

Оцінка екосистемних послуг зі зниження рівнів пилового забруднення атмосферного повітря міста вздовж автошляхів

Наталія Корогода , Юлія Яценко 

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, Київ, 01601, Україна

Реферат

Забруднення атмосферного повітря твердими частинками TC_{10} , $TC_{2.5}$ є одним з аспектів, що визначає якість довкілля в містах. Загальною тенденцією сьогодні є збільшення частки пилу від автошляхів серед антропогенних джерел забруднення. Видалення пилу з атмосферного повітря є однією з екосистемних послуг (ЕП), що надають міські зелені зони (МЗЗ). Наразі бракує методів та технологій, за якими було б легко визначити обсяги ЕП як конкретної МЗЗ, так і всієї міської синьо-зеленої інфраструктури (СЗІ). Метою роботи є розробка методики оцінки ЕП по зниженню рівнів пилового забруднення атмосферного повітря міста вздовж автошляхів. При оцінці слід зважати на стан МЗЗ та їх ефективність у очищенні повітря. Провідними факторами, які обумовлюють відмінності в показниках ЕП, є потужність джерела емісії, особливості перерозподілу ТЧ в повітрі, характеристики зеленої зони. Тому, алгоритм оцінки обсягів ЕП полягає у встановленні: параметрів первинного поля забруднення $TC_{2.5}$ та TC_{10} ; ефективності МЗЗ у зниженні забруднення; обсягів ЕП з очищення повітря від пилу. Основним методом дослідження є геоінформаційне моделювання, зокрема процесів розсіювання димішок в атмосфері (на основі LEDI). Вихідними матеріалами є: межі МЗЗ та автошляхів, що були вилучені з бази даних OpenStreetMap; продукт ESA WorldCover 2020 та Copernicus Land Cover, з яких було отримано якісні характеристики МЗЗ; дані аерологічного зондування Вайомінгського університету. В роботі було сформовано базу геоданих (БД). Розрахунковими показниками, що увійшли до БД, є середньорічні значення кількості TC_{10} та $TC_{2.5}$, які надходять від автошляхів, метеорологічні параметри їх перерозподілу та коефіцієнт очищення повітря від пилу ($I_{dust\ cleaning}$). Було визначено: характеристики первинного поля забруднення – $Cont_{pm10}$, $Cont_{pm2.5}$ та ефективність виконання функції по зниженню пилового забруднення МЗЗ – $E_{dust\ cleaning(2.5)}$, $E_{dust\ cleaning(10)}$. Нормування значень ефективності за шкалою бажаності Харрінгтона дозволило обрахувати обсяги ЕП очищення міського повітря від пилу $ES_{dust\ cleaning}$. Таке оцінювання може стати інструментом у прийнятті містопланувальних рішень, адже дозволяє ідентифікувати МЗЗ, що потребують першочергових дій щодо покращення своїх можливостей у очищенні повітря від пилу.

Ключові слова

Міські зелені зони, тверді частки $TC_{2.5}$, TC_{10} , очищення повітря

Надійшла до редакції: 19 липня 2023 / Прийнята: 1 вересня 2023 / Опублікована онлайн: 30 листопада 2023

Assessment of ecosystem services to reduce the level of dust pollution in the urban air along roads

Nataliia Korohoda, Yuliia Yatsenko

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska St, Kyiv, 01601, Ukraine

Abstract

Air pollution by particulate matter PM_{10} , $PM_{2.5}$ is one of the aspects that determines the quality of the environment in cities. The general trend today is an increase in the share of road dust among anthropogenic sources of pollution. Removing dust from the air is one of the ecosystem services (ES) provided by urban green spaces (UGS). Currently, there is a lack of methods and technologies that would make it easy to determine the volume of ES both for a particular UGS and for the entire urban blue-green infrastructure (UGBI). The goal of the study is to develop a methodology for assessing of ES in reducing the levels of dust pollution in the city's atmospheric air along roads. The assessment should take into account the condition of UGS and their effectiveness in air purification. The main factors that determine the differences in ES indicators are the power of the emission source, the specific features of PM redistribution in the air, and the characteristics of the green space. Therefore, the algorithm for assessing the volume of ES is to establish: the parameters of the primary pollution field $PM_{2.5}$ and PM_{10} ; the effectiveness of the UGS in reducing pollution; and the volume of ES for air purification from dust. The main research method is geoinformation modelling, in particular, the processes of atmospheric dispersion of pollutants (based on LEDI). The source materials are: the boundaries of the UGS and roads extracted from the OpenStreetMap database; ESA WorldCover 2020 and Copernicus Land Cover, from which the qualitative characteristics of the UGS were obtained; aerological sounding data (University of Wyoming). A geodatabase was created in the study. The calculated indicators included in the database are the average annual values of PM_{10} and $PM_{2.5}$ coming from roads, meteorological parameters of their redistribution, and the coefficient of air purification from dust ($I_{dust\ cleaning}$). The characteristics of the primary pollution field – $Cont_{pm10}$, $Cont_{pm2.5}$ and the efficiency of the function of reducing dust pollution of the UGS – $E_{dust\ cleaning(2.5)}$, $E_{dust\ cleaning(10)}$ were determined. Normalisation of efficiency values according to the Harrington desirability scale allowed us to calculate the volumes of the ES of cleaning urban air from dust ($ES_{dust\ cleaning}$). This assessment can become a tool for urban planning decisions, as it allows to identify the UGS that require priority actions to improve their dust removal capabilities.

Keywords

Urban green spaces, particulate matter $PM_{2.5}$, PM_{10} , air purification

Received: 19 July 2023 / Accepted: 1 September 2023 / Published online: 30 November 2023

Corresponding author:

Nataliia Korohoda, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska St, Kyiv, 01601, Ukraine
Email: nkorogoda@knu.ua

© 2023 The Authors. Published by Taras Shevchenko National University of Kyiv. This is an open-access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Вступ

За даними ООН прогнозується, що міське населення до 2050 року сягне 68 % (UN, 2019). Забруднення атмосферного повітря, зокрема накопичення в ньому твердих частинок (TЧ_{10} , $\text{TЧ}_{2,5}$), є одним з аспектів, що визначає якість довкілля в місті (Haynes et al., 2020). Загальною тенденцією на сьогодні є збільшення частки пилу від автошляхів серед антропогенних джерел забруднення (Dang et al., 2022; Erkebaev et al., 2021; Dai et al., 2015). Цьому сприяє збільшення автопарку, вузькі дороги, їх погана геометрія, затори тощо (Erkebaev et al., 2021). Дослідження, проведені в 529 містах 51 країни показали, що викиди транспортних засобів спричиняють 25 % концентрацій TЧ_{10} , у той час як промисловість – 18 %; викиди від транспортних засобів $\text{TЧ}_{2,5}$ – 25 %, а спалювання побутового палива – 20 % від загального обсягу у містах (Ferrini et al., 2020).

Загострення респіраторних симптомів, погіршення функції легень та поширеність артеріальної гіпертензії корелює з довготривалим впливом забруднення повітря, пов'язаного з транспортним рухом (HEI, 2010; Dang et al., 2022). За даними ВООЗ, якщо знизити рівні $\text{TЧ}_{2,5}$, передчасної смертності можна було б уникнути у 45-50 випадках на 100 000 осіб (Junior et al., 2022).

Видалення пилу з атмосферного повітря є однією з важливих екосистемних послуг (ЕП), що надають міські зелені зони (МЗЗ), зокрема придорожні рослини можуть ефективно зменшити кількість твердих частинок від дорожнього руху (Zheng et al., 2021). Так, 1 м² листя дерев може поглинати 70 мг ТЧ на рік (Ozdemir, 2019). І, хоча здатність рослин до утримання ТЧ змінюється залежно від сезону: найменше – навесні (6,89 г/м²) (Dai et al., 2015), все одно, за даними (Maher et al., 2013), концентрація ТЧ зменшується на 50 % у будинках, захищених придорожніми рослинами, а у (Jeanjean et al., 2015) зазначається, що використання “зелених стін” у вуличних каньйонах може зменшити концентрацію PM_{10} на 60 %.

На сьогодні існує значна кількість публікацій, присвячених очищенню повітря від пилу рослинами. В основному, це дослідження у яких оцінювалася ефективність фільтрації забруднюючих речовин окремими видами, висадженими у окремих зелених зонах (Dang et al., 2022; Hrotkó et al., 2021; Erkebaev et al., 2021). Також цікавими є роботи з моделювання розподілу ТЧ навколо транспортного засобу (Tong et al., 2011) та при різноманітних метеорологічних умовах (Ketzler et al., 2007).

Приведені вище дані (проблеми пов'язані із запиленістю міського середовища, вплив автотранспорту на рівень запиленості у більшості міст та суттєвий науковий доробок щодо визначення механізмів забезпечення ЕП з очищення міського повітря) визначають актуальність роботи. Проаналізувавши наявні дослідження, нами було виявлено, що більшість з них зосереджено на аналізі впливу на очищення міського повітря в окремих зелених зонах за даними польових вимірювань, але ці дослідження нехтували

закономірностями розподілу та перерозподілу пилу в масштабі всього міста (Wu et al., 2020). Крім того, наразі бракує методів та технологій, які були б простими у використанні (Rossi et al., 2022) та такими, за якими легко визначати обсяги ЕП як конкретної зеленої зони, так і всієї синьо-зеленої інфраструктури (СЗІ) міста. Таким чином, розробка методики оцінки екосистемних послуг по зниженню рівнів пилового забруднення атмосферного повітря міста, що надаються міськими зеленими зонами, зі зниження рівня пилового забруднення атмосферного повітря вздовж автошляхів, що може допомогти у прийнятті містопланувальних рішень задля покращення якості міського довкілля є головною метою даної роботи. Оцінка має базуватись на доступних даних, зокрема відкритих даних дистанційного зондування. Причому слід зосередити увагу саме на стані зелених зон та їх ефективності у виконанні функції по очищенню повітря. Саме це створить об'єктивну картину щодо обсягів надання послуги. Крім того, нами вбачається за доцільне використовувати дану послугу як одну з тих, що визначатимуть загальний потенціал міських зелених зон в інтегральній оцінці екосистемних послуг.

2. Матеріали і методи

При розробці методики та підборі вихідних матеріалів дослідження початково необхідно визначити перелік індикаторів, у відповідності до яких слід оцінювати стан зелених зон щодо виконання ними функції по очищенню повітря. Очищення атмосферного повітря від пилу залежить від кількох факторів: фоновий рівень забруднення території ТЧ (фонові об'ємні концентрації ТЧ у повітрі), що обумовлено характеристиками джерел емісії; перерозподіл ТЧ в повітрі, що визначаються метеорологічними умовами; кількісні та якісні параметри самої зеленої зони, що характеризують ефективність очищення.

Перший з названих аспектів – потужність джерела емісії, залежить від структури та інтенсивності транспортного потоку, типу дорожнього покриття тощо. Інтенсивність транспортного потоку визначає кількість викидів твердих частинок, пов'язаних як з вихлопними газами та зі зношенням гальм, шин, власне доріг тощо.

Другий з названих індикаторів – особливості перерозподілу ТЧ в повітрі. Попередні дослідження показали, що нерівномірний розподіл концентрації ТЧ спричиняється метеорологічними умовами. Швидкість та напрямок вітру, сонячна радіація, кількість опадів, вологість повітря, температурні інверсії тощо, впливають на процеси хімічного перетворення, дифузії та дисперсії ТЧ. Було проведено численні дослідження, які фіксують вплив різних метеорологічних умов на концентрацію PM_{10} у різних європейських регіонах, особливо в містах. Швидкість вітру, опади та висота шару змішування є метеорологічними чинниками, які найбільше впливають на приземні концентрації PM_{10} у містах. PM_{10} концентрується в атмосфері при низькій

швидкості вітру або в ситуаціях штилю. Відсутність опадів і низькі значення висоти шару змішування призводять до порівняно високих рівнів приземних концентрацій PM_{10} , особливо взимку. У 60 % випадків концентрації PM_{10} негативно корелюють із середньою та максимальною швидкістю вітру та кількістю опадів. Сстійка температурна стратифікація сприяє високим концентраціям PM_{10} в атмосфері (Lazurca, 2015). Хмарні дні є найбільш сприятливими для перевищення максимального порогового значення PM_{10} .

Третій аспект – параметри самої зеленої зони. Ефективність видалення пилу з атмосфери залежить від декількох факторів. По-перше – це площа зелених насаджень. Другий фактор, що впливає на процес осадження, є архітектура зеленої зони. Вона спричиняє утворення вихорів і повітряних потоків, що високо корелюють з ефективністю осадження ТЧ на листі дерев. Більші та густіші дерева значно зменшують розсіювання ТЧ, тоді як вплив невеликих і рідких насаджень є обмеженим. Третій фактор – це вид рослин. Кількість іммобілізованих ТЧ залежить від таких ознак виду, як мікроморфологія поверхні (шорсткість) та розмір поверхні листя (Chaudhary & Rathore, 2019). Відмінності в уловлюванні ТЧ між різними видами можуть сягати 10–20 разів (Pugh et al., 2012). Результати досліджень (Chen et al., 2015; He et al., 1992) показали, що рослини з опушеною поверхнею листя, великою шорсткістю, великою щільністю продохів і розкриттям мають кращий пилозатримувальний ефект. Хвоя або голкоподібне листя хвойних дерев часто є більш ефективними в накопиченні ТЧ, ніж листяних, особливо взимку, коли концентрація забруднення є найвищою. Втім й трав'яниста рослинність також знерухомлює значну кількість забруднювачів повітря.

Основним методом дослідження стало геоінформаційне моделювання, зокрема моделювання процесів розсіювання домішок в атмосфері, на основі моделі LEDI (Talerko et al., 2010). Лагранжево-ейлерова дифузійна модель переносу домішки в атмосфері LEDI розроблена для розрахунків перенесення домішки на відстані до 1000 км від газоаерозольного джерела з ефективною висотою викиду від 0 до 1500 м для різних його типів з урахуванням тривалості викиду (залповий, кінцевого часу дії, безперервний). У моделі використовується поєднання лагранжевого та ейлерового методів до опису переносу домішки у граничному шарі атмосфери (ГША). Такий підхід дозволяє фізично коректно врахувати основні фактори, що визначають перенесення домішки. Тривимірне завдання розрахунку поширення домішки в атмосфері розбивається на три стадії: 1) обчислення горизонтальної траєкторії розповсюдження домішки на основі лагранжевого методу; 2) розрахунки вертикального профілю концентрації домішки у вузлах горизонтальної траєкторії, що виконуються за допомогою одновимірного напівемпіричного рівняння турбулентної дифузії; 3) розподіл домішки в поперечному напрямку вважається нормальним з дисперсією координат, що є сумою вкладів горизонтальної турбулентної дифузії і розширення

струменя домішки з урахуванням взаємодії повороту вітру з турбулентністю в ГША. Модель враховує: а) нестационарність (внаслідок добового ходу характеристик ГША чи змін погоди) та просторову неоднорідність метеорологічних характеристик атмосфери; б) різні типи джерела за тривалістю викиду, фазовим складом (газовий, аерозольний); в) горизонтальну неоднорідність підстильної поверхні (рельєф, різний тип шорсткості).

При реалізації моделі LEDI у якості вихідної метеорологічної інформації можуть використовуватися дані вимірювань значень полів швидкості та напрямку вітру, температури повітря в нижньому шарі атмосфери в межах ГША (до 1,5–2 км), а саме результати радіозондування атмосфери. Нами використовувались дані аерологічного зондування Вайомінгського університету (Aerological Sounding Data, 2023).

Вихідними матеріалами стали також: межі МЗЗ та джерел емісії (автошляхів), що були вилучені з бази даних OpenStreetMap (OpenStreetMap, 2022); дані про рослинний покрив, вилучені з продукту ESA WorldCover 2020, який надає глобальну карту земного покриву на 2020 рік з роздільною здатністю 10 м на основі даних Sentinel-1 і Sentinel-2 (Zanaga et al., 2021) та Copernicus Land Cover, колекція 3, епоха 2019 року, що надає щорічний динамічний глобальний продукт Land Cover з просторовою роздільною здатністю 100 м (Buchhorn et al., 2020).

3. Результати

Методика оцінки обсягів ЕП з очищення повітря від пилу базується на визначенні ефективності виконання функції та технологічно полягає у створенні бази геоданих (БД) про формування забруднення повітря пилом від автошляхів та рівнів його зниження наявною СЗІ міста.

Алгоритм оцінки обсягів надання екосистемної послуги полягає у послідовному виконанні наступних завдань.

1. Встановити первинне поле забруднення від автошляхів з різною інтенсивністю транспортного потоку.

2. Визначити ефективність виконання функції по зниженню пилового забруднення від автошляхів, що виконують зелені зони залежно від їх актуального стану.

3. Перевести значення ефективності виконання функції у обсяги екосистемної послуги очищення міського повітря від пилу.

4. Обрахувати обсяги екосистемної послуги.

Тому першочерговим завданням, що було реалізовано, стало формування БД про зелені зони. Відповідно до наведених вище індикаторів у якості атрибутів до БД були введені розрахункові параметри та створено низку тематичних шарів: “Зелені зони”, “Рослинний покрив”, “Джерела емісії”, “Атмосферні характеристики”.

Середньорічні значення кількості $TЧ_{10}$ та $TЧ_{2,5}$ від автошляхів, що оточують зелену зону, стали атрибутами

у відповідності до критерію, що визначає потужність джерела емісії. Так, у тематичному шарі “Джерела емісії” відповідно до швидкісного режиму та кількості автомобілів у потоці було присвоєно всім автошляхам розрахункові значення кількості $TЧ_{2,5}$ та $TЧ_{10}$, що продукує транспортний потік на 100 м автошляху (табл. 1).

Відповідно до індикаторів, що визначають особливості перерозподілу ТЧ в повітрі та впливають на формування первинного поля забруднення, до тематичного шару “Атмосферні характеристики” було додано розрахункові параметри: швидкість та напрямок вітру, температура повітря, атмосферний тиск (на висотах основних баричних поверхонь в межах ГША), кількість та інтенсивність опадів, висота граничного шару атмосфери (Aerological Sounding Data, 2023).

У тематичному шарі “Рослинний покрив” відповідно до якісних характеристик покриву (деревна хвойна, деревна листяна, трав’яний покрив тощо) було додано атрибут $I_{dust\ cleaning}$ (табл. 2). Він є тим розрахунковим параметром, що можна ідентифікувати за даними дистанційного знімання (Zanaga et al., 2021; Buchhorn et al., 2020). $I_{dust\ cleaning}$ дозволяє встановити “обсяг” уловлювання ТЧ кожною зеленою зоною, залежно від її якісних характеристик, тому він є необхідним в оцінці реального рівня очищення повітря від пилу, а отже і обсягу надання відповідної послуги.

На основі оверлейних операцій з шарами “Джерела емісії” та “Атмосферні характеристики”, а також використання моделі атмосферного переносу LEDI, було виконано перше з поставлених завдань – визначено первинне поле забруднення. У моделюванні було враховано обидві групи розрахункових параметрів (потужність джерела емісії та метеорологічні умови території, що впливають на перерозподіл ТЧ у повітрі). Це дозволило в кожній точці встановити концентрації $TЧ_{2,5}$ та $TЧ_{10}$ у повітрі від автошляхів з різною інтенсивністю транспортного потоку – атрибуту “ $Cont_{pm10}$ ”, “ $Cont_{pm2.5}$ ” (мкг/м³), тобто умови, в яких власне зелена зона і виконує свою функцію по очищенню повітря від пилу. На рис. 1 наведено приклад розповсюдження ТЧ в повітрі від 100-метрового відтинку автошляху. Загалом же, для визначення загального рівня запиленості в зеленій зоні всі поля від прилеглих автошляхів сумуються.

Виконання другого завдання – визначення ефективності зелених зон, базується на тому, що характеристики самих зелених зон обумовлюють їх неоднакові можливості щодо зниження рівня запиленості атмосферного повітря. Ефективність у виконанні функції слід розраховувати так, щоб стало можливим відобразити через неї обсяги ЕП, що їх надає зелена зона. Для цього слід зважати на силу антропогенного тиску (початковий рівень запиленості атмосферного повітря) та потенціал зеленої зони у його зниженні. Таке врахування двох аспектів повністю описує сторону пропозиції ЕП. Сторону ж попиту слід враховувати, зважаючи на безпечні рівні запиленості, що не створюють

додаткових ризиків для здоров’я містян. Тобто, значення ефективності має відбивати наскільки безпечним є перебування у зеленій зоні при реалізації її потенціалу та різних рівнів антропогенного навантаження.

Визначення характеристик зеленої зони, що впливають на її потенціал в очищенні від пилу, було проведено на основі оверлейних операцій між шарами “Зелені зони”, “Рослинний покрив”. Для цього:

– *по-перше*, на основі (OpenStreetMap, 2022) було типізовано зелені зони за їхніми просторовими характеристиками та характером посадки (5 типів відповідно до табл. 2: смуга з деревною рослинністю, ліс, парк, луки (стеги), газони).

Таблиця 1. Середньорічні значення кількості $TЧ_{10}$ та $TЧ_{2,5}$ відповідно до категорії доріг, як показник потужності джерела емісії.

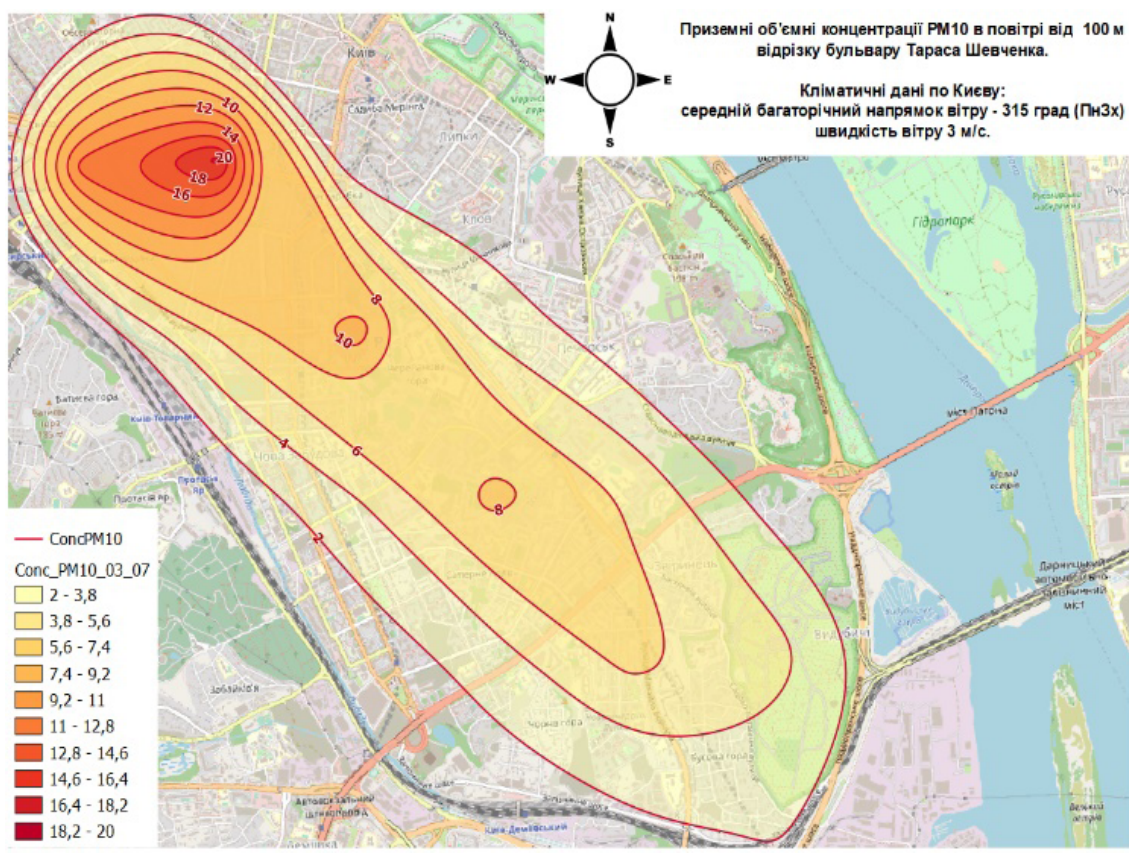
Table 1. Average annual values of PM_{10} and $PM_{2,5}$ by road category as an indicator of emission source power.

Категорії доріг	Кількість авто/год	Швидкість потоку км/год	$TЧ_{10}$ мг/100 м	$TЧ_{2,5}$ мг/100 м
Житлові вулиці (зовнішньоквартальні дороги)	500-1000	39	152	33
Магістральні вулиці та дороги районного та загальноміського значення регульованого руху	1000-2000	45	156	48
Магістральні вулиці та дороги загальноміського та районного значення безперервного руху	Більше 2000	55	158	54

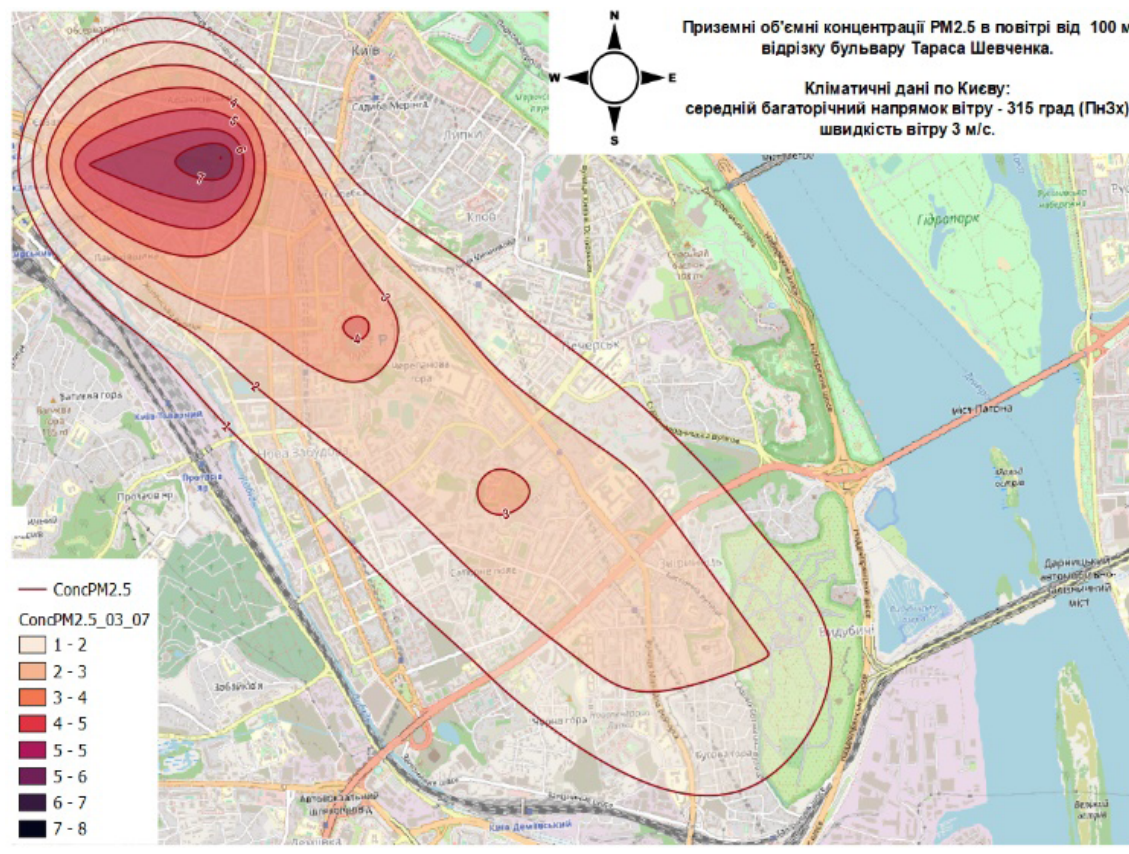
Таблиця 2. Коефіцієнт очищення повітря від пилу ($I_{dust\ cleaning}$), відповідно до типу рослинності.

Table 2. Air dust cleaning coefficient ($I_{dust\ cleaning}$), according to vegetation type.

Тип насаджень	$I_{dust\ cleaning}$
Смуга розріджена деревна рослинність	0,9
Ліс та лісопарк (листяна деревна рослинність)	0,565
Парк (листяна деревна рослинність)	0,7
Ліс та лісопарк (хвойна деревна рослинність)	0,58
Степова чи лучна природна рослинність	0,65
Газон	0,964



а (a)



б (b)

Рис. 1. Приклад реалізації виконання 1-го кроку методики – візуалізація первинного поля забруднення $TЧ_{10}$ (а) та $TЧ_{2.5}$ (б).
Fig. 1. An example of the implementation of step 1 of the methodology – visualisation of the primary contamination field of PM_{10} (a) and $PM_{2.5}$ (b).

– по-друге, передано з шару “Рослинний покрив” атрибут $I_{dust_cleaning}$. Якщо зелена зона має строкату структуру рослинного покриву, то для збільшення об’єктивності оцінки було визначено частку площі, що займає той чи інший тип рослинності та обраховано середньозважений за площами коефіцієнт очищення повітря від пилу в зеленій зоні $I_{dust_cleaning(g_a)}$ (1).

$$I_{dust_cleaning(g_a)} = \sum I_{dust_cleaning(i)} * P_i \quad (1)$$

де $I_{dust_cleaning(g_a)}$ – коефіцієнт очищення повітря від пилу в зеленій зоні, $I_{dust_cleaning(i)}$ – коефіцієнт очищення повітря від пилу i -того типу рослинності, P_i – частка площі i -го типу рослинності у зеленій зоні.

Показник $I_{dust_cleaning(g_a)}$ відображає потенціал зеленої зони до виконання функції зниження запиленості, з огляду на головні параметри – тип рослинності та частку площі, що він займає у зеленій зоні та дозволяє обрахувати “залишковий” рівень запиленості в ній ($Dust_cleaning$). Цей показник слід розраховувати за формулами (2, 3) як добуток початкових рівнів забруднення $Cont_{pm10}$, $Cont_{pm2.5}$ і коефіцієнта очищення повітря від пилу $I_{dust_cleaning(g_a)}$. В такому разі враховуються й початковий рівень забруднення та всі характеристики зеленої зони, що головню впливають на її ефективність у зниженні запиленості.

$$Dust_cleaning_{(2.5)} = Cont_{pm2.5} * I_{dust_cleaning(g_a)} \quad (2)$$

$$Dust_cleaning_{(10)} = Cont_{pm10} * I_{dust_cleaning(g_a)} \quad (3)$$

де, $Dust_cleaning_{(2.5)}$, $Dust_cleaning_{(10)}$ – “залишковий” рівень $TЧ_{2.5}$ та $TЧ_{10}$ в зеленій зоні, $Cont_{pm2.5}$, $Cont_{pm10}$ – первинне поле забруднення в межах зеленої зони $TЧ_{2.5}$ та $TЧ_{10}$, $I_{dust_cleaning(g_a)}$ – коефіцієнт очищення повітря від пилу в зеленій зоні.

Оскільки санітарними нормами в Україні наразі не лімітовані середньодобові значення концентрацій $TЧ_{10}$ та $TЧ_{2.5}$, то ми скористаємось міжнародними гігієнічними

нормами якості повітря, де зазначено, що гранично-допустимі хронічні концентрації складають 20 і 10 мкг/м³ для $TЧ_{10}$ і $TЧ_{2.5}$ відповідно (Horne et al., 2018; Jiang et al., 2016; Annesi-Maesano, 2019).

Розрахунок ефективності ($E_{dust_cleaning}$) визначається як різниця між “залишковим” рівнем запиленості атмосферного повітря в зеленій зоні та санітарними нормами (4, 5).

$$E_{dust_cleaning(2.5)} = Dust_cleaning_{(2.5)} - 10 \quad (4)$$

$$E_{dust_cleaning(10)} = Dust_cleaning_{(10)} - 20 \quad (5)$$

де $E_{dust_cleaning(2.5)}$, $E_{dust_cleaning(10)}$ – ефективність зеленої зони в очищенні повітря від $TЧ_{2.5}$ та $TЧ_{10}$, $Dust_cleaning_{(2.5)}$, $Dust_cleaning_{(10)}$ – “залишковий” рівень $TЧ_{2.5}$ та $TЧ_{10}$ в зеленій зоні.

Зрозуміло, що зелена зона з високим потенціалом та низькими рівнями антропогенного тиску здатна знизити концентрації ТЧ до нижчих за визначені санітарними нормами, тобто показники $E_{dust_cleaning(2.5)}$, $E_{dust_cleaning(10)}$ можуть мати й від’ємне значення, тому на виконання третього завдання слід було перевести значення $E_{dust_cleaning(2.5)}$, $E_{dust_cleaning(10)}$ у обсяги екосистемної послуги з очищення міського повітря від пилу ($ES_{dust_cleaning}$) (рис. 2).

Виконання третього завдання – нормування показників ефективності для оцінки обсягів надання екосистемної послуги, відбувалось на основі функції бажаності Харрінгтона. Доцільність її використання вказувалась у попередніх роботах (Korohoda et al., 2022; Korohoda, 2022). Особливість даної методики у тому, що за 0 правлять найкращі характеристики зеленої зони (максимальні обсяги послуги), а за 1 – найгірші, тобто ми скористалися спадною функцією, у якій при зниженні показника за функцією бажаності Харрінгтона якість об’єкта зростає.

Переведення розрахункових показників відбувається на основі того, що всі невід’ємні вимірні значення діляться на 5 діапазонів (табл. 3). Таким чином, всі зелені

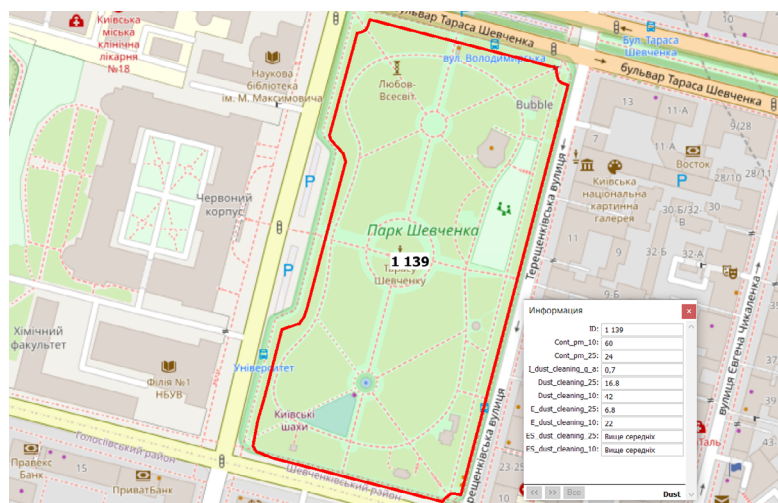


Рис. 2. Інформація з бази даних про зелену зону щодо екосистемних послуг по зниженню рівнів пилового забруднення атмосферного повітря міста від автошляхів.

Fig. 2. Information from the green zone database about ecosystem services to reduce dust pollution in the city’s air from roads.

Таблиця 3. Обсяги екосистемних послуг по зниженню рівнів пилового забруднення атмосферного повітря міста від автошляхів.
Table 3. Volumes of ecosystem services to reduce levels of dust pollution in the city's air from roads.

Діапазон значень відповідно до шкали бажаності Харрінгтона	Обсяги послуги $ES_{dust_cleaning}$
[0-20)	Максимальні
[20-37)	Вище середніх
[37-63)	Середні
[63-80)	Нижче середніх
[80-100]	Мінімальні

зони, зважаючи на їхній стан та рівні антропогенного навантаження, які здатні знижувати початкові рівні запиленості до безпечних або близьких до них показників, надаватимуть послуги в максимальних обсягах (зрозуміло, що всі зелені зони, розрахункові показники ефективності яких мають від'ємні значення, слід віднести до тих, що надають максимальні обсяги ЕП).

Таким чином, на основі показників ефективності виконання функції по зниженню рівнів запиленості (формули 4, 5) та функції бажаності Харрінгтона (табл. 3) стає можливим визначення обсягів надання ЕП з очищення міського повітря від пилу (рис. 2), що і є необхідним у реалізації методики як виконання четвертого завдання.

4. Обговорення

У роботі було визначено, що провідними факторами, які обумовлюють відмінності в показниках ЕП з очищення міського повітря від $ТЧ_{2,5}$ та $ТЧ_{10}$ у зелених зонах, є потужність джерела емісії, що залежить від структури та інтенсивності транспортного потоку; особливості перерозподілу ТЧ в повітрі, що обумовлюється метеорологічними параметрами; характеристики зеленої зони, передусім, її метричні параметри та тип рослинного покриву, що визначають її потенціал в очищенні повітря від ТЧ. Дані показники характеризують, з одного боку, природні та антропогенні умови, в яких функціонують зелені зони, а з іншого – дозволяють визначити ефективність виконання функції по очищенню повітря від ТЧ.

Початковий рівень забруднення розраховується за показниками, які характеризують потужність джерела емісії $Cont_{pm10}$, $Cont_{pm2.5}$. Визначати початковий рівень забруднення слід зважаючи на середньорічні

значення емісії ТЧ відповідно до категорій доріг та з урахуванням атмосферного перерозподілу домішок в межах граничного шару. Розрахунок початкових рівнів забруднення може відбуватись за допомогою моделі LEDI як такої, що використовує у якості вихідної метеорологічної інформації легкодоступні дані та є швидкою в реалізації розрахунків.

Метричні та якісні характеристики зеленої зони обумовлюють її потенціал до зниження рівня запиленості атмосфери $I_{dust_cleaning}$, що дозволяє визначити як “залишковий” рівень $ТЧ_{2,5}$ та $ТЧ_{10}$ в зеленій зоні $Dust_cleaning_{(2,5)}$, $Dust_cleaning_{(10)}$, так і її ефективність у виконанні функції $E_{dust_cleaning}$. Ефективними у виконанні функції ми вважаємо ті зелені зони, які здатні знижувати вміст пилу в повітрі до рівнів, що визначають безпечне середовище для людини.

Показники ефективності на основі функції бажаності Харрінгтона дозволяють обрахувати обсяги надання ЕП з очищення міського повітря від пилу, що надходить від автошляхів ($ES_{dust_cleaning}$). Для цього доцільно використовувати спадну функцію бажаності Харрінгтона, у якій при зниженні показника за функцією якість об'єкта зростає. Таким чином, всі зелені зони, зважаючи на їхній стан та рівні антропогенного навантаження, які здатні знижувати початкові рівні запиленості до безпечних або близьких до них показників, надаватимуть послуги в максимальних обсягах. До таких же слід відносити й ті зелені зони, що за формулами 4, 5 отримали від'ємні значення показника ефективності, тобто знижують запиленість повітря до рівнів, нижчих за санітарні норми.

5. Висновки

Відповідно до загальної мети в роботі було розроблено методику оцінки екосистемних послуг, що надаються міськими зеленими зонами, зі зниження рівня пилового забруднення атмосферного повітря вздовж автошляхів. Методика базується на визначенні ефективності виконання функції по очищенню міського повітря від $ТЧ_{2,5}$ та $ТЧ_{10}$, яка залежить від початкового рівня забруднення та стану зеленої зони.

Відповідно до індикаторів, що визначались в роботі як провідні, було сформовано БД. Тематичними шарами стали шари “Зелені зони”, “Рослинний покрив”, “Джерела емісії”, “Атмосферні характеристики”. Розрахунковими показниками, що увійшли до БД у якості атрибутивної інформації, стали середньорічні значення кількості $ТЧ_{10}$ та $ТЧ_{2,5}$ від автошляхів, швидкість та напрямок вітру, температура повітря, атмосферний тиск (на висотах основних баричних поверхонь в межах ГША), кількість та інтенсивність опадів, висота граничного шару атмосфери та коефіцієнт очищення повітря від пилу ($I_{dust_cleaning}$), який обумовлюють тип рослинності та метричні параметри зеленої зони.

Дані параметри дозволили реалізувати методику оцінювання. За нею на основі оверлейних операцій в процесі ГІС-моделювання було кількісно визначено: характеристики первинного поля забруднення від


автошляхів з різною інтенсивністю транспортного потоку – $Cont_{pm10}$, $Cont_{pm2.5}$ та ефективність виконання функції по зниженню пилового забруднення від автошляхів, що виконують зелені зони $E_{dust_cleaning(2.5)}$, $E_{dust_cleaning(10)}$. Реалізація таких кроків та нормування значень ефективності за шкалою бажаності Харрінгтона дозволили визначити обсяги екосистемної послуги очищення міського повітря від пилу $ES_{dust_cleaning}$.


Таке оцінювання може стати корисним інструментом у прийнятті містопланувальних рішень, оскільки дозволяє ідентифікувати зелені зони, що потребують першочергових дій щодо покращення їхніх можливостей у очищенні повітря міста. Крім того, така методика може стати складовою в процесі оцінки загального обсягу ЕП, що надаються синьо-зеленою інфраструктурою міст. Адже методики з розрахунку окремих ЕП (при переведенні показників в унормовані величини) дозволяють уникнути труднощів в інтегральній оцінці.

6. Подяки

Робота виконувалась в рамках проекту “Технологія геоінформаційного оцінювання надання екосистемних послуг міськими зеленими зонами”, що фінансується за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов’язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій “Горизонт 2020”.

ORCID iD

Nataliia Korohoda  <https://orcid.org/0000-0003-1518-2997>

Yuliia Yatsenko  <https://orcid.org/0000-0003-3879-0848>

Список посилань

- Aerological Sounding Data. *Department of Atmospheric Science. University of Wyoming.* (2023). <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- Annesi-Maesano, I. (2019). Air Pollution and Chronic Obstructive Pulmonary Disease Exacerbations: When Prevention Becomes Feasible. *Am J Respir Crit Care Med.*, 199. (5), 547–563.
- Buchhorn, M., Smets, B., Bertels, L., De Roo, B., Lesiv, M., Tsendbazar, N-E., Herold, M., & Fritz S. (2020). *Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe (V3.0.1)* [Data set]. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.3939050.
- Chaudhary, I.J., Rathore, D. (2019). Dust pollution: Its removal and effect on foliage physiology of urban trees. *Sustain. Cities Soc.*, 51, 101696.
- Chen, X., Zhou, Z., Teng, M., Wang, P., Zhou, L. (2015). Accumulation of three different sizes of particulate matter on plant leaf surfaces: Effect on leaf traits. *Arch. Biol. Sci.*, 67, 1257–1267.
- Dai, Q.L., Bi, X.H., Wu, J.H., Zhang, Y.F., Wang, J., Xu, H., Yao, L., Jiao, L., Feng, Y.C. (2015). Characterization and source identification of heavy metals in ambient PM10 and PM2.5 in an integrated iron and steel industry zone compared with a background site. *Aerosol Air Qual. Res.*, 15, 875–887.
- Dang, N., Zhang, H., Li, H., Salam, M.M.A., Chen, G. (2022). Comprehensive Evaluation of Dust Retention and Metal Accumulation by the Leaves of Roadside Plants in Hangzhou among Seasons. *Forests*, 13(8),1290. doi:10.3390/f13081290
- Erkebaev, T., Attokurov, K., Sattarov, A., Shaimkulova, M., Orozaliev, N., Erkebaev, T., Topchubaeva, E., Kaparova, N., Abdullaeva, Z. (2021). Dust Retention Ability of Plants as a Factor Improving Environment Air. *American Journal of Plant Sciences*, 12, 187-198. doi: 10.4236/ajps.2021.122011.
- Ferrini, F., Fini, A., Mori, J., Gori, A. (2020). Role of Vegetation as a Mitigating Factor in the Urban Context. *Sustainability*, 12(10), 4247. doi:10.3390/su12104247
- Haynes, H.M., Taylor, K.G., Rothwell, J. et al. (2020). Characterisation of road-dust sediment in urban systems: a review of a global challenge. *J. Soils Sediments*, 20, 4194–4217. doi:10.1007/s11368-020-02804-y
- He, L., Liu, Y., Feng, C. (1992). *The dust capturing effects of urban green spaces. In Research on Greening Environmental Effects; Feng, C., Ed.; China Environmental Science Press: Beijing, China.* (In Chinese)
- Health Effects Institute (HEI). (2010). *Traffic-Related Air Pollution: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure and Health Effects; Panel on the Health Effects of Traffic-Related Air Pollution; Special Report 17; Health Effects Institute: Boston, MA, USA.*
- Horne, B.D., Joy, E.A., Hofmann, M.G. et al. (2018). Short-term elevation of fine particulate matter air pollution and acute lower respiratory infection. *Am J Respir Crit Care Med*, 198, 759–66.
- Hrotkó, K., Gyeveki, M., Sütöriné, D.M. et al. (2021). Foliar dust and heavy metal deposit on leaves of urban trees in Budapest (Hungary). *Environ Geochem Health*, 43, 1927–1940. doi:10.1007/s10653-020-00769-y
- Jeanjean, A.P.R., Hinchliffe, G., McMullan, W.A., Monks, P.S., Leigh. R.J. (2015). A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale. *Atmospheric Environment*, 120, 1-14. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.08.003.
- Jiang, X-Q., Mei, X-D., Feng, D. (2016). Air pollution and chronic airway diseases: what should people know and do? *J Thorac Dis.*, 8., 31–40.
- Junior, D.P.M., Bueno, C., da Silva, C.M. (2022). The Effect of Urban Green Spaces on Reduction of Particulate Matter Concentration. *Bull Environ Contam Toxicol.*, 108(6), 1104-1110. doi: 10.1007/s00128-022-03460-3.
- Ketzel, M., Omstedt, G., Johansson, C., Düring, I., Pohjola, M., Oettl, D., Gidhagen, L., Wählin, P., Lohmeyer, A., Haakana, M., Berkowicz, R. (2007). Estimation and validation of PM2.5/PM10 exhaust and non-exhaust emission factors for practical street pollution modelling. *Atmospheric Environment*, 41 (40), 9370-9385. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.09.005.
- Korohoda, N., Halahan, O., & Kovtoniuk, O. (2022, November). The use of GIS and Remote Sensing Data in Determining the Condition of Green Areas in Kyiv. *In 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). EAGE Publications BV. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580056>
- Korohoda, N. (2022). Otsinka ryzykiv vtraty ekosystemnoyi posluhy z rehulyuvannya eroziyi mis'kymy zelenymy zonamy [The risks assessment of loss of erosion control ecosystem services in urban green areas]. *Physical Geography and Geomorphology*, 45 (111-116), 49-57. [Корогода, Н. (2022). Оцінка ризиків втрати екосистемної послуги з регулювання ерозії міськими зеленими зонами. *Фізична географія та геоморфологія*, 45 (111-116), 49-57.] (in Ukrainian). doi:10.17721/phgg.2022.1-6.06

- Lazurca, L. G. (2015). The influence of meteorological conditions on PM10 concentrations in Suceava City (North – Eastern Romania). *Scientific Annals of Stefan cel Mare University of Suceava Geography Series*, 25(1). doi:10.4316/GEOREVIEW.2015.25.1.278
- Maher, B.A., Ahmed, I.A.M., Davison, B., Karloukovski, V., Clarke, R. (2013). Impact of roadside tree lines on indoor concentrations of traffic-derived particulate matter. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 13737–13744.
- OpenStreetMap contributors*, www.openstreetmap.org, 2022
- Ozdemir, H. (2019). Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution. *Science of the Total Environment*, 659, 1176–118.
- Pugh, T.A.M., MacKenzie, A.R., Whyatt, J.D., Hewitt, C.N. (2012). Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 7692–7699.
- Rossi, L., Menconi, M.E., Grohmann, D., Brunori, A., Nowak, D.J. (2022). Urban Planning Insights from Tree Inventories and Their Regulating Ecosystem Services Assessment. *Sustainability*, 14(3), 1684. doi:10.3390/su14031684
- Talerko, M.M., Garger, E.K., Klyuchnikov, O.O. (2010). Forecasting the consequences of emergency releases from nuclear power plants using the LEDI mesoscale model of atmospheric transport. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 74-79. (in Ukrainian)
- Tong, X., Luke, E. A., Smith, R. E. (2011). Sensitivity Studies on Particle Emissions and Transport Around a Moving Vehicle. *Conference paper*, ADA547471.
- UN. (2019). *World urbanization prospects the 2018 revision*. UN, New York.
- Wu, D., Gong, J., Liang, J., Sun, J., Zhang, G. (2020). Analyzing the Influence of Urban Street Greening and Street Buildings on Summertime Air Pollution Based on Street View Image Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 500. doi:10.3390/ijgi9090500
- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, Linlin, Tsendbazar, N.E., Ramoino, F., Arino, O. (2021). *ESA WorldCover 10 m 2020 v100*. doi:10.5281/zenodo.5571936
- Zheng, T., Zhang, S., Li, X.B., Wu, Y., Peng, Z.R. (2021). Impacts of vegetation on particle concentrations in roadside environments. *Environ. Pollut.*, 282, 117067.