

ПРИКЛАДНІ ЛАНДШАФТОЗНАВЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 91.001.5; 91.001.57

DOI: 10.31652/2786-5665-2023-4-54-67

Корогода Н. П.

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної географії та геоєкології.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна.
nkorogoda@knu.ua
<https://orcid.org/0000-0003-1518-2997>

Ковтонюк О. В.

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри землезнавства та геоморфології.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна.
kovtoniukOl@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2539-984X>

Галаган О. О.

кандидат географічних наук, завідувач навчальної лабораторії екології ландшафту.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна.
geolab@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-1449-3638>

Купач Т. Г.

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри географії України.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна.
tkupach@knu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-8710-7107>

ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ З КОНТРОЛЮ ШВИДКОСТІ ЕРОЗІЇ ҐРУНТУ У ЛАНДШАФТАХ МІСЬКИХ ЗЕЛЕНИХ ЗОН

Анотація. Міські зелені зони (МЗЗ) в процесі свого функціонування надають екосистемні послуги (ЕП) з контролю швидкості ерозії в урбанізованих просторах, впливаючи на якість життєвого простору. Проте наразі в наукових та прикладних розробках не окреслено зрозумілої та доступної схеми проведення оцінки таких ЕП. Відповідно до розробленої методики, спираючись на провідні фактори протікання ерозійних та дефляційних процесів у роботі було сформовано базу геоданих щодо передумов їх протікання, обсягів ЕП та ризиків їх недоотримання.

Середовище QGIS/SAGA (версія QGIS 3.32.1-Lima) було обрано як найбільш ефективний інструментарій просторового аналізу. Файлову базу даних у форматі GeoPackage, відповідно до стандартів Open Geospatial Consortium, сформував набір тематичних векторних та растрових наборів геоданих: «LS», «Vegetation», «Soils_erosion» та «BGI_erosion». Методика оцінки ризику дефляції та емпірична модель AVAG, використані в роботі як такі, що враховують провідні фактори протікання ерозійних процесів та легко адаптуються до методів ГІС-моделювання. Параметри, що характеризують вплив рельєфу, рослинності та протиерозійних заходів на втрати ґрунту; ґрунтові коефіцієнти потенційної ерозії; ерозійний індекс опадів та швидкості вітру; параметр, що характеризує захисну дію вітрових перешкод склали набір розрахункових показників, що увійшли до БД у якості атрибутів. Все це дозволило реалізувати методику оцінювання ЕП. На основі операцій просторового аналізу, було кількісно визначено: ефективність кожної МЗЗ у виконанні протиерозійної функції, обсяги ЕП, ризику її недоотримання.

Ключові слова: екосистемні послуги, міські зелені зони, оцінка, ерозія, дефляція.

Korohoda N., Kovtoniuk O., Halahan O., Kupach T. GEOINFORMATION ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES FOR CONTROLLING THE RATE OF SOIL EROSION IN LANDSCAPES OF URBAN GREEN ZONES

Abstract. The benefits derived from counteracting soil destruction are called ecosystem services (ES) control of erosion rates. Urban green spaces (UGS) provide these services in urbanized areas, affecting the quality of living space. However, at present, scientific and applied developments do not outline a clear and accessible scheme for assessing such ES. The purpose of this paper is to highlight the technological features of geoinformation assessment of the volume of ES control of erosion rates.

In accordance with the main factors that determine the differences in the speed of erosion and deflation processes, a geodatabase was formed on the conditions for their occurrence, the volume of ES and the risks of their loss. The QGIS/SAGA environment (QGIS version 3.32.1-Lima) was chosen as the most effective tool for spatial analysis. The file database in the GeoPackage format in accordance with the standards of the Open Geospatial Consortium was formed by a set of thematic vector and raster geodata sets: “LS”, “Vegetation”, “Soils_erosion” and “BGI_erosion”.

The deflation risk assessment methodology and the ABAG empirical model were selected as they take into account the main factors of erosion and deflation processes and are easily adaptable to GIS modelling techniques.

Parameters characterizing the impact of relief, vegetation and erosion control measures on soil loss; soil potential erosion coefficients; erosion index of precipitation and wind speed; and a parameter characterizing the protective effect of windbreaks formed a set of calculated parameters that were included in the database as attributes.

The selected models, calculation parameters, and QGIS/SAGA tools allowed us to implement the ES assessment methodology. Based on the spatial analysis operations, the effectiveness of each UGS in performing the erosion control function, the volume of ES, and the risks of its loss. This creates conditions in which the assessment of ES will become accessible to urban planners, who are often limited in information and ways of processing it.

Keywords: ecosystem services, urban green spaces, assessment, erosion, deflation.

Постановка проблеми. Вигоди, що отримуються внаслідок протидії руйнуванню ґрунту в результаті екзогенних процесів називаються екосистемними послугами (ЕП) з контролю швидкості ерозії (ES control of erosion rates (CER) (*Haines-Young & Potschin, 2018*). Дані ЕП відносяться до категорії регульованих. Відповідно до (*Соловій, 2016*) вони не є продуктом споживання чи предметом використання і отримуються населенням опосередковано через забезпечення якості життя та формування потоків забезпечувальних, інших регульованих та культурних ЕП.

Рослинний покрив є важливим фактором, що визначає швидкість протікання ерозійних процесів, тому саме міські зелені зони (МЗЗ) в процесі свого функціонування є чи не єдиними надавачами даних послуг в урбанізованих просторах. Саме в межах МЗЗ, що являють собою ділянки вкриті природною чи близькою до такої рослинністю, відбувається природний процес захисту ґрунтів від розмивання (ерозії), розвіювання (дефляції), висихання тощо (*Василюк, Львівська, 2020*). За (*Екосистемні послуги..., 2019*) густіший та більш різноманітний рослинний покрив затримує атмосферні опади, крім того з поверхні, що вкрита рослинністю, менш інтенсивно випаровується волога. Це призводить до уповільнення процесу висушування ґрунту, внаслідок чого він і повільніше втрачає зв'язність, і важче піддається ерозії та дефляції (*Корогода та ін., 2023*). Зазначені процеси призводять як до деградації власне ґрунтового покриву, так і до розвитку цілої низки інших явищ та процесів, що негативно впливають на якість життєвого простору людини: забруднення водойм, у яких акумулюється винесений матеріал, розвитку ерозій-

них форм рельєфу, запилення повітря тощо.

Крім нематеріальних вигод, що отримують містяни внаслідок регулювання ерозійних процесів в МЗЗ, є також і економічні. Так, відповідно до (*Василюк та Львівська, 2020*) ними в умовах міста є відсутність витрат для поліпшення якості ґрунту в зелених зонах та витрат на поліпшення якості поверхневих вод та ін. Отже, ЕП з регулювання швидкості ерозії знаходяться серед провідних екосистемних послуг, що надають МЗЗ. Тому їх оцінювання є однією з найважливіших задач, що нині стоять задля забезпечення сталого розвитку міст. Оскільки саме оцінювання а також впровадження ефективних кроків щодо збільшення обсягів даної ЕП дозволить створити комфортні умови проживання в урбанізованому просторі.

Аналіз джерел та останніх досліджень. Роботи, що присвячено ЕП з контролю швидкості ерозії ґрунту є досить актуальним, про що свідчать результати дослідження (*Evans et al., 2022*). Так, кількість опублікованих робіт присвячених даним ЕП посідає восьме місце з 19 аналізованих ЕП та четверте місце серед робіт присвячених регульованим ЕП. Прикладами є публікації як вітчизняних (*Висоцька та ін., 2021, Соловій, 2016*), так і зарубіжних дослідників (*Gwapedza et al., 2021, Istanbuly et al., 2021, Steinhoff-Knopp et al., 2021*). Серед останніх варто згадати низку публікацій по території Лесового плато (Китай) (*Fu et al., 2011, Jiang et al., 2016, Tian et al., 2023*). Зокрема, в останній роботі, для оцінки ЕП контролю ерозії ґрунту були використані матеріали дистанційного зондування Землі та такі моделі як універсальне рівняння втрат ґрунту (USLE), переглянуте рівняння вітрової ерозії (RWEQ)

тощо. В результаті це дозволило визначити, що основними зонами втрати ґрунту є схили крутизою 8° – 35° , на яких зафіксовано 82% загальної втрати ґрунту для 45,5% досліджуваного регіону.

Цікавим є дослідження (Steinhoff-Knopp et al., 2021), у якому представлено сценарний підхід оцінки ЕП контролю ерозії ґрунту та її вплив на інші ЕП. Підхід до оцінки було випробувано на агроландшафтах Північної Німеччини. У роботі була змодельована деградація ґрунтів внаслідок ерозії у шести сценаріях за допомогою німецької стандартної версії USLE, а також було оцінено довгостроковий ефект від ЕП контролю ерозії ґрунту.

На подібних моделях ґрунтується оцінка даної ЕП і за допомогою ESTIMAP. Зокрема модуль контролю ерозії ґрунту заснований на переглянутому універсальному рівнянні втрати ґрунту, що по суті порівнює змодельовану ерозію ґрунту з наявністю рослинності та без неї. Різниця між результатами, яка називається утриманням ґрунту, розглядається як відповідний показник для кількісної оцінки контролю ерозії ґрунту (European Commission, 2020).

В рамках даної статті слід також згадати роботи, присвячені питанням дослідження дефляційних процесів. Так, у (Liu et al., 2022) для оцінки регіональної потенційної дефляції у північному Китаї було використано низку моделей як-то: національну модель вітрової ерозії Китаю (NWESMC), переглянуте рівняння вітрової ерозії (RWEQ), систему прогнозування вітрової ерозії (WEPS) та інтегровану систему моделювання вітрової ерозії (IWEMS).

Оскільки, як зазначено вище, рослинний покрив є контролюючим фактором у протіканні ерозійних процесів, визначенню його ролі та сили впливу також присвячено суттєву кількість як експериментальних так і модельних досліджень. Зокрема, у (Gwapedza et al., 2021) досліджуються вплив зміни рослинного покриву на ерозію в різних часових масштабах у Східній Капській провінції (Південна Африка). У даній роботі на основі супутникових знімків Landsat 8 було отримано значення індексу (NDVI) та застосовано його для параметризації рослинності за модифікованим універсальним рівнянням втрати ґрунту (MUSLE).

Проведений аналіз публікацій виявив достатньо потужну модельну та геоінформаційну базу

у дослідженні ЕП з контролю швидкості ерозії ґрунту. Проте, більша частина робіт, стосується природних чи природно-антропогенних лісових або сільськогосподарських систем. В той час як питання специфіки оцінювання даної ЕП в межах міста наразі не висвітлено в наукових та прикладних розробках. Разом із тим не окреслено зрозумілої та доступної для містопланувальників технологічної схеми проведення оцінки.

Мета статті. Ефективність міських зелених зон у забезпеченні ЕП з контролю швидкості ерозії, а також очевидна недостатність методів та технологій, які були б простими у використанні та ефективними в умовах міста, стали причинами того, що нами у попередніх роботах (Корогода, 2022, Корогода та ін., 2023) було запропоновано методика такої оцінки. Методика оцінки ЕП полягає у покроковій реалізації наступного алгоритму: 1. змоделювати природні та антропогенні передумови виникнення розвитку ерозійних та дефляційних процесів у МЗЗ; 2. визначити ефективність виконання ґрунтозахисної функції зеленою зоною шляхом оцінювання втрати ґрунту через ерозійні та дефляційні процеси; 3. визначити обсяги ЕП з контролю швидкості ерозії, шляхом категорювання значень ефективності на основі функції бажаності Харрінгтона (Harrington, 1965); 4. на основі тієї ж функції, визначити ризики втрати (недоотримання) ЕП сьогодні та в майбутньому (Корогода, 2022). Технологічно реалізація методики полягає у створенні бази геоданих (БД) про територію дослідження. Також однією з умов реалізації методики є те, що в оцінці слід спиратися на доступні дані, зокрема відкриті дані дистанційного зондування. Відповідно, метою даної роботи є висвітлення технологічних особливостей геоінформаційного оцінювання обсягів екосистемних послуг з контролю швидкості ерозії ґрунту та ризиків їх втрати. Дане оцінювання має спиратися на доступні інструменти та зрозумілі алгоритми, задля створення технологічної бази застосування методики у прийнятті ефективних містопланувальних рішень.

Задля досягнення поставленої мети, слід по-перше обрати моделі, що легко адаптуються до методів геоінформаційного моделювання та ефективність яких є доведеною; по-друге – відповідно до обраних моделей визначитись з набором розрахункових параметрів оцінки, оскільки

ки саме вони формуватимуть «вхідні» атрибути бази даних; по-третє – відповідно до методики обрати найбільш ефективний інструментарій, алгоритми і процедури розрахунків. Вирішення цих завдань, на нашу думку, і дозволить досягти мети дослідження.

Виклад основного матеріалу. На виконання першого завдання, було проаналізовано низку емпіричних моделей, що успішно використовуються для обрахунків швидкості ерозійних процесів, адже, як йшлося у (Корогода та ін., 2023) ефективність виконання протиерозійної функції, а отже й обсяги надання відповідної ЕП може бути оцінена, наприклад, через обрахунок втрати ґрунту з території зеленої зони з поверхневим стоком та внаслідок дефляційних процесів.

Так, обрахунок втрати ґрунту в результаті видування вітровими потоками виконується на основі моделі RWEQ (Revised Wind Erosion Equation) (Fryrcar et al., 2001), або методики оцінки ризику ерозії ґрунту вітром (дефляції) (Erosionsgefährdung von Böden durch Wind) (Methodendokumentation «Bodenkunde», 2000). Модель RWEQ ґрунтується на таких параметрах як індекс еродованості ґрунту, коефіцієнт шорсткості поверхні, кліматичний фактор, коефіцієнт рослинного покриву тощо. В методиці запропонованій вихідними даними для розрахунку є тип ґрунту та вміст гумусу у ньому, середньорічна швидкість вітру та ін (Methodendokumentation «Bodenkunde», 2000). Дана модель і була обрана нами, як така, що ґрунтується на використанні доступних та достовірних показників.

Втрати ґрунту з поверхневим стоком як правило розраховують за моделями на основі USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier & Smith, 1978), RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), MUSLE (Modification Universal Soil Loss Equation). Ці моделі базуються на поділі території на окремі елементи регулярної мережі та призначенні кожному з них набору атрибутів, таких як значення крутизни, довжини схилу, ерозійної інтенсивності опадів, коефіцієнту еродоємості ґрунту та інших. В емпіричній моделі ABAG (Allgemeine Bodenabtragsgleichung), що являє собою варіант USLE, визначено фактори, які відображають умови протікання процесу поверхневого змиву ґрунту. Врахування у ABAG цих факторів а також її успішне застосування у подібних роботах з геоінформаційного моделю-

вання (Галаган, 2016) зумовило вибір цієї моделі для даного дослідження.

Відповідно до другого завдання роботи та обраних моделей необхідним було створення набору розрахункових параметрів для проведення оцінки. Методика оцінки ЕП, викладена у (Корогода та ін., 2023) базується на визначенні того, наскільки ефективною є та чи інша зелена зона і полягає у формуванні БД про природні та антропогенні фактори протікання та рівні зниження ерозійних процесів наявною СЗІ міста. Атрибутами БД є параметри, розраховані у відповідності до індикаторів, що характеризують такі фактори.

Згідно з методикою швидкість втрати ґрунту, а отже й обсяги ЕП з її регулювання пов'язано з такими природними факторами як: кліматичні, геоморфологічні, ґрунтові, рослинні тощо. Рослинні фактори у цілому зменшують інтенсивність ерозійних та дефляційних процесів аж до повного їх припинення. Механізми впливу рослинного покриву на ерозію зокрема викладено у роботі (Sithin, 2021). Головними його властивостями, що визначають інтенсивність ерозії та дефляції є: проективне покриття ґрунту рослинністю, висота рослин та їх біомаса, видовий склад, наявність підстилки, трав'яного покриву тощо. Кліматичні фактори – характер, інтенсивність та кількість опадів, енергія поверхневого стоку, шар снігу та вміст у ньому води, інтенсивність танення снігу, швидкість вітру, температурні показники тощо. Ґрунтові фактори визначаються щільністю будови ґрунту, гранулометричним та структурно-агрегатним складом, вмістом гумусу, водним та температурним режимами тощо. Геоморфологічні (топографічні) фактори – ухил, довжина, поздовжня форма, поперечна кривизна та експозиція схилу тощо (Галаган, 2016).

Ці фактори можуть зазнавати антропогенного впливу на території зеленої зони. Такий вплив може мати як позитивні так і негативні наслідки для ЕП. Так, наприклад, облаштування МЗЗ часто пов'язане з переплануванням (зменшенням/збільшенням крутизни та довжини) схилів, що напряду визначає інтенсивність ерозійних процесів. Коригування щільності, структури та/або видового складу посадки, наприклад, висівання газонних трав дає стійкий протиерозійний та протидефляційний захисний ефект. З іншого боку, в результаті витоптування відбувається

знищення трав'яного покриву і зміна агрегатного складу ґрунту, що приводить до погіршення його водного та повітряного режиму. Окрім того, лінійні ареали витоптування (стежки) стають колекторами поверхневого стоку та поступово поглиблюються внаслідок еродуючої дії потоків під час сніготанення чи зливових опадів. Отже, названі природні та антропогенні фактори мають бути включені у якості розрахункових параметрів до БД.

Відповідно до методики оцінки ризику дефляції (*Methodendokumentation «Bodenkunde», 2000*) факторами, які відображають умови протікання процесу поверхневого видування ґрунту, що складатимуть атрибутивну складову інформації у БД, є: ерозійність верхнього шару ґрунту, середньорічна швидкість вітру на висоті 10 м, рівень ґрунтозахисної функції рослин, наявність вітрових перешкод тощо. Таким чином, було обґрунтовано набір розрахункових параметрів, що ввійшли у якості атрибутів до БД (табл. 1).

При виконанні третього завдання роботи, як найбільш ефективний, було обрано інструментарій просторового аналізу QGIS/SAGA (версія QGIS 3.32.1-Lima), що містить необхідні базові алгоритми геообробки та модулі для розрахунків ЕП.

Територією тестування методики, було обрано м. Київ, тож матеріалами для проведення дослідження стали доступні картографічні дані про: зелені зони міста (*OpenStreetMap, 2022*); рельєф (DSM) (*ALOS, 2023*), рослинність (*Zanaga et al., 2021; Buchhorn et al., 2020*) та ґрунти (*Корогода та ін., 2023*).

Файлову БД формували тематичні векторні та растрові набори геоданих, а також їх стилі та представлення у форматі GeoPackage відповідно до стандартів Open Geospatial Consortium.

Технологічно реалізація методики полягала у наступному:

1. З бази даних OSM (*OpenStreetMap, 2022*) було вилучено інформацію про наявні зелені зони міста та доповнено її інформацією з продукту ESA WorldCover за 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, з просторовою роздільною здатністю 100 м (*Buchhorn et al., 2020*). Передусім мова йде про відсутні в OSM зелені простори (як правило, внутрішньоквартальні

та придорожні зелені насадження). Об'єднана таким чином інформація дозволила створити перший «вхідний» векторний тематичний набір геоданих БД – «BGI_erosion», у якому було класифіковано зелені зони (табл. 2.)

2. Для розрахунку рельєфозалежного фактору ерозії (LS) та створення другого «вхідного» растрового набору даних БД «LS» (рис. 1) використовувалася DEM ALOS World 3D-30m (*ALOS, 2023*). Отримані з відкритих джерел дані ДЗЗ попередньо оброблялися інструментами QGIS / SAGA (версія QGIS 3.32.1-Lima). DEM перетворювалася з використанням СК Universal Transverse Mercator (UTM) zone 36N, еліпсоїд WGS 1984. Для усунення шуму і дефектів застосовувалися стандартні алгоритми фільтрації і гідрологічне коригування (Fill Sinks). Ключова функція алгоритму Fill Sinks полягає у максимально можливому усуненні артефактів зберігаючи характерний рельєф. Обчислення LS для оцінки ЕП також здійснювалося в середовищі QGIS/SAGA із застосуванням алгоритму обчислення Terrain Analysis/Hydrology/module LS-Factor, Field Based за методом (*Desmet & Govers, 1996*). Цей метод враховує фактор довжини схилу який замінюється на конкретну площу водозбору і це дозволяє обчислити ерозійну мережу враховуючи напрям та акумуляцію поверхневого стоку з DEM.

3. Середньозважені за площами окремих зелених зон міста значення LS фактору, як результат розрахунку зональної статистики за алгоритмом обчислення Raster Analysis/module Zonal statistics растрового тематичного набору геоданих «LS» передано у векторний набір «BGI_erosion». Таким чином, було отримано один з розрахункових параметрів – атрибут БД «LS» (див. табл.1).

4. На основі ландшафтної карти (*Давидчук та ін., 2021*) та власних польових і лабораторних досліджень ґрунтів було побудовано третій «вхідний» векторний набір геоданих БД – «Soils_erosion», в якому за типами ґрунтів та таблицями відповідності (*Methodendokumentation «Bodenkunde», 2000*) наповнено атрибутивні поля «Ks», «Kb», «Kh» (рис 2.).

5. У результаті процедур оверлейного аналізу (Vector overlay/module Intersection) між наборами геоданих «BGI_erosion» та «Soils_erosion» середньозважені за площами кожної зеленої зони значення ґрунтових факторів з набору «Soils_

Таблиця 1. Набір розрахункових параметрів для оцінки екосистемних послуг з контролю швидкості ерозії ґрунту в міських зелених зонах

Фактори	Атрибут БД	Зміст	Спосіб розрахунку	Джерело отримання
Для визначення ерозії				
Топографічні	LS	параметр, що характеризує вплив рельєфу, а саме довжини та крутизни схилу на втрати ґрунту з ерозією	на основі співвідношення довжини та ухилу поверхні	DEM ALOS World 3D-30m (ALOS, 2023)
	Slope	параметр, що характеризує вплив ухилу поверхні на втрати ґрунту з ерозією	на основі алгоритму Zevenbergen-Thorne (y %) (Zevenbergen & Thorne, 1987)	
Ґрунтові	Kb	коефіцієнт потенційної ерозії ґрунту, обумовлений сумарним вмістом дрібного піску та пилу	на основі номограми Уїшмейєра-Джонса-Кроса, або за гранулометричним складом ґрунту	Карта ґрунтів території та таблиці відповідності (Methodendokumentation "Bodenkunde", 2000)
	Ks	коефіцієнт потенційної ерозії ґрунту (скелетності), обумовлений структурно-агрегатним складом ґрунту	на основі визначення сумарного вмісту частинок розміром більше 2 мм у верхньому горизонті відносно маси горизонту (y %)	
	Kh	коефіцієнт потенційної ерозії ґрунту, обумовлений гумусованістю верхнього горизонту	на основі визначення вмісту гумусу у верхньому горизонті (y %)	
Рослинні	C*	параметр, що характеризує вплив рослинного покриву на швидкість протікання ерозійних процесів	відношення значень виносу ґрунту до значень на ділянці, що не має рослинності	Карти рослинних покривів (Buchhorn et al., 2020, Zanaga et al., 2021), таблиці відповідності (Methodendokumentation "Bodenkunde", 2000)
Кліматичні	R	показник еродуючої здатності дощів або ерозійний індекс опадів	на основі середньої річної кількості опадів або середньої кількості опадів у тепле півріччя	Карти ерозійного індексу опадів (Світличний & Чорний, 2007)
Для визначення дефляції				
Ґрунтові	Kh	(див. вище)		
Кліматичні	V	показник середньорічної швидкості вітру на відкритих територіях на висоті 10 м (м/с)		Відкриті дані ЦГО імені Бориса Срезневського (Стан забруднення..., 2023)
Рослинні	C*	(див. вище)		
	H	параметр, що характеризує захисну дію вітрових перешкод	$S = h * 25$ <p>S - максимальна загальна довжина зони захисту (м), h - висота вітрової перешкоди (м)</p>	Розрахований «S», ранжований на 5 рівних діапазонів, визначає: дуже гарний (найближчий до дерев), гарний, середній, низький та дуже низький рівні захисту (Methodendokumentation "Bodenkunde", 2000)

* Нами було модифіковано значення параметру, що характеризує вплив рослинного покриву (C), оскільки в оригінальній методиці (Methodendokumentation «Bodenkunde», 2000), він визначався для сільськогосподарських та природних систем. При цьому по-перше, зважалося на те, що в міських зелених зонах, на відміну від природних біоценозів, порушено умови формування підстилки /дернини, яка є одним з факторів уповільнення ерозії, з іншого боку газонна трава, за даними (Sithin, 2021), майже на 98% знижує втрати ґрунту у порівнянні із відкритими, або частково вкритими рослинністю ділянками, та «працює» подібно до природних лучних рослинних угруповань. Значення «C» для МЗЗ ми адаптували наступним чином: для територій лісопарків, природоохоронних територій та водоохоронних зон, він визначався як показник характерний для природних ландшафтів. Для штучних насаджень (сквери, газони, алеї), це значення обиралося відповідно до наявного видового складу. Газони інтерпретувались як лучна рослинність. Території зі зведеним рослинним (трав'яним) покривом – як сільськогосподарські угіддя, що знаходяться під вигоном. У розрахунках дефляції, наявність деревної рослинності ми розглядали як вітрові переешкоди тощо.

Таблиця 2. Атрибути векторного тематичного набору геоданих БД – «BGI_erosion»

Назва	Тип	Зміст		
		Код	Зміст коду	
Id	Float	Унікальний номер	Код зеленої зони	
Usage_class	Float	Категорія зеленої зони (Про затвердження Правил ..., 2006)	1	Зелені насадження загального користування
			2	Зелені насадження обмеженого користування
			3	Зелені насадження спеціального призначення
Usage_type	Float		1	Насадження на територіях лісопарків, лугопарків
			2	Насадження на територіях загальноміських і районних парків, спеціалізованих парків, парків культури та відпочинку, зоопарків та ботанічних садів, скверів, бульварів, насадження на схилах, набережних та ін.
			3	Насадження на міжквартальних територіях або при групі житлових будинків
			4	Насадження на територіях громадських та житлових будинків, закладів освіти, охорони здоров'я, культурно-освітніх і спортивно-оздоровчих установ, промислових і складських зон та ін.
			5	Насадження транспортних магістралей і вулиць, пришляхові насадження, на ділянках санітарно-захисних зон довкола промислових підприємств, ліній електропередач високої напруги
			6	Насадження на територіях кладовищ і крематоріїв

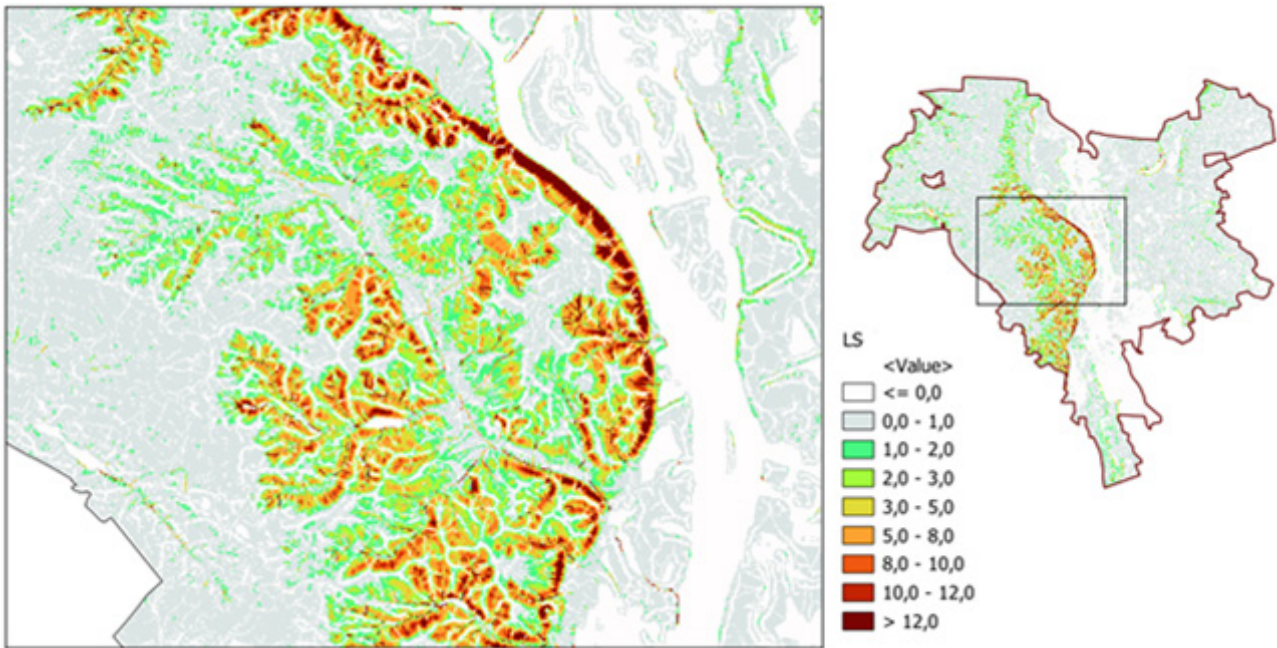


Рис 1. Просторовий розподіл LS-фактору у межах м. Києва, обчислений з DEM ALOS World 3D-30m

erosion» було передано як атрибути «Ks», «Kb», «Kh» у набір геоданих «BGI_erosion».

6. Створення векторного набору геоданих БД «Vegetation» відбувалося на основі даних ДЗЗ. Для цього, відповідно до методики, з продукту космічного знімання (Zanaga et al., 2021) було вилучено класи земних покривів: деревний покрив, пасовища, орні землі, трав'янисті, водно-болотні угіддя, кущі тощо. На основі оверлейного аналізу між цими даними (Buchhorn et al., 2020) було перекласифіковано “деревний покрив” на три підкласи: хвойна, мішана та листяна деревна рослинність.

7. Процедура оверлейного аналізу векторних наборів «Vegetation» та «BGI_erosion», обчислення з DEM значень ухилу поверхні (Slope) за алгоритмом SAGA GIS Terrain Analysis/Morphometry/module Slope, Aspect, Curvature та векторними обчисленнями полів в атрибутивній таблиці Vector Table/ module Field calculator було визначено фактор рослинності (C), (табл. 3) який передано середньозважені за площами зелених зон його значення у поле «C» набору геоданих БД «BGI_erosion».

8. У векторному наборі «BGI_erosion» в атрибутивному полі кліматичного фактору «R» було додано значення «11,3» за однорідністю кліматичних умов (Світличний & Чорний, 2007), а у полі «P» – значення «1», оскільки в межах зеле-

них зон Києва майже повсюдно проводять протиерозійні заходи.

9. Відповідно до обраної моделі ABAG, було визначено кількість винесеного ґрунту з 1 га у т/рік в кожній зеленій зоні. Таким чином отримано показник, що характеризує ефективність кожної конкретної зеленої зони у виконанні протиерозійної функції. Значення показника було розміщено в атрибутивному полі «MBA» векторного набору «BGI_erosion».

10. Відповідно до обраної моделі (Methodendokumentation «Bodenkunde», 2000), було визначено ризик розвитку дефляції (Erosionsgefährdung von Böden durch Wind). Значення показника було розміщено в атрибутивному полі «Deflation» векторного набору «BGI_erosion».

11. Стандартними процедурами векторних обчислень Vector Table/ module Field calculator в атрибутивній таблиці набору «BGI_erosion» сума значень атрибутів «MBA» та «Deflation» було ранжовано на 5 діапазонів. Це дозволило створити атрибутивні поля, що містили бальну характеристику обсягів ЕП – «ES_er_contr» та їх назву – «ES_name», рівні ризику втрати (недоотримання) послуги сьогодні – «R_er_contr» та їх назву – «R_name» (табл. 4).

12. Аналогічним способом та за допомогою процедур векторних обчислень у атрибутивній таблиці набору «BGI_erosion» було розподіле-

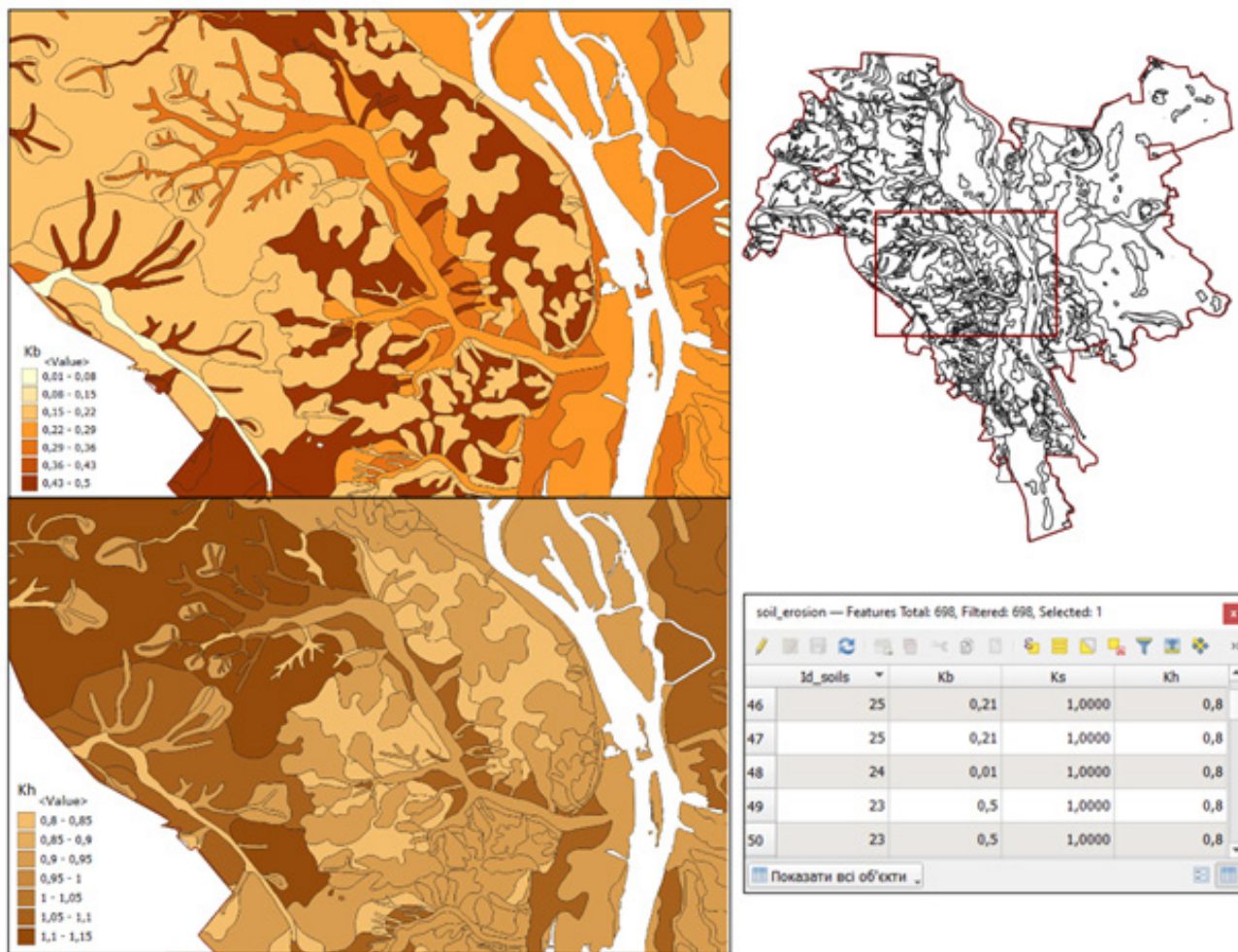


Рис 2. Просторовий розподіл ґрунтових факторів (Ks, Kb, Kh) у межах м. Києва

но значення атрибутів «Ks», «Kb», «LS», «C» відповідно до функції бажаності Харрігтона (Harrington, 1965) і визначено бальні значення та характеристики ризиків втрати послуги в майбутньому. Значення було додано у відповідні атрибутивні поля «R_Ks», «R_Kb», «R_LS», «R_C». Оскільки ці фактори є рівнозначними, то загалом ймовірність ризику втрати ЕП в майбутньому (R_pot), нами було оцінено як середнє з окремих факторів (табл. 5).

Таким чином було проведено геоінформаційне оцінювання із формуванням бази геоданих щодо умов протікання ерозійних процесів у зелених зонах м. Києва, обсягів ЕП з контролю швидкості ерозії та ризиків їх втрати сьогодні та в майбутньому (рис. 3).

Висновки. У роботі відповідно до провідних факторів що визначають відмінності у швидкості протікання ерозійних та дефляційних процесів було сформовано базу геоданих щодо передумов їх протікання у зелених зонах м. Києва, обсягів

ЕП з контролю швидкості ерозії та ризиків їх втрати (недоотримання) сьогодні та в майбутньому.

Середовище QGIS/SAGA (версія QGIS 3.32.1-Lima) було обрано як найбільш ефективний інструментарій просторового аналізу, який містить необхідні базові алгоритми геообробки та модулі для розрахунків ЕП. Файлову базу даних оцінювання ЕП в міських зелених зонах, у форматі GeoPackage відповідно до стандартів Open Geospatial Consortium, формував набір тематичних векторних та растрових наборів геоданих: «LS», «Vegetation», «Soils_erosion» та «BGI_erosion».

Методика оцінки ризику дефляції (Erosionsgefährdung von Böden durch Wind) та емпірична модель ABAG (Allgemeine Bodenabtragsgleichung), були обрані нами, як такі, що ґрунтуються на використанні доступних та достовірних показників, враховують провідні фактори протікання ерозійних та дефляційних

Таблиця 3. Значення параметру, що характеризує вплив рослинного покриву на швидкість протікання ерозійних процесів (C)

Тип рослинності	Ухил, %				
	5	10	20	30	40
	C				
Зведена рослинність	0,78	0,82	0,90	0,95	
Луки, газони	0,02				
Розріджений хвойний деревостан з тонкою підстилкою	0,28	0,34	0,53	0,77	
Хвойний деревостан з непорушеним покривом та підстилкою	0,02	0,03	0,05	0,08	0,34
Розріджений листяний деревостан з тонкою підстилкою	0,1	0,2	0,3	0,4	
Листяний деревостан з непорушеним покривом та підстилкою	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05

Таблиця 4. Визначення обсягів ЕП та ризиків їх втрати (недоотримання)

Втрати ґрунту (т/га/рік)	ES_er_contr	ES_name	R_er_contr	R_name
[0-0.5)	5	Максимальні	1	Вельми низькі
[0.5-1)	4	Вище середніх	2	Низькі
[1-5)	3	Середні	3	Помірні
[5-10)	2	Нижче середніх	4	Високі
>=10	1	Мінімальні	5	Вельми високі

Таблиця 5. Визначення ризиків втрати ЕП в майбутньому

Ks	R_Ks	Kb	R_Kb	LS	R_LS	C	R_C	R_pot	R_pot_name
[0,1-0,2)	1	[0,048-0,105)	1	[0,01-1,17)	1	[0,01-0,16)	1	[1-2)	Вельми низькі
[0,2-0,37)	2	[0,105-0,194)	2	[1,17-4,12)	2	[0,16-0,29)	2	[2-3)	Низькі
[0,37-0,63)	3	[0,194-0,33)	3	[4,12-11,62)	3	[0,29-0,49)	3	[3-4)	Помірні
[0,63-0,8)	4	[0,33-0,419)	4	[11,62-18,71)	4	[0,49-0,62)	4	[4-5)	Високі
[0,8-1]	5	[0,419-0,524]	5	[18,71-29,24]	5	[0,62-0,78]	5	5	Вельми високі

процесів та легко адаптуються до методів геоінформаційного моделювання.

Параметр, що характеризує вплив рельєфу, а саме довжини та крутизни схилу на втрати ґрунту з ерозією (**LS**); коефіцієнт потенційної ерозії ґрунту, обумовлений сумарним вмістом дрібного піску і пилу (**Kb**); коефіцієнт потенційної ерозії ґрунту (скелетності), обумовлений структурно-

агрегатним складом (**Ks**); коефіцієнт потенційної ерозії ґрунту, обумовлений гумусованістю верхнього горизонту (**Kh**); параметр, що характеризує вплив рослинного покриву на швидкість протікання ерозійних процесів (**C**); показник еродуючої здатності дощів або ерозійний індекс опадів (**R**); параметр, що характеризує вплив протиерозійних заходів на швидкість протікання

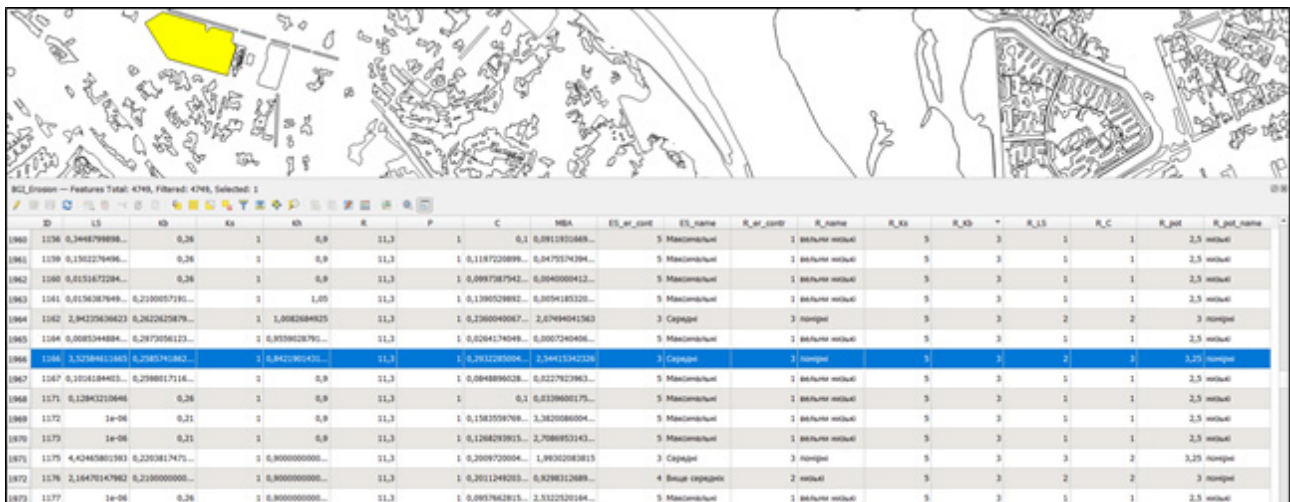


Рис. 3. База геоданих обсягів ЕП з контроллю швидкості ерозії та ризиків їх втрати

ерозійних процесів (**P**); показник середньорічної швидкості вітру (**V**) та параметр, що характеризує захисну дію вітрових перешкод (**H**) склали набір розрахункових показників, що увійшли до БД у якості атрибутивної інформації.

Обрані моделі та розрахункові показники, а також обрані технології і аналітичний інструментарій QGIS / SAGA дозволили реалізувати методику геоінформаційного оцінювання ЕП. У ході роботи на основі операцій просторового аналізу в процесі ГІС-моделювання, було кількісно визначено: показник, що характеризує ефективність кожної конкретної зеленої зони у виконанні протиерозійної функції (**MBA**), обсяги екосистемної послуги (**ES_er_contr**), ризики її недоотримання сьогодні (**R_er_contr**) та в майбутньому (**R_pot**).

Відкриті ГІС-технології, зрозумілі аналітич-

ні процедури та алгоритми обчислення геоданих різних форматів разом із відкритістю і доступністю вхідної інформації, створюють умови в яких оцінка, проведена за представленою методикою стає доступною для містопланувальників, що часто обмежені в інформації та способах її обробки.

Фінансування. Дана 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».

Список використаних джерел

- Василюк, О., Ільмінська, Л. (2020). Екосистемні послуги. Огляд. Режим доступу: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/09/EcoPoslугy_web_new.pdf
- Висоцька, Н. Ю., Калашніков, А. О., Сидоренко, С. В., Сидоренко, С. Г., Юрченко, В. А. (2021). Екосистемні послуги полезахисних лісових смуг як основа компенсаційних механізмів їхнього створення та утримання. Наукові праці Лісівничої академії наук України, 22, 199-208. DOI: <https://doi.org/10.15421/412118>
- Галаган, О., (2016). Геоінформаційне моделювання забруднення приавтомагістральних геосистем сполуками важких металів. Дис. ... к. геогр. н. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ. Режим доступу: http://scc.univ.kiev.ua/upload/iblock/7bc/dis_Galagan.pdf
- Давидчук, В.С., Зарудна, Р.Ф., Міхелі, С.В., Істоміна, Г.П., Сорокіна, Л.Ю. (2021) Збірка географічних карт з описом «Київська область. Ландшафтна карта» (у цифровому форматі, базові масштаби 1:100 000, 1:200 000, 1:400 000) («Ландшафтна карта Київської області»). Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 104563. Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності». Дата реєстрації 14.05.2021. Авторське право і суміжні права. Офіц. бюл. 65, 50-51. URL:<https://ukrpatent.org/uk/articles/bulletin-copyright>

- Екосистемні послуги регіонального ландшафтного парку «Знесіння». Дослідження. (2019). Режим доступу: <http://epl.org.ua/wp-content/uploads/2019/10/Ekosystemni-poslugy-RLP-Znesinnya.pdf>.
- Корогода, Н.П., Ковтонюк, О.В. Галаган, О.О. (2023). Зелені зони Києва: оцінка ефективності функціонування та обсягів екосистемних послуг з регулювання ерозії. Журнал з геології, географії та екології, 32 (3), 516-524. <https://doi.org/10.15421/112346>
- Корогода, Н. (2022). Оцінка ризиків втрати екосистемної послуги з регулювання ерозії міськими зеленими зонами. Фізична географія та геоморфологія, 45 (111-116), 49-57. DOI: doi:10.17721/phgg.2022.1-6.06
- Про затвердження Правил утримання зелених насаджень у населених пунктах України. (2006). Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. Наказ №105 від 10.04.2006
- Світличний, О.О., Чорний, С.Г. (2007). Основи ерозієзнавства: Підручник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 266 с.
- Соловій, І. (2016). Оцінка послуг екосистем, забезпечуваних лісами України, та пропозиції щодо механізмів плати за послуги екосистем. Режим доступу: https://d2ouvy59p0dgbk.cloudfront.net/downloads/evaluation_of_forest_ecosystem_services_and_proposals_on_pes_mechanisms.pdf
- Стан забруднення атмосферного повітря у м. Києві та Київській області. (2023). Режим доступу: <http://sco-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu>
- ALOS Global Digital Surface Model (DSM) “ALOS World 3D-30m” (AW3D30) Ver.3.2/3.1 dataset https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm
- 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: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3939050>
- Desmet, P.J.J., Govers, G. A. (1996). GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Soil Water Conservation, 51, 427–433
- European Commission, Joint Research Centre, Maes, J., Teller, A., Erhard, M., et al. (2020). Mapping and assessment of ecosystems and their services: an EU wide ecosystem assessment in support of the EU biodiversity strategy, Publications Office, DOI:<https://data.europa.eu/doi/10.2760/757183>
- Evans, D. L., Falagán, N., Hardman, C. A., Kourmpetli, S., Liu, L., Mead, B. R., & Davies, J. A. C. (2022). Ecosystem service delivery by urban agriculture and green infrastructure—a systematic review. Ecosystem Services, 54, 101405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101405>
- Fryrcar, D.W. & Chen, WN & Lester, C.. (2001). Revised Wind Erosion Equation. Annals of Arid Zone, 40, 265-279.
- Fu B., Liu Y., Lu Y., He C., Zeng Y., Wu B. (2011) Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. Ecological Complexity, 8 (4), 284-293. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.07.003>
- Gwapedza, D., Hughes, D.A., Slaughter, A.R., Mantel, S.K. (2021). Temporal Influences of Vegetation Cover (C) Dynamism on MUSLE Sediment Yield Estimates: NDVI Evaluation. Water, 13, 2707. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13192707>
- Haines-Young, R., Potschin, M.B. (2018). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. Available at: <https://www.cices.eu>
- Harrington, E.C. (1965). The desirable function. Industrial Quality Control, 21 (10), 124–131.
- Istanbuly, M.N., Dostál, T., Jabbarian Amiri, B. (2021). Modeling the Soil Erosion Regulation Ecosystem Services of the Landscape in Polish Catchments. Water, 13, 3274. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13223274>
- Jiang, C., Wang, F., Zhang, H., Dong, X. (2016). Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000–2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration, Ecological Engineering, 97, 258-271, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.030>
- Liu, J., Wang, X., Zhang, L., Guo, Z., Chang, C., Du, H., Wang, H., Wang, R., Li, J., Li, Q. (2022). Regional Potential Wind Erosion Simulation Using Different Models in the Agro-Pastoral Ecotone of Northern China. Int J Environ Res Public Health., 19 (15), 9538. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19159538>.
- Methodendokumentation «Bodenkunde»: Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Geologisches Jahrbuch. Sonderhefte: Reihe G - Heft SG 1- Ad-hoc-AGBoden. (2000). Volker Hennings. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland. - Verlag Schweizerbart, Stuttgart, 296 p.
- OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org. 2022
- Sithin, M. (2021). Role of Turfgrass in Urban Landscapes. Journal of Plant Development Sciences, 13, 247–

255. Available at: https://www.researchgate.net/publication/352211459_Role_of_Turfgrass_in_Urban_Landscapes
- Steinhoff-Knopp, B., Kuhn, T.K. & Burkhard, B. (2021). The impact of soil erosion on soil-related ecosystem services: development and testing a scenario-based assessment approach. *Environ Monit Assess*, 193 (Suppl 1), 274. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08814-0>
- Tian, P., Tian, X., Geng, R., Zhao, G., Yang, L., Mu, X., Gao, P., Sun, W., Liu, Y. (2023). Response of soil erosion to vegetation restoration and terracing on the Loess Plateau, CATENA, 227, 107103, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107103>.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. The USDA Agricultural Handbook, 537, Maryland
- 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: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R. (1987). Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290120107>

References

- Vasylyuk, O., Ilminska, L. (2020). Ekosystemni posluhy. Ohlyad [Ecosystem services. Review.] Available at: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/09/EcoPosludy_web_new.pdf [in Ukrainian]
- Vysotska, N., Kalashnikov, A., Sydorenko, S., Sydorenko, S., Yurchenko V.n(2021). Ekosystemni posluhy polezakhysnykh lisovykh smuh yak osnova kompensatsiynykh mekhanizmiv yikhnoho stvorennia ta utrymannia [Ecosystem services of shelterbelts as the basis of compensatory mechanisms of their creation and maintenance]. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 22, 199-208. DOI: <https://doi.org/10.15421/412118> [in Ukrainian]
- Halahan, O. (2016). Heoinformatsiyni modelyuvannya zabrudnennia pryavtomahistral'nykh heosystem spolukamy vazhkykh metaliv. [The GIS modeling of near-motorways geosystems pollution with the heavy metals compounds]. Thesis for a candidate of science degree in Geograph, Taras Shevchenko National University of Kyiv Available at: http://scc.univ.kiev.ua/upload/iblock/7bc/dis_Galagan.pdf [in Ukrainian]
- Davydchuk, V.S., Zarudna, R.F., Mikheli, S.V., Istomina, G.P., Sorokina, L. Yu. (2021) Zbirka heohrafichnykh kart z opysom «Kyyivs'ka oblast'. Landshaftna karta» (u tsyfrovomu formati, bazovi mashtaby 1:100 000, 1:200 000, 1:400 000) («Landshaftna karta Kyyivs'koyi oblasti») [Collection of geographic maps with the description «Kyiv region. Landscape map» (in digital format, base scales 1:100 000, 1:200 000, 1:400 000) («Landscape map of Kyiv region»)]. Certificate of copyright registration for the work No. 104563. State Enterprise «Ukrainian Intellectual Property Institute». Date of registration: 14.05.2021. Copyright and related rights. *Official Bulletin*. 65, 50-51. URL: <https://ukrpatent.org/uk/articles/bulletin-copyright>
- Ekosystemni posluhy rehional'noho landshaftnoho parku «Znesinnya». Doslidzhennia. [Ecosystem services of the «Znesinnia» regional landscape park. Research]. (2019). Available at: <http://epl.org.ua/wp-content/uploads/2019/10/Ekosystemni-posludy-RLP-Znesinnya.pdf>. [in Ukrainian]
- Korohoda, N.P., Kovtoniuk, O.V., Halahan, O.O. (2023). Zeleni zony Kyyeva: otsinka efektyvnosti funktsionuvannya ta obsyahiv ekosystemnykh posluh z rehulyuvannya eroziyi [Kyiv green areas: assessment of the functioning efficiency and volumes of ecosystem services for erosion control]. *Journal of Geology, Geography and Geocology*, 32 (3), 516-524. <https://doi.org/10.15421/112346> [in Ukrainian]
- 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 [in Ukrainian]. DOI:10.17721/phgg.2022.1-6.06
- Pro zatverdzhennia Pravyt utrymannia zelenykh nasadzen' u naselenykh punktakh Ukrayiny. [On the approval of the Rules for the maintenance of green spaces in populated areas of Ukraine] (2006). Ministry of Construction, Architecture and Housing and Communal Services of Ukraine. Order No. 105 dated April 10, 2006 [in Ukrainian]
- Svitlychnyy, O.O., Chornyy, S.H. (2007). Osnovy eroziyevnavstva: Pidruchnyk. [Basics of erosion science: Textbook.] - Sumy: VTD «University book», 266 p. [in Ukrainian]
- Soloviy, I. (2016). Otsinka posluh ekosystem, zabezpechuvanykh lisamy Ukrayiny, ta propozytsiyi shchodo mekhanizmiv platy za posluhy ekosystem.[Evaluation of forest ecosystem services provided by forests of Ukraine and proposals on PES mechanisms]. Available at: https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/evaluation_of_forest_ecosystem_services_and_proposals_on_pes_mechanisms.pdf [in Ukrainian]
- Stan zabrudnennia atmosfernoho povitrya u m. Kyevi ta Kyyivs'koyi oblasti [The state of atmospheric air

- pollution in the city of Kyiv and the Kyiv region]. (2023). Available at: [http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu\[in Ukrainian\]](http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu[in Ukrainian])
- ALOS Global Digital Surface Model (DSM) “ALOS World 3D-30m” (AW3D30) Ver.3.2/3.1 dataset https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm
- 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: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3939050>
- Desmet, P.J.J., Govers, G. A. (1996). GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Soil Water Conservation*, 51, 427–433.
- European Commission, Joint Research Centre, Maes, J., Teller, A., Erhard, M., et al. (2020). Mapping and assessment of ecosystems and their services: an EU wide ecosystem assessment in support of the EU biodiversity strategy, Publications Office, DOI:<https://data.europa.eu/doi/10.2760/757183>
- Evans, D. L., Falagán, N., Hardman, C. A., Kourmpetli, S., Liu, L., Mead, B. R., & Davies, J. A. C. (2022). Ecosystem service delivery by urban agriculture and green infrastructure—a systematic review. *Ecosystem Services*, 54, 101405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101405>
- Fryrcar, D.W. & Chen, WN & Lester, C.. (2001). Revised Wind Erosion Equation. *Annals of Arid Zone*, 40, 265-279.
- Fu B., Liu Y., Lu Y., He C., Zeng Y., Wu B. (2011) Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 8 (4), 284-293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.07.003>
- Gwapedza, D., Hughes, D.A., Slaughter, A.R., Mantel, S.K. (2021). Temporal Influences of Vegetation Cover (C) Dynamism on MUSLE Sediment Yield Estimates: NDVI Evaluation. *Water*, 13, 2707. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13192707>
- Haines-Young, R., Potschin, M.B. (2018). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. Available at: <https://www.cices.eu>
- Harrington, E.C. (1965). The desirable function. *Industrial Quality Control*, 21 (10), 124–131.
- Istanbuly, M.N., Dostál, T., Jabbarian Amiri, B. (2021). Modeling the Soil Erosion Regulation Ecosystem Services of the Landscape in Polish Catchments. *Water*, 13, 3274. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13223274>
- Jiang, C., Wang, F., Zhang, H., Dong, X. (2016). Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000–2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration, *Ecological Engineering*, 97, 258-271, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.030>.
- Liu, J., Wang, X., Zhang, L., Guo, Z., Chang, C., Du, H., Wang, H., Wang, R., Li, J., Li, Q. (2022). Regional Potential Wind Erosion Simulation Using Different Models in the Agro-Pastoral Ecotone of Northern China. *Int J Environ Res Public Health*, 19 (15), 9538. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19159538>.
- Methodendokumentation «Bodenkunde»: Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. *Geologisches Jahrbuch. Sonderhefte: Reihe G - Heft SG 1- Ad-hoc-AGBoden*. (2000). Volker Hennings. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland. - Verlag Schweizerbart, Stuttgart, 296 p.
- OpenStreetMap contributors, www.openstreetmap.org. 2022
- Sithin, M. (2021). Role of Turfgrass in Urban Landscapes. *Journal of Plant Development Sciences*, 13, 247–255. Available at: https://www.researchgate.net/publication/352211459_Role_of_Turfgrass_in_Urban_Landscapes
- Steinhoff-Knopp, B., Kuhn, T.K. & Burkhard, B. (2021). The impact of soil erosion on soil-related ecosystem services: development and testing a scenario-based assessment approach. *Environ Monit Assess*, 193 (Suppl 1), 274. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08814-0>
- Tian, P., Tian, X., Geng, R., Zhao, G., Yang, L., Mu, X., Gao, P., Sun, W., Liu, Y. (2023). Response of soil erosion to vegetation restoration and terracing on the Loess Plateau, *CATENA*, 227, 107103, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107103>.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. *The USDA Agricultural Handbook*, 537, Maryland
- 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: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R. (1987). Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290120107>