I–V) и виды (1–13) урболовандшафтов г. Могилёва:

I – центральные урболовандшафты на моренной равнине, надпойменной террасе и пойме

(1 – урболовандшафты исторического и общественного центра с административной застройкой разной направленности,

2 – урболовандшафты ландшафтно-рекреационных территорий с парками, водоемами, лесопарками, скверами и стихийной растительностью, 3 – урболовандшафты жилой средне- и высокогородской, усадебной и административной застройки);

II – северо-западные урболовандшафты на моренной равнине и пойме

(4 – урболовандшафты жилой усадебной, промышленной и коммунально-складской застройки с санитарно-защитными насаждениями, 5 – урболовандшафты жилой многоквартирной, усадебной и административной застройки);

III – северо-восточные урболовандшафты на моренной равнине

(6 – урболовандшафты жилой мало- и среднегородской, усадебной и административной застройки,

7 – урболовандшафты жилой малоэтажной, промышленной и коммунально-складской застройки с санитарно-защитными насаждениями, парками и лесопарками,

8 – урболовандшафты жилой средне- и высокогородской и промышленной застройки с санитарно-защитными насаждениями);

IV – юго-восточные урболовандшафты на мореной равнине

(9 – урболовандшафты жилой среднеэстажной, усадебной, промышленной и коммунально-складской застройки, 10 – урболовандшафты ландшафтно-рекреационных территорий с лесопарком, водоемами и стихийной растительностью);

V – южные урболовандшафты на мореной равнине

(11 – урболовандшафты жилой усадебной застройки с садами и огородами,

12 – урболовандшафты жилой средне- и высокогородской и административной застройки с парком и водоемом,

13 – урболовандшафты промышленной и коммунально-складской застройки с санитарно-защитными насаждениями)

Fig. 1. Groups (I–V) and types (1–13) of urban landscapes of Mogilev:

I – central urban landscapes on the moraine plain, floodplain terrace and floodplain

(1 – urban landscapes of the historical and public centre with administrative buildings of various profiles,

2 – urban landscapes of the landscape and recreational areas with parks, water bodies, forest parks, squares and spontaneous vegetation, 3 – urban landscapes of the residential mid- and high-rise, estate and administrative buildings);

II – north-western urban landscapes on the moraine plain and floodplain

(4 – urban landscapes of the residential estate, industrial and municipal-warehouse buildings with sanitary protection plantings,

5 – urban landscapes of the residential multiapartment, estate and administrative buildings);

III – north-eastern urban landscapes on the moraine plain

(6 – urban landscapes of the residential low- and mid-rise, estate and administrative buildings,

7 – urban landscapes of the residential low-rise, industrial and municipal-warehouse buildings with sanitary protection plantings, parks and forest parks, 8 – urban landscapes of the residential mid- and high-rise and industrial buildings with sanitary protection plantings);

IV – south-eastern urban landscapes on the moraine plain

(9 – urban landscapes of the residential mid-rise, estate, industrial and municipal-warehouse buildings,

10 – urban landscapes of the landscape and recreational areas with forest park, water bodies and spontaneous vegetation);

V – southern urban landscapes on the moraine plain

(11 – urban landscapes of the residential estate buildings with gardens and vegetable gardens,

12 – urban landscapes of the residential mid- and high-rise and administrative buildings with park and water body,

13 – urban landscapes of the industrial and municipal-warehouse buildings with sanitary protection plantings)

Группа центральных урболовандшафтов, занимающая 16,6 % площади города, включает в себя историческое ядро города с административным центром (вид 1), ландшафтно-рекреационные территории (вид 2), а также участки жилой многоквартирной и усадебной застройки (вид 3). Историческое ядро города составляют площади с сохранившейся застройкой XVI–XIX вв., бывшим замковым валом. Рельеф комплекса представляет собой пологоволнистую равнину, изрезанную ложбинами стока, оврагами и канавами, которая подверглась существенному преобразованию в результате деятельности человека на протяжении долгого времени.

В группу северо-западных урболовандшафтов, занимающую 19,6 % площади города, входят 2 вида (виды 4 и 5). На юге группы преобладает промышленная и коммунально-складская застройка (вид 4). Северная часть комплекса состоит в основном из новой жилой многоквартирной застройки (вид 5), которую Генеральный план г. Могилёва предполагает существенно развивать в будущем. В некоторых местах сохранились очертания естественного рельефа.

Группа северо-восточных урболовандшафтов преобладает в городе, занимая 24,7 % его площади. В данную группу входят 3 вида (виды 6, 7 и 8). На территории комплекса в основном представлена жилая малоэтажная и промышленная застройка. В пределах доминирующего вида (вид 8) располагается ряд крупных промышленных предприятий, образующих один из производственных кластеров города. Рельеф местности более пологий, с сохранившимися естественными чертами.

Группу юго-восточных урболовандшафтов, занимающую 22,9 % площади города, составляют 2 вида (виды 9 и 10). В этом комплексе преобладают ландшафтно-рекреационные территории с большим набором зеленых насаждений (вид 10). В пределах вида 9 находится еще один производственный кластер города, который включает такие предприятия, как ОАО «Могилёвский мясокомбинат», СЗАО «Могилёвский вагоностроительный завод», ЧПУП «Завод горного машиностроения», ОАО «Бабушкина крынка» – управляющая компания холдинга «Могилёвская молочная компания „Бабушкина крынка“».

Группа южных урболовандшафтов занимает наименьшую площадь города – 16,2 % – и состоит из 3 видов (виды 11, 12 и 13). Доля жилой усадебной застройки в группе составляет около 27,2 %. Вид 13 представляет собой территорию с полностью преобладающей промышленной застройкой, находящейся в удалении от основного пространства города.

Общий уровень озелененности г. Могилёва составляет 36,4 %. В городе представлены разнообразные древостои.

В лесопарках и городских лесах абсолютными доминантами являются хвойные породы деревьев. Так, в Печерском лесопарке преобладают спелые и перестойные сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и ель европейская (*Picea abies* (L.) H. Karst.), но встречаются и единичные скопления старовозрастных дубов (*Quercus* L.). В лесном массиве на юго-востоке города породный состав более хаотичный, однако преобладание средневозрастных и спелых хвойных древостоев сохраняется. Из лиственой

растительности можно встретить ольху серую (*Alnus incana* (L.) Moench), осину обыкновенную (*Populus tremula* L.), тополь черный (*Populus nigra* L.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.). Возраст хвойного древостоя колеблется в пределах 60–100 лет, в некоторых кварталах наблюдается практически полное преобладание сосны обыкновенной (*P. sylvestris*), возраст которой составляет от 100 до 110 лет. В городском лесу представлены лиственные древостоя, имеющие возраст в среднем 30–40 лет, но встречаются и отдельные посадки березы повислой (*Betula pendula* Roth), ольхи серой (*A. incana*), дуба (*Quercus* L.), липы (*Tilia* L.) и вяза (*Ulmus* L.), возраст которых может достигать 60–70 лет. В границах лесопарков преобладают высокопродуктивные древостоя (Ia – I классы бонитета), на долю которых приходится 93,8 % лесопокрытых земель в границах города, что свидетельствует о достаточно благоприятных условиях местопроизрастания насаждений. Типологическая структура насаждений не отличается высоким разнообразием. Повсеместно доминирует кисличный тип леса (86,3 % от площади лесных земель).

Наиболее распространенными породами деревьев, которые можно встретить в парках города, являются липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), липа крупнолистная (*T. platyphyllos* Scop.), береза повислая (*B. pendula*), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), клен ясенелистный (*A. negundo* L.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.). Насаждения в основном средневозрастные и молодые, старые экземпляры встречаются единично. В скверах и на бульварах доминируют преимущественно клен остролистный (*A. platanoides*), клен ясенелистный (*A. negundo*), каштан конский (*Aesculus* L.), береза повислая (*B. pendula*), иногда отмечается преобладание тополя черного (*P. nigra*) и ивы козьей (*Salix caprea* L.).

Наибольшие сосредоточение и густота зеленых насаждений выявлены в группе юго-восточных урбокомплексов, где они представлены на 25,3 % площади. Важную роль в структуре озеленения играют обширные участки городских лесов, Любужский лесопарк, сквер на ул. Фатина и сквер на ул. Димитрова (рис. 2).

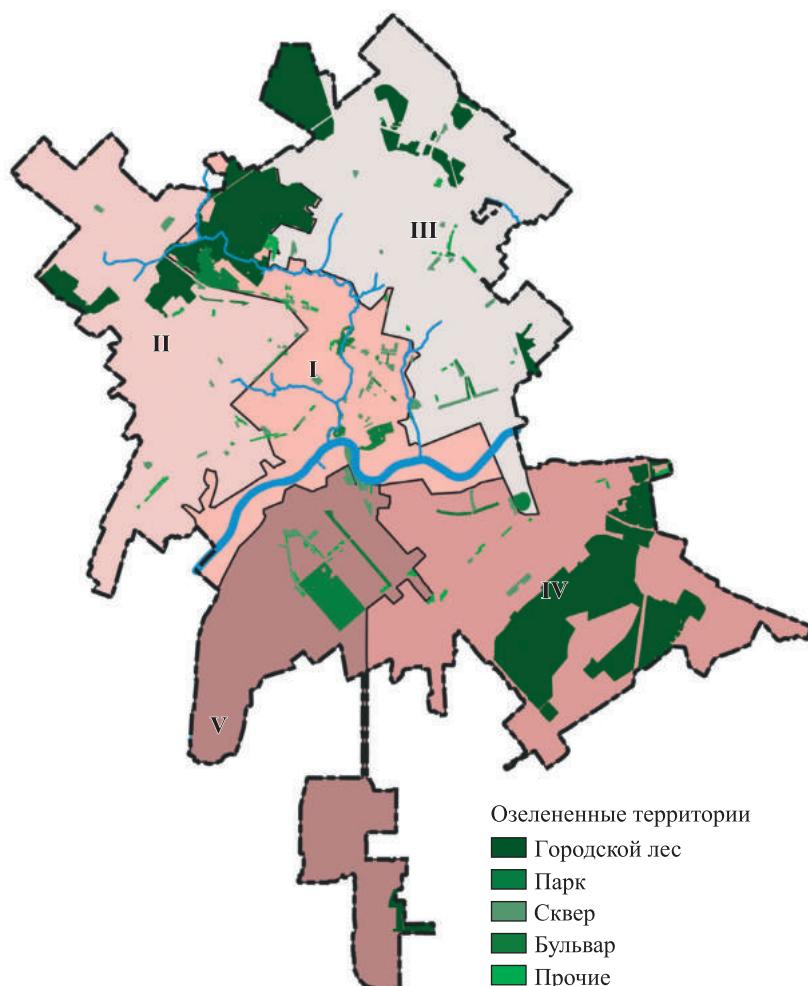


Рис. 2. Распространение зеленых насаждений по группам урбокомплексов г. Могилёва.
Группы урбокомплексов (I–V) см. на рис. 1

Fig. 2. Distribution of green spaces in urban landscape groups of Mogilev.
Urban landscapes groups (I–V) see on fig. 1

Группа центральных урболовандштадтов озеленена на 23,5 %. Особый вклад в систему зеленых насаждений комплекса вносит растительность пойм рек Дубровенка и Днепр. Также на данной территории присутствует застройка с сохранившимися историческими скверами (Муравьевский сквер и др.). Кроме того, в этой части города расположены Печерский лесопарк, много скверов (Пелагеевский и Комсомольский скверы, сквер 740-летия г. Могилёва, сквер 40-летия Победы, сквер Туристов и др.), несколько крупных парков.

Доля зеленых насаждений в группе северо-восточных урболовандштадтов составляет 21 % от общей площади группы. Наибольший вес в процентном составе зеленых насаждений общего пользования имеют городские леса, расположенные на северной периферии комплекса. Распространение промышленной и жилой многоквартирной застройки привело к образованию множества мелких скверов и бульваров.

Группы южных и северо-западных урболовандштадтов озеленены незначительно (на 7 и 6 % соответственно). Характерной особенностью распространения насаждений является чередование густых и разреженных участков. Среди наиболее крупных озелененных территорий можно отметить Казимировский лесопарк в группе северо-западных урболовандштадтов и парк имени 60-летия Великого Октября в группе южных урболовандштадтов. Преобладание старой промышленной застройки, усадебных участков и создание новых микрорайонов не позволили системе озелененных территорий полноценно развиваться в этих частях города.

Вся система зеленых насаждений г. Могилёва депонирует 15 827,2 т в год (в стоимостном выражении 1 382 551,9 евро в год, или в среднем 116,7 евро на 1 га). В результате визуализации полученных значений объема депонирования углекислого газа можно проследить его различие по группам урболовандштадтов города (рис. 3).

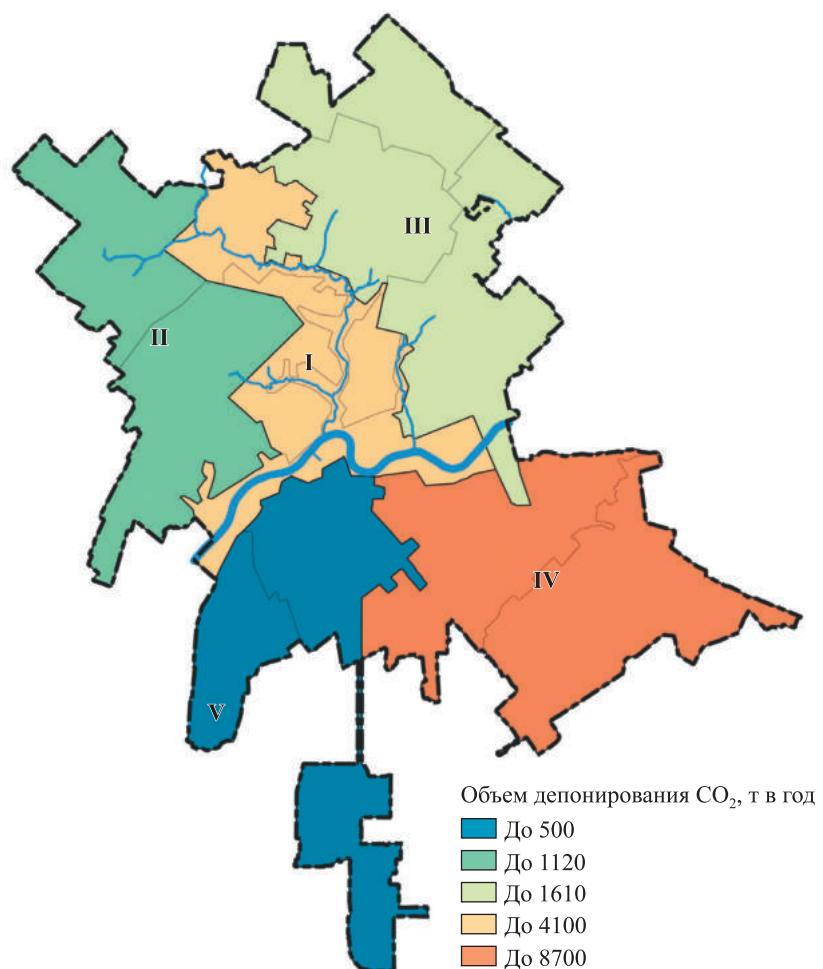


Рис. 3. Депонирование углекислого газа зелеными насаждениями групп урболовандштадтов г. Могилёва.

Группы урболовандштадтов (I–V) см. на рис. 1

Fig. 3. Carbon dioxide deposition by green spaces of the urban landscape groups of Mogilev.
Urban landscapes groups (I–V) see on fig. 1

Весомый вклад в общий объем накопленного углекислого газа вносят группы юго-восточных и центральных урболандшафтов, зеленые насаждения которых депонируют 8688,4 и 4089,4 т СО₂ в год, что составляет около 730 014,0 и 347 599,0 евро в год. Данные комплексы включают в себя большинство участков городского леса, где преобладают средневозрастные и спелые хвойные породы древостоев – сосна обыкновенная (*P. sylvestris*) и ель европейская (*P. abies*). Эти массивы накапливают до 3000 т СО₂. В пересчете на единицу площади (1 га) зеленые насаждения группы юго-восточных урболандшафтов депонируют около 3,2 т на 1 га (272,0 евро на 1 га), зеленые насаждения группы центральных урболандшафтов – 2,1 т на 1 га (178,5 евро на 1 га). Озелененные территории общего пользования в этих группах в среднем накапливают не более 100 т СО₂ в год (до 8500,0 евро в год).

Зеленые насаждения групп северо-западных и северо-восточных урболандшафтов поглощают 1113,1 и 1609,5 т СО₂ в год (94 613,0 и 138 807,5 евро в год) соответственно. На данной территории также основным поглотителем углекислого газа выступают участки городского леса, однако средний объем накопления СО₂ составляет не более 1000 т с участка в год. Объем депонирования углекислого газа на единицу площади городских комплексов для группы северо-западных урболандшафтов равен 0,5 т на 1 га (42,5 евро на 1 га), для группы северо-восточных урболандшафтов – 0,6 т на 1 га (51,0 евро на 1 га).

Наименьшее количество углекислого газа – 426,6 т в год (36 262,3 евро в год) – накапливают зеленые насаждения группы южных урболандшафтов. В этой группе отсутствуют городские леса, преобладает жилая усадебная и промышленная застройка, а породный состав насаждений ограничивается мало-продуктивными древостоями. Объем депонирования СО₂ на единицу площади составляет 0,2 т на 1 га (17,0 евро на 1 га).

Очевидно, что система городского озеленения нуждается в оптимизации в соответствии с существующими подходами, однако для более эффективного результата следует перейти к стадии детального анализа отдельных микрорайонов города. В первую очередь должны быть рассмотрены микрорайоны, где выявлены группы урболандшафтов с наименьшими объемами накопления СО₂, активным градостроительным развитием и перспективами для создания и улучшения существующих зеленых насаждений. Такой территорией является микрорайон Казимировка. Он располагается в западной части города и входит в группу северо-западных урболандшафтов, где озелененность территории составляет 6 %, а объем депонирования углекислого газа не превышает 1113,1 т в год (94 613,0 евро в год). Отличительными особенностями микрорайона являются отсутствие крупных промышленных объектов, загрязняющих атмосферу, и наличие свободных от застройки территорий. В микрорайоне преобладает жилая усадебная застройка площадью около 170 га. Происходит постепенное увеличение жилой много квартирной застройки. Последний Генеральный план г. Могилёва предполагает размещение еще около 180 га многоквартирной застройки. Развитие территории микрорайона, предусмотренное градостроительными документами, позволяет предложить вариант оптимизации системы озеленения, основанный на углерододепонирующей способности древостоев.

Система озеленения микрорайона Казимировка представлена в основном озелененными территориями жилой многоквартирной, жилой усадебной, общественно-деловой и производственной застройки. Общая площадь зеленых насаждений в микрорайоне составляет приблизительно 165 га с учетом квартала леса № 234, находящегося на юге (рис. 4).

Площадь озелененных территорий общего пользования (сквер на пересечении улиц Ровчакова и Краснозвездной) составляет не более 13 га, что не соответствует нормативу озелененности жилых микрорайонов (25 %)⁸. Общий объем депонирования углекислого газа зелеными насаждениями, по укрупненной оценке, составляет около 820 т в год (69 700,0 евро в год). Наибольшая плотность зеленых насаждений отмечена в центральной части микрорайона, так как она застраивалась с 1990-х гг. К настоящему времени древесные насаждения трансформировались в группы небольших древостоев. На территории микрорайона преобладают клен остролистный (*A. platanoides*), клен ясенелистный (*A. negundo*), осина обыкновенная (*P. tremula*), тополь черный (*P. nigra*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.) и плодовые деревья.

Участок древесно-кустарниковой растительности на севере микрорайона по правую сторону от Минского шоссе (в направлении г. Минска) представляет ценность в качестве источника древесной растительности для перспективного озеленения микрорайона. На этой территории преобладают береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), береза повислая (*B. pendula*), осина обыкновенная (*P. tremula*) и ольха серая (*A. incana*). Для проектируемой жилой многоквартирной застройки (согласно Генеральному плану г. Могилёва) в соответствии с нормативом площадь озелененных территорий общего пользования должна

⁸Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 18.07.2017 : ввод. в действие с 01.10.2017. Минск : Минприроды, 2023. 186 с.

составлять около 45 га. Для выполнения данного норматива предлагается создать озелененную территорию с высокой рекреационной нагрузкой площадью приблизительно 12 га вдоль ул. Грюнвальдской до ул. Льва Сапеги, а также озелененную территорию с низкой рекреационной нагрузкой площадью 33 га на базе участка с древесно-кустарниковой растительностью возле д. Новое Пацково (в перспективе войдет в состав городской черты).

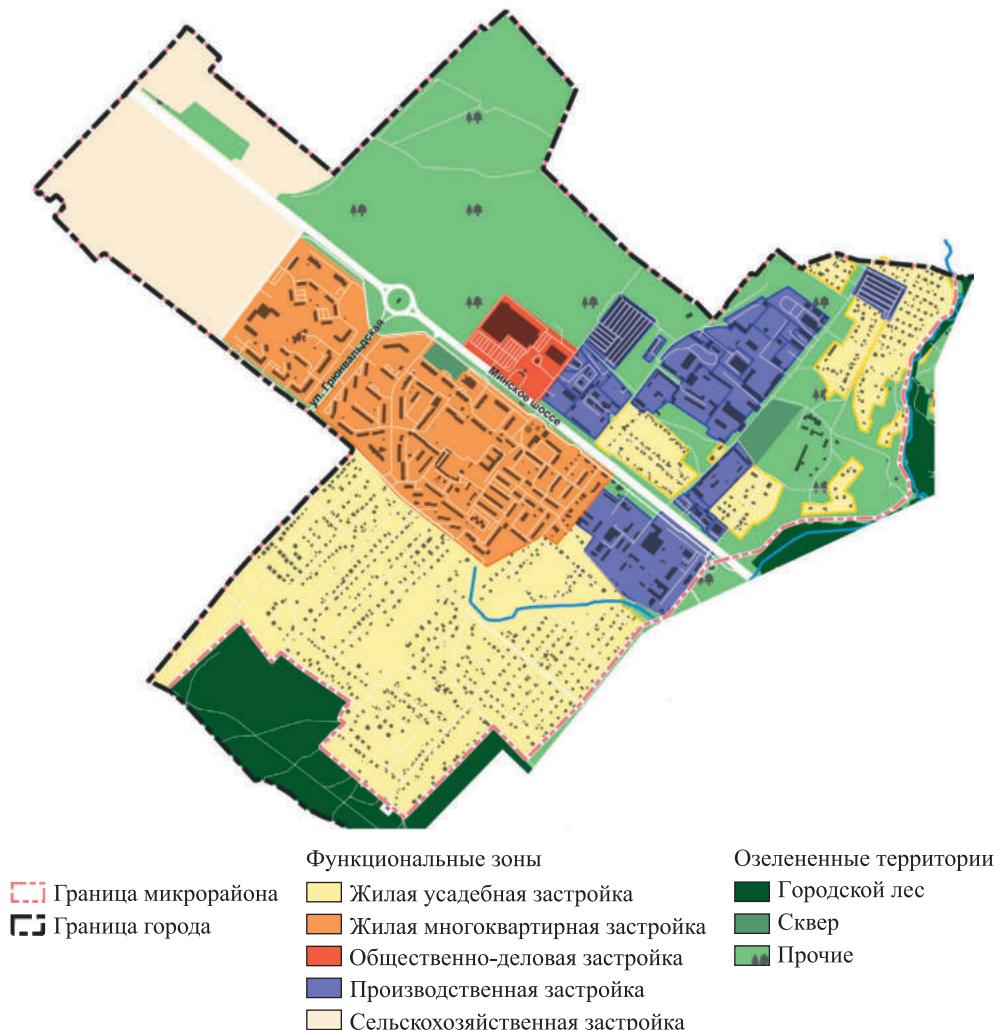


Рис. 4. Схема функционального зонирования микрорайона Казимировка

Fig. 4. Functional zoning scheme of the Kazimirovka microdistrict

Создание благоустроенных объектов озеленения на основе существующего массива древесно-кустарниковой растительности в северной части микрорайона является правильным стратегическим решением с экономической точки зрения, так как оно более выгодно, чем создание зеленых насаждений с нуля. Однако если развитие микрорайона продолжится, то с появлением новой жилой многоквартирной застройки площадью около 180 га для обеспечения нормы озеленения понадобится создать еще 50 га озелененных территорий. В этом случае применение подхода, основанного на учете объема накопления углекислого газа зелеными насаждениями, может быть более результативным. На основании данного предположения можно смоделировать абсолютное количество депонированного углекислого газа выбранными породами деревьев на период 10–55 лет (для лиственных пород) и до 100 лет (для хвойных пород).

Для реализации предложенного подхода выбрано пять пород деревьев: две хвойные – сосна и ель, две мягколиственные – береза и тополь, одна твердолиственная – клен. При развитии идеальной модели будет создано 50 га зеленых насаждений, которые могут располагаться как в границах одной рекреационной зоны, так и на всей территории жилого района. При равном соотношении посаженных площадей выбранных пород (каждой породе будет выделено 10 га (20 %) от необходимых 50 га озелененных территорий) получим объем депонирования CO_2 , приведенный в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Депонирование углекислого газа выбранными хвойными породами

Table 1

Carbon dioxide deposition by selected coniferous species

Порода	Объем депонирования CO ₂ , т в год				Средний объем депонирования CO ₂ , т в год	Общий объем депонирования CO ₂ за 100 лет, т
	Молодняки (до 40 лет)	Средневозрастные древостои (от 41 года до 60 лет)	Приспевающие древостои (от 61 года до 80 лет)	Спелые древостои (от 81 года до 100 лет)		
Сосна	162,4	118,2	122,4	119,0	130,5	13 328,7
Ель	228,4	160,9	155,7	161,5	176,6	13 338,6

Таблица 2

Депонирование углекислого газа выбранными лиственными породами

Table 2

Carbon dioxide deposition by selected deciduous species

Порода	Объем депонирования CO ₂ , т в год				Средний объем депонирования CO ₂ , т в год	Общий объем депонирования CO ₂ за 55 лет, т
	Молодняки (от 11 до 20 лет)*	Средневозрастные древостои (от 21 года до 30 лет)	Приспевающие древостои (от 31 года до 40 лет)	Спелые древостои (от 41 года до 55 лет)		
Береза	106,4	96,1	88,4	88,3	94,8	3853,6
Тополь	217,1	212,3	157,6	178,7	191,4	7784,7
Клен	95,9	94,6	87,6	89,1	91,8	5679,9

*До 20 лет для клена.

Общий объем депонирования CO₂ хвойными породами за 100 лет составит 26 667,3 т (в стоимостном выражении 2 266 729,0 евро), а средний объем накопления CO₂ – 266,7 т в год (22 669,5 евро в год). Для лиственных пород общий объем депонирования CO₂ за 55 лет будет равен 17 318,2 т (в стоимостном выражении 1 472 047,0 евро), средний – 314,9 т в год (26 758,0 евро в год).

Для достижения более эффективного результата при создании системы озелененных территорий наилучшим вариантом будет высадка уже подросших деревьев, поскольку они требуют меньше ухода непосредственно после посадки.

Комбинирование хвойных и лиственных пород при депонировании углекислого газа создает более гибкую кривую общего объема накопления CO₂. В то время как лиственные древостои только в приспевающем и спелом возрасте выходят на примерно одинаковый уровень поглощения CO₂, хвойные древостои компенсируют этот уровень за счет больших объемов поглощения CO₂ в течение всей жизни.

Соотношение площадей под посадку или пересадку предложенных пород может варьироваться в зависимости от изменения площади застройки, норм озеленения, внутриквартального расположения зданий и других факторов.

Исходя из результатов расчетов, мы получаем усредненный объем накопления углекислого газа выбранными для озеленения растениями, который показывает, что в долгосрочной перспективе эти насаждения могут накапливать в себе огромное количество диоксида углерода (около 30 тыс. т), что положительно скажется на окружающей среде и комфортности жизни человека.

Заключение

Представлены результаты оценки депонирования углекислого газа зелеными насаждениями общего пользования урбокомплексов г. Могилёва, а также предложен подход, учитывающий углерододепонирующую способность древостоев при озеленении городских территорий, который позволяет в перспективе повысить объем поглощения CO₂ в городе.

Анализ депонирования углекислого газа зелеными насаждениями общего пользования г. Могилёва показал, что зеленые насаждения групп юго-восточных и центральных урбокомплексов накапливают 8688,4 и 4089,4 т CO₂ в год, зеленые насаждения групп северо-западных и северо-восточных

урболандшафтов – 1113,1 и 1609,5 т СО₂ в год соответственно, зеленые насаждения группы южных урболандшафтов депонируют наименьшее количество углекислого газа – 426,6 т в год. Таким образом, комплексами с наименее благоприятной углерододепонирующей способностью зеленых насаждений являются южные (0,2 т на 1 га) и северо-западные (0,5 т на 1 га) урболандшафты, комплексами с наиболее благоприятной углерододепонирующей способностью зеленых насаждений – центральные (2,1 т на 1 га) и юго-восточные (3,2 т на 1 га) урболандшафты.

Стоимостная оценка накапливаемого углекислого газа варьируется от 36 262,3 евро в год в группе южных урболандшафтов до 730 014,0 евро в год в группе юго-восточных урболандшафтов. Стоимостное выражение депонированного диоксида углерода в пересчете на единицу площади в группах урболандшафтов находится в пределах от 17,0 до 272,0 евро на 1 га.

На основании проведенной оценки установлено, что способность древесных растений поглощать СО₂ зависит от породы, возраста, ежегодного среднего прироста фитомассы и площади произрастания. Анализ депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урболандшафтов также позволил выявить различия в количестве накапленного углекислого газа разными породами деревьев.

Определено, что наиболее эффективными по углерододепонирующей способности древесными породами являются ель и сосна, разновидности тополя и липы. Установлена взаимосвязь факторов, влияющих на объем поглощения углекислого газа деревьями: порода → возраст → максимальный средний прирост (включает запас и бонитет) → объем поглощения СО₂. Отмечена общая тенденция поглощения СО₂ различными возрастными группами лиственных насаждений, которая заключается в наращивании объемов депонирования углекислого газа до достижения деревьями среднего возраста, а затем плавном снижении уровня поглощения СО₂ по мере старения деревьев.

Предложен новый подход к организации системы озелененных территорий в развивающемся микрорайоне Казимировка, расположенному в пределах группы северо-западных урболандшафтов с небольшим уровнем озеленения (6 %) и депонирования углекислого газа (1113,1 т в год, или 94 613,0 евро в год). Для реализации этого подхода и создания системы устойчивого озеленения в микрорайоне отобрано пять пород деревьев: две хвойные – сосна и ель, две мягколиственные – береза и тополь, одна твердолиственная – клен. Далее смоделировано абсолютное количество депонированного углекислого газа выбранными породами деревьев на период 10–55 лет (для лиственных пород) и до 100 лет (для хвойных пород).

При реализации предложенной идеальной модели будет создано 50 га зеленых насаждений. В случае равного соотношения посаженных площадей выбранных пород (каждой породе будет выделено 10 га (20 %) от необходимых 50 га озелененных территорий) возможно получение следующего объема депонирования СО₂: 26 667,3 т (2 266 729,0 евро) за 100 лет при среднем значении 266,7 т в год (22 669,5 евро в год) для хвойных пород и 17 318,2 т (1 472 047,0 евро) за 55 лет при среднем значении 314,9 т в год (26 758,0 евро в год) для лиственных пород.

Комбинирование посадки хвойных и лиственных пород деревьев при создании системы озеленения позволит поддерживать общий уровень депонирования углекислого газа. В то время как лиственные древостои только в приспевающем и спелом возрасте выходят на примерно одинаковый уровень поглощения СО₂, хвойные древостои компенсируют его за счет больших объемов поглощения СО₂ в течение всей жизни.

Распространение предложенного подхода и увеличение площади средне- и высокопродуктивных пород зеленых насаждений общего пользования положительно скажутся на объеме депонирования углекислого газа в г. Могилёве, который может быть повышен в 2 раза.

Проведение оценки депонирования углекислого газа и разработка нового подхода к организации системы озеленения в городах представляют собой эффективную стратегию, основанную на интеграции различных аспектов территориального планирования и управления зелеными насаждениями.

Библиографические ссылки

1. Холл Д, Рао К. *Фотосинтез*. Литвин ФФ, редактор; Ганаго АО, переводчик. Москва: Мир; 1983. 134 с.
2. Boudewyn P, Song X, Magnussen S, Gillis MD. *Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada*. Victoria: Canadian Forest Service; 2007. VI, 115 p. Report No.: BC-X-411.
3. Heath LS, Nichols NC, Smith JE, Mills JR. *FORCARB2: an updated version of U.S. Forest carbon budget model*. Newtown Square: U. S. Forest Service; 2010. 52 p. Report No.: NRS-67.
4. Варапаева ОА, Смаль ЯГ, Мисюченко ВМ. Методика стоимостной оценки экосистемных услуг и биоразнообразия на примере лесных фитоценозов Брестской области. *Труды БГТУ. Серия 5, Экономика и управление*. 2019;1:59–64. EDN: GNMNXL.
5. Логинов АА, Лыков ИН, Васильева МА. Укрупненная оценка стоимости экосистемных услуг леса. *Проблемы региональной экологии*. 2018;3:120–124. EDN: XYXSLR.

6. Nowak DJ, Dwyer JF. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In: Kuser JE, editor. *Urban and community forestry in the Northeast*. 2nd edition. Dordrecht: Springer; 2007. p. 25–46.
7. Багинский ВФ, Лапицкая ОВ. Запас депонированного углерода как организационный элемент экологизированного лесопользования. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2018;2:37–43. EDN: RWGLQF.
8. Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 1997;387(6630):253–260. DOI: 10.1038/387253a0.
9. Costanza R, Daly HE. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*. 1992;6(1):37–46. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x.
10. de Groot RS. Environmental functions as a unifying concept for ecology and economics. *Environmentalist*. 1987;7:105–109. DOI: 10.1007/BF02240292.
11. de Groot RS, Wilson MA, Boumans RMJ. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*. 2002;41(3):393–408. DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7.
12. Lovell ST, Taylor JR. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*. 2013;28(8):1447–1463. DOI: 10.1007/s10980-013-9912-y.
13. Wang Y, Chang Q, Li X. Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspaces by planting design: a case study in parks of Beijing. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2021;64:127291. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127291.
14. Тихонова ТВ. Экосистемные услуги: роль в региональной экономике и подходы к оценке. *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук*. 2016;3:134–143. EDN: WYMXRL.
15. Медведева ОЕ, Соловьева СВ, Медведев ПВ. Методика стоимостной оценки ущерба, причиняемого природным комплексам городов (парков), на основе оценки выполняемых ими экосистемных услуг на примере Москвы. *Вопросы оценки*. 2016;3:12–22. EDN: WTPQJN.
16. Неверов АВ, Варапаева ОА. Стоимостная оценка экосистемных услуг и биологического разнообразия. *Труды БГТУ. Серия 5, Экономика и управление*. 2013;7:95–100. EDN: SQTMQD.
17. Неверов АВ, Бахед ХА. Экосистемные услуги лесов Беларуси: физическое и стоимостное измерение. *Белорусский экономический журнал*. 2022;2:107–121. DOI: 10.46782/1818-4510-2022-2-107-121.
18. Счастная ИИ, Воробьев ДС. Оценка экосистемных услуг городских лесов г. Гродно (Беларусь). В: Лукина НВ, Гончаров АВ, Тихонова ЕВ, Браславская ТЮ, Тебенькова ДН, Алейников АА и др., редакторы. *Научные основы устойчивого управления лесами. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН; 25–29 апреля 2022 г.; Москва, Россия*. Москва: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук; 2022. с. 115–118.
19. Счастная ИИ, Рондак УА. Оценка экологического состояния и экосистемных услуг озелененных территорий общего пользования г. Жодино. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;2:24–34. EDN: FHIGHX.
20. Марцинкевич ГИ, Трофимчук ДА. Экосистемные услуги зеленых насаждений урбокомплексов города Молодечно. В: Федотов ВИ, Куролап СА, редакторы. *Современная экология: образование, наука, практика. Материалы Международной научно-практической конференции; 4–6 октября 2017 г.; Воронеж, Россия. Том 2*. Воронеж: Научная книга; 2017. с. 65–69.
21. Счастная ИИ, Никифоренко ВВ. История формирования и структура урбокомплексов г. Могилёва (Беларусь). В: Даудова СГ, Артамонова ОЕ, составители. *Наука молодых: вызовы и перспективы. Сборник материалов Всероссийской с международным участием научно-практической конференции в рамках мероприятий «Дни науки – 2021»; 12–16 апреля 2021 г.; Великий Новгород, Россия*. Великий Новгород: Новгородский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации; 2021. с. 395–400.
22. Счастная ИИ, Никифоренко ВВ. Зеленые насаждения урбокомплексов Могилёва и оценка их экосистемных услуг. *География*. 2023;4:29–36.

Получена 11.07.2024 / исправлена 06.03.2025 / принята 10.03.2025.
Received 11.07.2024 / revised 06.03.2025 / accepted 10.03.2025.