



В. М. Скробала, О. С. Дулиба

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

ЕРОЗІЙНА ЗДАТНІСТЬ ОПАДІВ ЯК КЛІМАТИЧНИЙ ЧИННИК ПРОЯВУ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ У ПАРКОВИХ І ЛІСОПАРКОВИХ НАСАДЖЕННЯХ ЛЬВОВА

Проаналізовано загальні підходи до моделювання водної ерозії ґрунтового покриву у ґрунтознавстві та гідрології із використанням багаточисельних рівнянь, зокрема RUSLE (англ. *Revised Universal Soil Loss Equation*), які базуються на аналізі кліматичних умов (ерозійної здатності опадів), ерозійної піддатливості ґрунту, рельєфу місцевості, рослинного покриву і меліоративних заходів. Відзначено, що коефіцієнт ерозійності опадів (R-фактор) є функцією кінетичної енергії та інтенсивності опадів. Наведено результати досліджень ерозійності опадів на підставі пловіограм за формулою Станеску, яка базується на інформації про максимальну 15-хвилинну інтенсивність дощів. З'ясовано, що для визначення ерозійної здатності опадів широко використовують лінійні, степеневі або експоненціальні математичні рівняння, де як аргумент є місячні та річні суми опадів. Застосовано понад 50 формул для визначення ерозійної здатності опадів в умовах Львова на підставі метеорологічних даних за 1990-2024 роки. Встановлено, що більшість математичних виразів не підходять для умов Львова, оскільки істотно відрізняються кліматичними параметрами, на підставі яких їх було розроблено. Досліджено, що у Львові в середньому випадає 760 мм опадів за рік, більша частина яких припадає на період з травня по вересень; мінімальна річна кількість опадів (582 мм) була в посушливий 1995 рік, коли в липні випало всього 10 мм опадів; понад 900 мм опадів було зафіксовано в 1998, 2001 та 2010 роках. Виконано підбір формули для визначення ерозійної здатності опадів в умовах Львова на підставі просторового розподілу значень цього показника на території Польщі та ЄС. Застосовано формулу Марцинковського, яку розроблено на підставі кліматичних параметрів Польщі. Встановлено, що середнє значення ерозійної здатності опадів в умовах Львова становить $715 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$, а середнє квадратичне відхилення – $101 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$; мінімальне значення ерозійності опадів – $537 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ – зафіксовано у посушливому 1995 р., а максимальне – $949 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ – у 2001 році. Запропоновано додатково п'ять апроксимуючих функцій для обчислення ерозійної здатності опадів в умовах Львова з метою порівняльної оцінки параметрів лінійних і степеневих функцій. Встановлено, що функції на підставі модифікованого індексу Фурньє *MFI* характеризуються меншою точністю апроксимації.

Ключові слова: водна ерозія ґрунту; переглянute універсальне рівняння втрати ґрунту; ерозійна здатність опадів; R-фактор; модифікований індекс Фурньє.

Вступ / Introduction

Ерозія ґрунтів є одним із основних факторів деградації земель, який негативно впливає на сільськогосподарські і лісові угіддя та пасовища [6]. Продуктивність сільськогосподарських угідь знижується унаслідок зменшення потужності гумусового горизонту, де зосереджена найбільша кількість поживних речовин [3]. Ерозія ґрунту негативно впливає і на лісові екосистеми, зумовлюючи зменшення кількості видів рослин і порушуючи стабільність усієї екосистеми [11]. Стабільність і біорізноманіття пасовищ також знижуються через ерозію ґрунту, що підвищує їх вразливість до посухи [10].

Довкілля та економіка є двома важливими сферами, де ерозія ґрунту має найбільш виражений вплив [41]. Через погіршення якості ґрунту знижується продуктивність сільськогосподарських угідь, а собівартість сільськогосподарського виробництва зростає [38]. Ерозія ґру-

нту може призвести до замулення водойм, їх евтрофікації та подальшої деградації, що потребує додаткових фінансових витрат для збереження водних ресурсів [28].

Ерозія ґрунту тісно пов'язана зі змінами клімату, з якими планета стикається останніми роками, і вона посилюється через ці зміни [30]. Основним процесом, через який клімат впливає на швидкість ерозії ґрунту, є посилення ерозійної здатності опадів за рахунок збільшення їх кількості та інтенсивності [36].

Інтенсифікація ерозії ґрунту на території Львова передусім зумовлена наявністю ділянок із складними умовами рельєфу. Унаслідок стрімкої урбанізації частина приміських лісів опинилася всередині житлової забудови і з часом була трансформована в парки і лісопарки (парки Стрийський, Шевченківський гай, Залізна Вода, Цитадель, лісопарк Погулянка та інші) [32]. Уцілювання ґрунту внаслідок інтенсивного рекреаційного наван-

Інформація про авторів:

Скробала Віктор Михайлович, канд. с.-г. наук, доцент, кафедра ландшафтно́ї архітектури, садово-паркового господарства та урбоєкології. Email: skrobala@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0606-8079>

Дулиба Остап Степанович, аспірант, кафедра ландшафтно́ї архітектури, садово-паркового господарства та урбоєкології. Email: dulybaostap@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8110-2645>

Цитування за ДСТУ: Скробала В. М., Дулиба О. С. Ерозійна здатність опадів як кліматичний чинник прояву водної ерозії ґрунтового покриву у паркових і лісопаркових насадженнях Львова. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 2. С. 71–79.

Citation APA: Skrobala, V. M., & Dulyba, O. S. (2025). Rainfall erosivity as a climatic factor of the manifestation of water erosion of soil cover in parks and forest parks of Lviv. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(2), 71–79. <https://doi.org/10.36930/40350208>

таження, погіршення водного режиму унаслідок глобального потепління сприяє збільшенню поверхневого стоку та активізації ґрунторуйнівних процесів [33].

Об'єкт дослідження – аналіз ерозійної здатності опадів як кліматичного чинника прояву ерозійних процесів на території Львова.

Предмет дослідження – методи і засоби визначення ерозійної здатності опадів в умовах Львова, що дасть можливість використати *R*-фактор у моделі універсального рівняння втрат ґрунту.

Мета роботи – проаналізувати загальні закономірності впливу ерозійної здатності опадів на ерозійні процеси у паркових і лісопаркових насадженнях Львова, що забезпечить своєчасне впровадження протиерозійних заходів.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- вивчити режим випадіння опадів упродовж року в умовах Львова, що дасть змогу визначити рівень їх ерозійності;
- обчислити ерозійну здатність опадів на підставі їх інтенсивності (плювіограм), що дасть можливість використати *R*-фактор у моделі універсального рівняння втрат ґрунту;
- виконати підбір показників та обчислити ерозійну здатність опадів на підставі місячних і річних сум опадів, що дасть можливість на науковій основі визначити інтенсивність ерозійних процесів у паркових і лісопаркових насадженнях Львова, що забезпечить своєчасне впровадження протиерозійних заходів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У Національній доповіді про стан родючості ґрунтів України [3] зазначено, що із усіх галузей господарства України найбільших прямих втрат від ерозії зазнає аграрна сфера. Частка земель в Україні, що пошкоджена водною ерозією, досягає 32 % від загальної площі або 13,3 млн гектарів. З них 4,5 млн га – із середньо- і сильнозмитими ґрунтами, зокрема 68 тис. га повністю втратили гумусовий горизонт. Середньорічні втрати ґрунту від водної та вітрової ерозії становлять 15 т/га. Це означає, що ґрунтовий покрив країни втрачає щороку близько 740 млн т родючого ґрунту, який містить близько 24 млн т гумусу, 0,7 млн т рухомих фосфатів, 0,8 млн т калію, 0,5 млн т азоту та великі кількості мікроелементів.

У роботі [12] автори проаналізували процеси стрімкого збільшення площі урбанізованих земель у світі в умовах високого рівня техногенезу та інтенсивного розвитку промислової агломерації. В Україні площа забудованих територій становить 2552.9 тис. га, чисельність населення, що проживає в містах, – 70 %. На території міста ґрунт, як складова частина його штучних екосистем, виконує низку важливих екологічних функцій і є вагомим фактором його екологічного та санітарного стану. Тому ґрунтовий покрив урбанізованих територій потребує ретельного вивчення, зокрема й через надзвичайно інтенсивний вплив на нього антропогенних факторів та істотну зміну фактично усіх його властивостей.

У роботі [28] зазначено, що міська ерозія відрізняється від ерозії в сільськогосподарських ландшафтах підвищеною кінетикою водних потоків, безпосередньо зв'язаних із зміною фізичних властивостей земної поверхні: асфальтуванням, бетонуванням, замощенням, ущільненням ґрунту. Специфічні гідрологічні умови міст сприяють збільшенню інтенсивності поверхневого стоку з їх території. У роботі [29] автори акцентують

увагу на потребі збільшення частоти прибирання та покращення якості очищення вулиць через ерозію ґрунту. У водостічних колодязях щороку нагромаджується багато пилу, що містить пестициди, діоксини, важкі метали і нафтопродукти.

У роботі [24] встановлено, що поверхневі стоки з території міст і промислових підприємств потрібно розглядати як поширене джерело забруднення водних об'єктів, що становить небезпеку для здоров'я населення і погіршує умови водокористування. Так, розподіл важких металів у воді та ґрунтах берегової зони р. Стир (Луцьк і околиці) залежить від відстані до джерела забруднення, типу ландшафту (аграрний чи міський), інтенсивності надходження забрудненого поверхневого стоку з навколишньої території.

У роботі [4] автори проаналізували велику кількість математичних моделей для визначення інтенсивності ерозійних процесів. З огляду на високу трудомісткість робіт, пов'язаних із безпосереднім вивченням інтенсивності ерозійних процесів в умовах урбанізованих територій, їх розрахунок на підставі математичних моделей має важливе практичне значення.

Загалом, відсутність наразі кількісних даних про чинники ерозійних процесів на території Львова відповідно до Універсального рівняння втрат ґрунту, актуалізують вивчення цього питання з метою опрацювання системи протиерозійних заходів.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження ерозійної здатності опадів в умовах Львова (географічні координати 49N50, 24E00) виконували способом обчислення емпіричних коефіцієнтів на підставі місячних і річних сум опадів за 1990–2024 рр., а також досліджень інтенсивності окремих опадів за допомогою плювіограм. Аналіз метеопараметрів здійснювали на підставі відкритих джерел інформації. Математичне опрацювання метеорологічних даних виконували за допомогою статистичного пакета Statistica 6.0.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

З кінця XX ст. за кордоном для оцінювання та математико-картографічного моделювання потенційних втрат ґрунту внаслідок водної ерозії широко використовують різноманітні моделі, зокрема USLE (англ. *Universal Soil Loss Equation*, Універсальне Рівняння Ґрунтової Ерозії), RUSLE (англ. *Revised USLE*), MUSLE (англ. *Modified USLE*) та інші. Універсальне рівняння ґрунтової ерозії є математичним виразом, що базується на шести основних чинниках, які визначають інтенсивність ерозійних процесів [38, 39]:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P, \quad (1)$$

де: *A* – середньорічні втрати ґрунту, т/(га·рік); *R* – фактор ерозійної здатності опадів, МДж·мм/(га·год); *K* – фактор ерозійної піддатливості ґрунтів, т·га·год/(МДж·мм·га); *L* – фактор довжини схилу, безрозмірна величина; *S* – фактор ухилу схилу, безрозмірна величина; *C* – фактор сівозміни (агротехніки), безрозмірна величина; *P* – фактор протиерозійних заходів, безрозмірна величина.

Фактор ерозійної здатності для окремого дощу *R_i* визначають як добуток сумарної кінетичної енергії дощу (*E*) і його максимальної 30-хвилинної інтенсивності (*I³⁰*). Ерозійний індекс опадів *R* визначають за такою формулою [39]:

$$R_j = \frac{E}{N} \sum_{i=1}^j I_i^{30}, j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де: i – порядковий номер зливи; j – кількість злив упродовж N років.

Для обчислення ерозійної здатності i -тих опадів I_i^{30} потрібні дані про їх інтенсивність упродовж всього періоду їх випадіння. Натомість на більшості метеостанцій фіксують тільки добові значення опадів, або за 6- і 12-годинні проміжки часу. Тому для порівняльного оцінювання різних підходів практичне значення можуть мати наші дослідження ерозійної здатності опадів у Львові на підставі пловіограм, за матеріалами метеостанції Українського державного лісотехнічного університету (тепер – Національного лісотехнічного університету України) (табл. 1). Обчислення виконували за формулою Станеску [9]:

$$R_{Si} = \sum_{i=1}^n I_i^{15} \cdot Q_i, \quad (3)$$

де: Q_i – кількість окремих i -тих опадів, мм; I_i^{15} – максимальна 15-хвилинна інтенсивність i -тих опадів, мм/хв.

Табл. 1. Ерозійна здатність дощів в умовах Львова / Rainfall erosivity in Lviv conditions

Дата	Кількість опадів Q_i , мм	Інтенсивність дощу I_i^{15} , мм/хв	Ерозійна здатність опадів R_i
1992 рік			
28.05	45,1	0,10	4,5
30.05	22,4	0,10	2,2
10.06	13,9	0,17	2,4
11.06	10,6	0,17	1,8
17.06	47,8	1,00	47,8
6.07	11,1	0,11	1,1
23.07	24,5	0,40	9,8
17.08	23,9	0,21	5,0
5.09	36,2	0,13	4,7
6.09	49,9	0,10	5,0
7.09	20,9	0,10	2,0
15.09	12,8	0,10	1,3
22.10	17,5	0,10	1,8
29.10	18,5	0,10	1,9
Дощі слабкої інтенсивності			
21.03-10.11	211,3	0,05	10,6
Сума	566,6	–	101,9
1993 рік			
31.05	47,6	1,00	47,6
21.06	11,1	0,20	2,2
24.06	12,3	0,13	1,6
29.06	7,4	0,10	0,7
6.07	9,9	0,30	3,0
21.07	13,2	0,33	4,4
22.07	52,3	0,10	5,2
23.07	49,0	0,10	4,9
25.08	35,5	0,67	23,8
29.08	39,2	0,10	3,9
1.09	19,4	0,10	1,9
2.09	12,1	0,10	1,2
16.10	29,1	0,10	2,9
Дощі слабкої інтенсивності			
17.03-9.11	210,2	0,05	10,5
Сума	548,3	–	113,8

Для західної частини України, де розташований Львів, ерозійний індекс дощових опадів становить $R = 10$ -12 одиниць [42]. Але автори зазначають, що для визначення R вони використовували коефіцієнт 0,01, щоб уникнути великих чисел. Відповідно, було збільшено у

100 разів значення K -фактора ерозійної піддатливості ґрунтів [36]. У працях [9, 41, 42] не вказані одиниці виміру фактора ерозійної здатності опадів R . Але це не має істотного значення, оскільки фактор ерозійної піддатливості ґрунтів K визначають як кількість змитого ґрунту з одиниці площі на умовну одиницю ерозійної здатності опадів:

$$K = A_1 \cdot R^{-1}, \quad (4)$$

де A_1 – кількість змитого ґрунту на стандартній стоковій ділянці, т/га.

Отже, ерозійний індекс дощових опадів за формулою Станеску дає результат, який приблизно в 10 разів перевищує відповідний коефіцієнт R за методикою Заславського [42].

Коефіцієнт ерозійної здатності опадів (R -фактор) є одним із параметрів універсального рівняння втрат ґрунту RUSLE (англ. *Revised Universal Soil Loss Equation*), та інших моделей прогнозування ерозії. Для розрахунку R -фактора розроблено багато формул [4]. Здебільшого вони становлять лінійну, степеневу або експоненціальну функції, де як аргументи використовують місячні та річні суми опадів.

У Львові в середньому випадає 760 мм опадів за рік (табл. 2), більша частина яких припадає на період з травня по вересень. Мінімальну річну кількість опадів (582 мм) зафіксовано в посушливий 1995 р., коли в липні випало всього 10 мм опадів. Понад 900 мм опадів було зафіксовано в 1998, 2001 та 2010 роках.

У межах цього дослідження ми проаналізували понад 50 математичних виразів для визначення ерозійної здатності опадів. Більшість з них не підходять для умов Львова, оскільки істотно відрізняються кліматичними параметрами, на підставі яких їх було розроблено. Інша проблема досліджень полягає у використанні різних одиниць вимірювання, зокрема тих, що використовують у США (U.S. custom units), таких як фут, дюйм, акр, кілограм-сила тощо. З огляду на це виникає необхідність переведення результатів обчислень у міжнародну систему вимірювань SI [8].

У роботі [4] наведено огляд близько 20 математичних виразів для визначення показника ерозійної здатності опадів R . Для Марокко використовували рівняння:

$$R_1 = (4,79 \cdot MFI - 142) \cdot 1,74, \text{ (Західна Африка [4])}; \quad (5)$$

$$MFI = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^{12} P_i^2, \quad (6)$$

де: p_i – місячна кількість опадів, мм; P – річна кількість опадів, мм; MFI (англ. *Modified Fournier's Index*) – модифікований індекс Фурньє; 1,74 – коефіцієнт, щоб перейти від (тонн·метр·см·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹) до (МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹).

Інші математичні вирази для визначення показників ерозійної здатності опадів R мають такий вигляд [4]:

$$R_8 = 0,07397 \cdot MFI^{1,847}, \text{ (Західне узбережжя США)}; \quad (7)$$

$$R_{10} = 38,5 + 0,35 \cdot P, \text{ (Таїланд)}; \quad (8)$$

$$R_{13} = 81,5 + 0,38 \cdot P, \text{ (Індія)}; \quad (9)$$

$$R_{14} = 0,1215 \cdot MFI^{2,2421}, \text{ (Туреччина)}; \quad (10)$$

$$R_{16} = 0,548257 \cdot P - 59,9, \text{ (В'єтнам, Казахстан [7, 35])}; \quad (11)$$

$$R_{19} = 0,41 \cdot P^{1,09}, \text{ (Індонезія [26])}; \quad (12)$$

$$R_{32} = 0,83 \cdot P - 17,7, \text{ (Німеччина, Україна [13, 35])}; \quad (13)$$

$$R_{37} = 1,1 \cdot P, \text{ (Італія [37])}; \quad (14)$$

$$R_{38} = 0,788 \cdot P - 28,2, \text{ (Німеччина [36])}; \quad (15)$$

$$R_{39} = -14,8 + 14,8 \cdot N_s, \text{ (Німеччина [37])}; \quad (16)$$

$$R_{40} = -8,12 + 0,562 \cdot P, \text{ (Індонезія [10]);} \quad (16)$$

$$R_{41} = 21,56 \cdot MFI^{0,927}, \text{ (Іспанія [1]);} \quad (17)$$

$$R_{42} = 0,45936 \cdot MFI^{1,5} \text{ (Марокко [25]);} \quad (18)$$

$$R_{49} = Pr^{1,0565} / (0,5209 + z^{0,0053}), \text{ (Польща [15]);} \quad (19)$$

$$R_{50} = 1,735 \cdot \sum_{i=1}^{12} 10^{(1,5 \cdot \log_{10}(P_i^2/P) - 0,08188)}, \text{ (Індія [17, 31, 34]);} \quad (20)$$

$$R_{51} = 105 + 0,58 \cdot P, \text{ (Словаччина [2]);} \quad (21)$$

$$R_{52} = 0,68 \cdot P, \text{ (Словаччина [2]);} \quad (22)$$

$$R_{53} = 42,793 + 0,679 \cdot P, \text{ (Словаччина [2]),} \quad (21)$$

де: 10 – коефіцієнт, щоб перевести ерозійність опадів, наведену тут в $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$, у $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$; 1,74 – коефіцієнт, щоб перейти від одиниць виміру США (тонн-метр-см-га⁻¹-год⁻¹-рік⁻¹) до Міжнародної системи одиниць SI (МДж-мм-га⁻¹-год⁻¹-рік⁻¹); N_s – середня місячна кількість опадів за період травень-жовтень, мм; Pr – річна кількість опадів, мм; z – висота н.р.м., м.

Табл. 2. Місячні та річні суми опадів у Львові / Monthly and annual precipitation amounts in Lviv

Рік	Місячна кількість опадів, мм												Сума, мм
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1990	16	41	42	87	89	44	104	64	101	46	42	44	718
1991	23	36	5	38	169	66	82	104	61	78	42	43	748
1992	32	39	24	67	94	80	74	45	147	94	112	28	837
1993	33	39	61	28	45	83	177	69	58	36	23	41	692
1994	39	34	49	25	57	48	22	94	58	111	47	64	647
1995	29	65	27	70	79	57	10	40	77	24	70	36	582
1996	27	69	35	23	92	79	73	63	147	46	39	49	740
1997	13	35	26	70	132	55	145	79	47	65	65	66	798
1998	41	31	51	105	65	168	207	65	56	84	60	39	971
1999	27	100	12	92	27	71	52	82	47	38	75	61	685
2000	61	39	77	63	66	70	131	21	42	6	17	39	633
2001	86	51	108	73	55	157	137	79	113	25	70	42	997
2002	35	27	40	41	91	114	46	26	83	79	24	34	639
2003	47	40	20	31	104	54	118	26	39	88	37	27	631
2004	42	75	49	31	85	33	159	170	42	39	96	9	829
2005	71	39	54	80	89	84	87	80	30	26	27	55	722
2006	13	36	80	54	106	121	110	149	12	34	65	16	798
2007	69	69	61	25	88	54	117	70	112	37	80	27	810
2008	44	19	55	94	100	51	127	114	143	36	29	60	872
2009	36	57	98	52	83	133	56	91	29	144	53	59	892
2010	54	60	31	38	219	97	80	125	65	23	42	94	930
2011	56	45	21	46	43	68	188	58	18	23	1	64	631
2012	61	58	30	56	70	91	61	77	41	51	27	54	678
2013	76	50	141	46	117	141	47	40	84	17	38	14	812
2014	67	35	43	51	142	77	80	99	51	59	12	59	775
2015	44	19	55	38	93	48	84	1	99	49	87	29	646
2016	54	42	37	66	69	116	47	33	39	178	109	76	867
2017	28	48	35	49	81	31	75	41	138	61	64	108	759
2018	22	61	48	24	41	153	124	78	76	66	33	83	810
2019	63	23	25	37	161	41	74	102	50	29	43	52	701
2020	33	81	36	7	132	140	81	39	101	52	17	56	777
2021	50	118	51	39	51	94	47	128	106	7	35	95	821
2022	64	26	19	71	23	44	88	68	136	38	33	84	692
2023	49	64	68	65	29	108	120	65	59	66	70	72	832
2024	75	50	79	53	8	96	76	74	90	45	27	43	715
Y_{mean}	45	49	48	52	86	85	94	73	74	54	49	52	762
Y_{10max}	49	56	57	63	85	104	105	91	80	70	68	57	885

Умовні позначення: Y_{mean} – середні значення кількості опадів, мм; Y_{10max} – середні максимальні значення кількості опадів за 10 років, мм; I-XII – порядкові номери місяців.

Згідно з формулами, значення ерозійної здатності опадів залежать від річної кількості опадів P та модифікованого індексу Фурньє MFI (табл. 3). Ця залежність є лінійною або близькою до лінійної (коефіцієнти кореляції змінюються в межах від 0,81 до 1,00). Найменші значення ерозійної здатності опадів спостережено в 1995 р., коли були мінімальні значення річної кількості опадів у Львові (582 мм) та модифікованого індексу Фурньє (59 мм). Найвищі значення ерозійної здатності опадів характерні для років із великою кількістю опадів (2001 р. – 997 мм; 1998 р. – 971 мм; 2010 р. – 930 мм).

Із великої кількості показників нам потрібно вибрати той, який найточніше відображає особливості ерозійної здатності опадів на території Львова. Це досить складне завдання, оскільки в літературних джерелах ба-

гато невідповідностей. Так, середнє значення ерозійності опадів для 28 країн ЄС і Швейцарії становило 722 МДж-мм-га⁻¹-год⁻¹-рік⁻¹ [21].

У Румунії цей показник змінюється в межах від 462 до 1150 МДж-мм-га⁻¹-год⁻¹-рік⁻¹, з середнім значенням 785 [23]. Істотна мінливість ерозійності характерна для території Польщі [15] – в діапазоні від 500 МДж-мм-га⁻¹-год⁻¹-рік⁻¹ у центральній рівнинній частині до понад 1000 МДж-мм-га⁻¹-год⁻¹-рік⁻¹ – у південних гірських районах. У Словаччині [20] середнє значення ерозійності опадів становить 711 МДж-мм-га⁻¹-год⁻¹-рік⁻¹, а діапазон значень – від 348 (Габчикова) до 1380 МДж-мм-га⁻¹-год⁻¹-рік⁻¹ (Татранська Яворина).

Табл. 3. Результати обчислень ерозійної здатності опадів для Львова /
Results of calculations of the rainfall erosivity for the city of Lviv

Рік	P, мм	Ерозійна здатність опадів R, МДж·мм·га ⁻¹ ·год ⁻¹ ·рік ⁻¹														
		R ₁	R ₈	R ₁₀	R ₁₃	R ₁₆	R ₁₉	R ₃₂	R ₃₇	R ₃₈	R ₃₉	R ₄₀	R ₄₁	R ₄₂	R ₄₉	R ₅₀
1990	718	353	199	290	354	334	532	578	790	538	1087	395	1136	281	671	310
1991	748	502	301	300	366	350	556	603	823	561	1367	412	1396	392	701	541
1992	837	492	293	331	399	399	629	677	920	631	1304	462	1378	383	788	375
1993	692	462	271	281	344	319	511	556	761	517	1137	381	1325	360	645	569
1994	647	300	168	265	327	295	475	519	712	482	947	355	1043	244	601	284
1995	582	245	138	242	303	259	423	465	640	430	691	319	945	208	537	197
1996	740	413	238	297	363	346	550	596	814	555	1215	408	1241	324	692	406
1997	798	482	286	318	385	378	597	645	878	601	1277	440	1362	376	750	453
1998	971	706	468	378	450	472	739	788	1068	737	1577	537	1744	561	922	781
1999	685	333	187	278	342	316	506	551	754	512	766	377	1100	267	638	263
2000	633	356	201	260	322	287	464	507	696	470	815	347	1141	283	587	385
2001	997	587	366	387	460	486	761	809	1096	757	1380	552	1542	460	949	534
2002	639	329	185	262	324	291	469	513	703	475	1069	351	1093	264	593	329
2003	631	346	195	259	321	286	462	506	694	469	1043	346	1124	276	585	365
2004	829	615	389	329	397	395	622	670	912	625	1286	458	1589	483	781	626
2005	722	332	187	291	356	336	535	582	794	541	963	398	1099	266	675	305
2006	798	558	343	318	385	377	597	644	877	600	1299	440	1491	436	750	536
2007	810	414	238	322	389	384	606	654	891	610	1166	447	1243	325	762	342
2008	872	536	326	344	413	418	658	706	959	659	1391	482	1454	418	824	502
2009	892	508	305	351	420	429	674	722	981	674	1308	493	1406	396	843	455
2010	930	686	450	364	435	450	705	754	1023	705	1490	515	1710	544	882	796
2011	631	515	310	259	321	286	462	506	694	469	967	346	1418	402	585	729
2012	678	269	151	276	339	312	500	545	745	506	950	373	988	224	631	244
2013	812	539	328	323	390	385	608	656	893	611	1085	448	1459	421	763	563
2014	775	422	244	310	376	365	578	626	852	582	1240	427	1257	331	727	415
2015	646	337	190	265	327	294	474	518	710	481	908	355	1108	270	600	262
2016	867	550	337	342	411	416	654	702	954	655	1175	479	1478	430	819	502
2017	759	413	238	304	370	356	565	612	834	570	1038	418	1241	324	711	378
2018	810	492	293	322	389	384	607	655	891	610	1313	447	1378	384	762	481
2019	701	443	258	284	348	324	518	564	771	524	1115	386	1292	346	654	511
2020	777	512	308	310	377	366	580	627	855	584	1333	429	1413	399	729	510
2021	821	486	289	326	394	390	616	664	904	619	1054	454	1368	379	773	447
2022	692	389	222	281	344	319	511	557	761	517	962	381	1199	306	645	405
2023	832	394	225	330	398	396	625	673	915	627	1084	460	1208	310	784	312
2024	715	341	192	289	353	332	530	576	787	535	943	394	1114	272	668	320
Y _{mean}	762	320	180	305	371	358	568	615	839	573	1136	420	1078	258	715	255
Y _{10max}	885	405	233	348	418	425	668	717	973	669	1305	489	1228	318	836	303

Для європейської частини Росії та України (велика територія до Уральських гір) наводять усереднені показники 422 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹, а для Білорусі – 365 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹, які мають низькі значення порівняно з іншими європейськими країнами [22]. Цілком очевидно, що західна частина України, де випадає велика кількість опадів, має більші показники ерозійності. На карті Європи з високою роздільною здатністю прикордонні райони з Львівщиною характеризуються ерозійністю на межі двох діапазонів: 610...730 і 730...900 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹ [21] (рис. 1). Просторовий розподіл середньорічної ерозійності опадів на території Польщі (рис. 2) дає підстави оцінювати її величину для Львова в діапазоні 701...800 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹. З огляду на це для обчислень ерозійності опадів в умовах Львова ми використовували формулу R₄₉ (19). За цією формулою середнє значення ерозійної здатності опадів становить 715 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹, а середнє квадратичне відхилення – 101 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹. Мінімальне значення ерозійності опадів 537 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹ зафіксовано в посушливому 1995 р., а максимальне – 949 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹ – у 2001 році.

Оскільки велику кількість формул для обчислення показників ерозійності наведено лінійними або степеневими функціями, для показника R₄₉ (19) ми додатково обчислили апроксимуючі функції:

$$R_{54/49} = -40,762 + 0,991 \cdot P, R^2 = 0,999; \quad (22)$$

$$R_{55/49} = 0,938 \cdot P, R^2 = 0,997; \quad (23)$$

$$R_{56/49} = 0,6443 \cdot P^{1,0565}, R^2 = 0,999; \quad (24)$$

$$R_{57/49} = 205,68 + 6,11 \cdot MFI, R^2 = 0,664; \quad (25)$$

$$R_{58/49} = 30,43385 \cdot MFI^{0,71436}, R^2 = 0,664, \quad (26)$$

де R² – коефіцієнт детермінації.

Дослідження ерозійної здатності опадів у західній частині України наведено в роботах [13, 14, 16, 19]. Їх виконано на підставі показників R₃₂ і R₅₀. Середнє значення ерозійності опадів за формулою R₃₂ (13) становить 615 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹, середнє квадратичне відхилення – 85, а діапазон значень у часовому проміжку 1990-2024 рр. – 465...809 МДж·мм·га⁻¹·год⁻¹·рік⁻¹ (табл. 3). Оскільки коефіцієнт R₃₂ становить лінійну функцію річної кількості опадів, його мінімальне значення припадає на посушливий 1995 р., а максимальне – на вологий 2001 рік. Враховуючи просторовий розподіл показника ерозійності опадів на прикордонних територіях ЄС (рис. 1 і 2), можна зробити висновок, що показник R₃₂ дає дещо занижені результати.

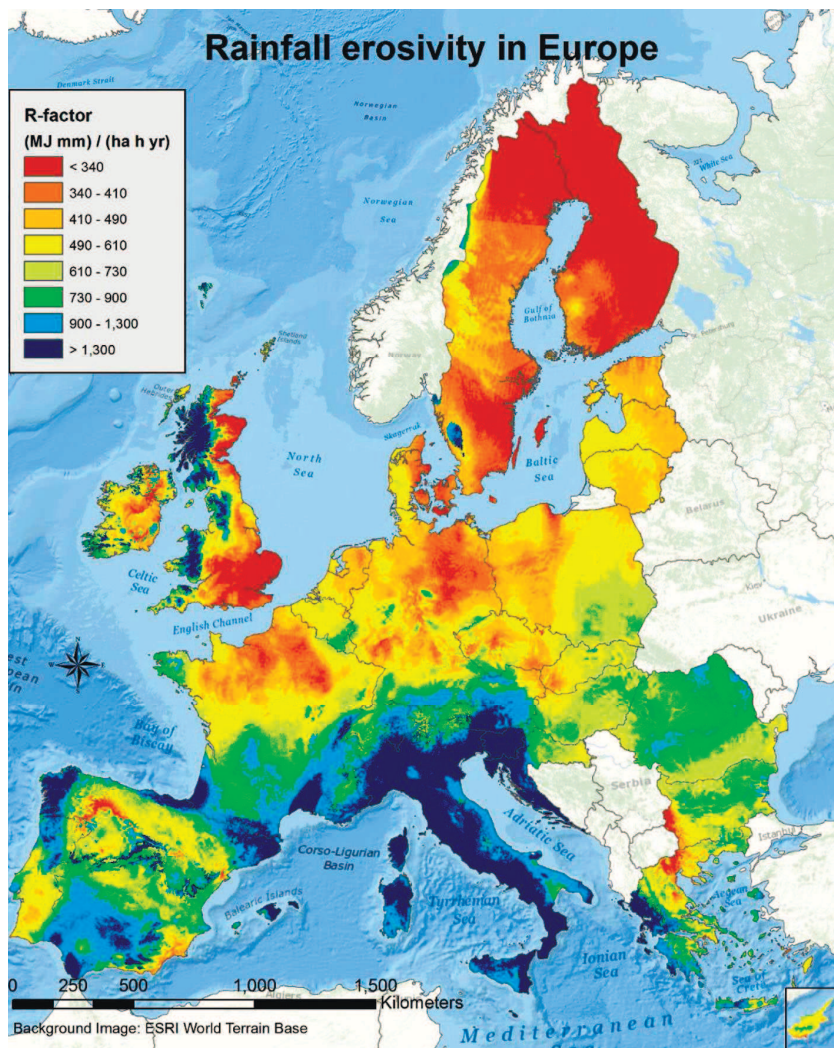


Рис. 1. Карта ерозійної здатності опадів в Європі / Map of rainfall erosivity in Europe [21]

Показник ерозійності опадів R_{50} становить степеневу функцію відношення квадрата місячної кількості опадів до річної суми опадів. Цей показник дуже чутливий до аномальних значень місячних опадів. З огляду на це роки з близькими значеннями річної кількості опадів можуть істотно відрізнятися ерозійністю опадів. Цей факт особливо помітний, коли в році спостерігають рівномірний розподіл кількості опадів за місяцями, або коли розрахунки виконують для середніх значень. Середнє значення ерозійності опадів за формулою R_{50} (20) становить $441 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$, середнє квадратичне відхилення – 147, а діапазон значень у часовому проміжку 1990-2024 роки – $197 \dots 796 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ (табл. 3). З огляду на це ми не рекомендуємо використовувати показник R_{50} для визначення ерозійності опадів на території України.

Оцінювання подібності показників ерозійності опадів ми здійснювали на підставі кластерного аналізу. Як міру відмінностей використовували відстань Евкліда. Головним підсумком ієрархічного кластерного аналізу є дендрограма. Найбільша подібність до показника ерозійності R_{49} , який було розроблено для умов Польщі, характерна для показників R_{32} (Німеччина, відстань Евкліда $D_E = 599$), R_{37} (Італія, $D_E = 734$), R_{38} (Німеччина, $D_E = 852$), R_{19} (Індонезія, $D_E = 874$), R_{53} (Словаччина, $D_E = 933$); для R_{50} (Індія) відстань Евкліда $D_E = 1773$. Найбільшу подібність до показника ерозійності R_{50} ма-

ють показники R_1 (Західна Африка, відстань Евкліда $D_E = 373$), R_5 (Північний Захід США, $D_E = 639$), R_{42} (Марокко, $D_E = 687$), R_{40} (Індонезія, $D_E = 734$), які побудовані на підставі модифікованого індексу Фурньє MFI (формула 6).

Обговорення результатів дослідження. Результати аналізу літературних джерел [11, 12, 14, 17, 21, 28, 29, 34, 36] підтверджують той факт, що у багатьох країнах світу водна ерозія ґрунту набула такого масштабного поширення, що її негативні наслідки мають економічну та екологічну проблему. Вирішення проблеми водної ерозії ґрунтів і, як наслідок, стійкого збалансованого розвитку, неможливе без її адекватної моделі, методики розрахунку і прогнозу інтенсивності ерозійних втрат [18].

Для оцінювання інтенсивності водної ерозії зазвичай використовують універсальне рівняння втрат ґрунту USLE та його доповнений варіант RUSLE [2, 4, 5, 7, 10, 25, 26, 35, 38, 40]. Щодо цієї особливості, то надзвичайно цінною є наукова робота [4], в якій аналізують, як різні дослідження в усьому світі адаптували рівняння до місцевих умов. Завдяки всебічному аналізу чинників ерозії на підставі математичних рівнянь ця робота може слугувати довідником для інших дослідників, які працюють з (R) USLE та подібними підходами.

Рекомендації [4, 38, 39] щодо застосування моделей (R) USLE дають змогу дослідникам більш надійно прогнозувати інтенсивність ерозійних процесів у

різноманітних геокліматичних регіонах із різною доступністю даних, а також моделювати різні сценарії ґрунтового покриття в більш детальних просторових і часових масштабах. У роботі [40] наведено результати дослідження ерозійних процесів на території провінції Хебей (Китай), для якої характерний помірно континентальний мусонний клімат з річною кількістю опадів 402-882 мм. Результати моделювання показали, що R-фактор ерозійної здатності опадів був одним із найважливіших чинників регіональних відмінностей середнього модуля ерозії ($R = 1778 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$). Відповідно до особливостей проблеми автори запропонували модель управління запобіганням ерозії ґрунтів, що базується на результатах прогнозування інтенсивності та причин втрат ґрунтів.

Іншу значущість факторів, від яких залежить інтенсивність ерозії, отримано на підставі досліджень у центральній частині Алжиру, де середня річна кількість опадів становить всього 140-220 мм [5]. Для ерозійної здатності опадів у цьому регіоні характерні низькі значення ($R = 15\text{-}35 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$), тому визначальним чинником інтенсивності втрат ґрунту є рослинний покрив. На підставі математичного моделювання було охарактеризовано просторово-часові зміни інтенсивності ерозії ґрунту, завдяки чому було запропоновано точну модель управління ерозією. Ця модель охоплює оцінювання, ідентифікацію та аналіз причин

усього процесу запобігання ерозії ґрунту, дає змогу швидко визначити локальні проблеми та запропонувати цільові заходи з контролю та зменшення негативних наслідків.

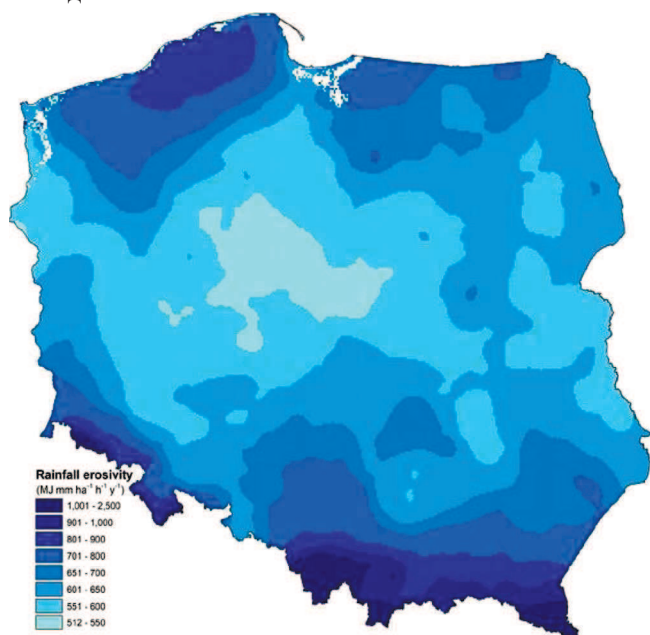


Рис. 2. Просторовий розподіл середньорічної ерозійності опадів на території Польщі / Spatial distribution of average annual rainfall erosivity on the territory of Poland [15]

Геоінформаційне моделювання розвитку ерозійних процесів у Шумському районі Тернопільської області є одним із яскравих прикладів використання моделі RUSLE для західної частини України [13]. Унаслідок проведення досліджень визначено потенційні втрати ґрунту через ерозію та відображено основні фактори, що вплинули на них. Найвищі значення потенційних втрат ґрунту просторово пов'язані з землями, які не покриті рослинністю, з ріллею, з просапними культурами та з крутими схилами, приуроченими переважно до берегів річок і балок. Для визначення фактора ерозійності опадів авторка використала рівняння німецьких учених Schwertmann та ін. [27]. Моделювання ерозійних процесів за допомогою рівняння RUSLE для Шумського району з інтеграцією методів дистанційного зондування та ГІС дало змогу виявити ерозійно небезпечні райони та укласти карту ерозійної небезпеки. Її використання допоможе проектним організаціям розробити та реалізувати комплекс протиерозійних заходів.

Результати дослідження та математичного моделювання фактору ерозійності опадів у Волинській області наведено у роботі [16]. Для визначення фактору ерозійності опадів автори використали рівняння американських учених Wischmeier W. H. і Smith D. D. [39], яке базується на розподілі місячних сум опадів. Фактор ерозійності опадів (R) у 2002–2009 рр. змінювався в широкому діапазоні – $178\text{--}734 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{рік}^{-1}$. На думку авторів, загальна кількість опадів, а також їх часовий розподіл як маркер співвідношення фактору інтенсифікації ерозійних процесів і захисних механізмів рослинного покриву є домінуючими для загальних втрат ґрунту внаслідок ерозії. Збіг часу інтенсивних опадів влітку та наявності рослинного покриву зменшує ерозію. Проте продовження інтенсивних опадів на початку збирання врожаю може спричинити посилення водної ерозії ґрунту.

Загалом проведені дослідження та аналіз літературних джерел свідчать про вагомий роль опадів в оцінюванні інтенсивності ерозії ґрунту.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – набула подальшого розвитку методика аналізу закономірності впливу кліматичних чинників на ерозійні процеси у паркових і лісопаркових насадженнях міста, яка, на відміну від наявних методик, дає змогу виконати обґрунтоване кількісне оцінювання цього явища та забезпечує своєчасне впровадження протиерозійних заходів.

Практична значущість результатів дослідження – отримані результати кількісного оцінювання ерозійної здатності опадів можна використати для визначення потенційної інтенсивності ерозійних процесів в умовах паркових і лісопаркових насаджень Львова, що дасть змогу впровадити систему протиерозійних фітотеліоративних та інженерних заходів.

Висновки / Conclusions

Проаналізовано загальні закономірності впливу кліматичних чинників на ерозійні процеси у паркових і лісопаркових насадженнях Львова, що забезпечить своєчасне впровадження протиерозійних заходів. За результатами досліджень можна зробити такі основні висновки.

1. З'ясовано, що з кінця XX ст. за кордоном для оцінювання та математико-картографічного моделювання потенційних втрат ґрунту внаслідок водної ерозії широко використовують різноманітні моделі, зокрема USLE (англ. *Universal Soil Loss Equation*), RUSLE (англ. *Revised USLE*), MUSLE (англ. *Modified USLE*) та інші.
2. Встановлено, що для розрахунку коефіцієнта ерозійної здатності опадів (R -фактор) – одного з параметрів універсального рівняння втрат ґрунту – розроблено багато формул, які здебільшого представлені лінійною, степеневою або експоненціальними функціями, що як аргумент використовують місячні та річні суми опадів.
3. Досліджено, що у Львові в середньому випадає 760 мм опадів за рік, більша частина яких припадає на період з травня по вересень. З'ясовано, що мінімальну річну кількість опадів (582 мм) спостережено в посушливий 1995 р., коли в липні випало всього 10 мм опадів, а понад 900 мм опадів було зафіксовано в 1998, 2001 та 2010 роках.
3. Проаналізовано понад 50 математичних виразів для визначення ерозійної здатності опадів. Встановлено, що більшість з них не підходять для умов Львова, оскільки істотно відрізняються кліматичними параметрами, на підставі яких їх було розроблено. Проаналізовано просторовий розподіл значень ерозійної здатності опадів на території Польщі та ЄС, на підставі якого для обчислень ерозійності опадів підбрано формулу Марцинковського, яку було розроблено на підставі кліматичних параметрів Польщі.
4. Встановлено, що середнє значення ерозійної здатності опадів в умовах Львова становить $715 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{рік}^{-1}$, середнє квадратичне відхилення – $101 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{рік}^{-1}$, мінімальне значення – $537 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{рік}^{-1}$ (1995 р.), а максимальне значення – $949 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{рік}^{-1}$ (2001 р.).
5. Запропоновано 5 апроксимуючих функцій для обчислення ерозійної здатності опадів в умовах Львова з метою порівняльного оцінювання параметрів лінійних і степневих функцій. Встановлено, що функції на під-

ставі модифікованого індексу Фурньє *MFI* мають меншу точність апроксимації.

References

1. Angulo-Martínez, M., & Beguería, S. (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1), 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.051>
2. Antal, J., Maderkova, L., Cimo, J., & Drgonova, K. (2015). Analyses of calculation methods for determination of rain erosivity for Slovak Republic. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumietus*, 14(4), 5–14. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2015.14.4.5>
3. Balyuk, S. A., Medvedev, V. V., Tararik, O. G., et al. (2010). National report on the state of soil fertility in Ukraine. Kyiv: Ministry of Agrarian Policy, 111 p. URL: <https://t1p.de/eyaka>
4. Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
5. Boussadia-Omari, L., Ouillon, S., Hirche, A., et al. (2021). Contribution of phytoecological data to spatialize soil erosion: Application of the RUSLE model in the Algerian atlas. *International Soil and Water Conservation Research*, 9, 502–519. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.05.004>
6. Costea, A., Bilasco, S., Irimus, I.-A., et al. (2022). Evaluation of the Risk Induced by Soil Erosion on Land Use. Case Study: Guruslău Depression. *Sustainability*, 14, article ID 652. <https://doi.org/10.3390/su14020652>
7. Dung, B. X., & Quang, D. V. (2017). Applying Universal Soil Loss Equation (USLE) to estimating soil erosion at Lamson headwater catchment. *Journal of Forestry Science and Technology*, 2017(5), 61–73. URL: <https://t1p.de/47pzj>
8. Foster, G. R., McCool, D. K., Renard, K. G., & Moldenhauer, W. C. (1981). Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(6), 355–359 p. URL: <https://t1p.de/qo0pe>
9. GOST 17.4.4.03-86. Nature protection. Soils. Method for determination of potential danger of erosion due to rains. Moscow: Standartinform, 2008, 8 p. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/29045/>
10. Hidayatulloh, A. M., & Agusta, R. P. (2022). Soil erosion estimation using RUSLE method. *Indonesia post-pandemic outlook: Environment and technology role for Indonesia development*, 69–80. Jakarta: BRIN Publishing. <https://doi.org/10.55981/brin.538.c507>
11. Hugo, V., Zuazo, D., Rocio, C., & Pleguezuelo, R. (2008). Soil erosion and runoff prevention by plant covers. *A review. Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 65–86. <https://doi.org/10.1051/agro/2007062>
12. Khokhryakova, A. I., & Mykhailiuk, V. I. (2021). Soils of the city of Odessa: monograph. Odesa: Publishing house "Helvetica", 146. <https://t1p.de/50e5x>
13. Lukianchuk, K. A. (2019). Geoinformation modeling of the growth of erosion processes in the Middle Podolian Upland Region (Shumsky district of Ternopilshchyna). *Chasopys kartografii*, 1(20), 50–68. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2019_1_6
14. Lukianchuk, K. A. (2020). Geoinformation modeling of development of erosion processes at local and regional levels. The thesis for the degree of the candidate of geographical sciences in the specialty 11.00.01 Physical Geography, Geophysics and Geochemistry of the Landscape. Kyiv National Taras Shevchenko University, 22 p. URL: <https://t1p.de/ipboy>
15. Marcinkowski, P., & Bagdasaryan, V. (2024). Monthly and annual rainfall erosivity in Poland: An empirical model including winter snowfall effect. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, article ID 102076. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102076>
16. Matviichuk, B., Romantschuk, L., & Matviichuk, N. (2023). Rainfall Erosivity Factor within the Volyn Region. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(6), 135–146. <https://doi.org/10.12912/27197050/168091>
17. Mondal, A., Khare, D., & Kundu, S. (2016). Change in rainfall erosivity in the past and future due to climate change in the central part of India. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.004>
18. Mysko, K. A. (2015). Application of the study design soil erosion. *Physical geography and geomorphology*, 1(77), 38–43. URL: <https://t1p.de/7q9qx>
19. Mysko, K. A. (2016). Estimation of the impact of vegetation cover on the development of erosion in slope lands of Podolia. *Soil loss due to soil erosion can be estimated by using models such as Universal Soil Loss. Physical geography and geomorphology*, 2, 117–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/fiz_geo_2016_2_19
20. Onderka, M., & Pecho, J. (2019). Update of the erosive rain factor in Slovakia using data from the period 1961–2009. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 49(3), 355–371. <https://doi.org/10.2478/congeo-2019-0018>
21. Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., et al. (2015). Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, article ID 511, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
22. Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., et al. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 7, article ID 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
23. Patriche, C. V., Rosca, B., Pirnau, R. G., et al. (2023). Simulation of Rainfall Erosivity Dynamics in Romania under Climate Change Scenarios. *Sustainability*, 15, article ID 1469. <https://doi.org/10.3390/su15021469>
24. Popovych, V. V., Skrobala, V., Kopylov, V., & Kopystynskiy, Y. (2025). Heavy metals distribution in water and soil of the coastal zone of the Styr River (Ukraine) and its tributaries. *Journal of Ecological Engineering*, 26(2), 1–14. <https://doi.org/10.12911/22998993/196042>
25. Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
26. Saptari, A. Y., Supriadi, A., Wikantika, K., & Darmawan, S. (2015). Remote Sensing Analysis In RUSLE Erosion Estimation. *Indonesian Journal of Geospatial*, 4(1), 34–45. URL: <https://t1p.de/wpd0n>
27. Schwertmann, U., Vogl, W., & Kainz, M. (1990). Bodenerosion durch Wasser – Vorhersagen des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 64.
28. Seifollahi-Aghmiuni, S., Kalantari, Z., Egidi, G., Gaburova, L., Salvati, L., et al. (2022). Urbanisation-driven land degradation and socioeconomic challenges in peri-urban areas: Insights from Southern Europe. *Ambio*, 51, 1446–1458. <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01701-7>
29. Shikangalah, N., Jeltsch, F., Blaum, N., et al. (2016). A review on urban soil water erosion. *Journal for Studies in Humanities and Social Sciences*, 5(1), 163–178. URL: <https://t1p.de/zju1y>
30. Shikangalah, R., Paton, E., Jeltsch, F., & Blaum, N. (2017). Quantification of areal extent of soil erosion in dryland urban areas: an example from Windhoek, Namibia. *Cities and the Environment (CATE)*, 10(1), article ID 8. URL: <https://digitalcommons.lmu.edu/cate/vol10/iss1/8>
31. Singh, J., & Singh, O. (2020). Assessing rainfall erosivity and erosivity density over a western Himalayan catchment, India. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1362-8>
32. Skrobala, V. M., Dulyba, O. S., Kaspruk, O. I., et al. (2024). Anthropogenic transformation of ecological conditions of park and forest-park plantations of Lviv city. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(5), 16–22. <https://doi.org/10.36930/40350502>
33. Skrobala, V. M., Popovych, V. V., Bosak, P. V., & Shuplat, T. I. (2022). Prediction of changes in the vegetation cover of Ukraine due to climate warming. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 96–105. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/096>

34. Supriyono, S., Utaya, S., Taryana, D., & Handoyo, B. (2021). Spatial-Temporal Trend Analysis of Rainfall Erosivity and Erosivity Density of Tropical Area in Air Bengkulu Watershed Indonesia. *Quaestiones Geographicae*, 40(3), 125–142. <https://doi.org/10.2478/quageo-2021-0028>
35. Toxanbayeva, S. T., Ramazanova, N. E., & Tusupbekov, Zh. A. (2021). Estimation of soil erosion by the "Rusle" model of the Nura river basin. *Journal of Geography and Environmental Management*, 2(61), 108–119. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2021.v61.i2.10>
36. Uber, M., Haller, M., Brendel, Ch., Hillebrand, G., & Hoffmann, T. (2024). Past, present and future rainfall erosivity in central Europe based on convection-permitting climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28, 87–102. <https://doi.org/10.5194/hess-28-87-2024>
37. Van der Knijff, J. M., Jones, R., & Montanarella, L. (2000). European Commission Soil Erosion Risk Assessment in Europe, 38 p. URL: https://www.unisdr.org/files/1581_ereumew2.pdf
38. Wall, G. J., Coote, D. R., Pringle, E. A., & Shelton, I. J. (Eds). (2002). RUSLEFAC – Revised Universal Soil Loss Equation for Application in Canada: A Handbook for Estimating Soil Loss from Water Erosion in Canada. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. Contribution No. AAFC/AAC2244E, 117 p. URL: <https://t1p.de/2eux4>
39. Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning; Washington DC: United States Department of Agriculture: USA, Agriculture Handbook, 537, 58 p. URL: <https://t1p.de/12kvn>
40. Xiaoping, Yan, Leixiang, Wu, Jun, Xie, et al. (2022). Dynamic Changes and Precision Governance of Soil Erosion in Chengde City Using the GIS Techniques and RUSLE Model. *Nature Environment and Pollution Technology*, 21(3), 1027–1037. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2022.v21i03.009>
41. Zaslavsky, M. N. (1983). Erosion studies. Moscow: Higher school, 320 p. URL: <https://f.eruditor.link/file/1705401/>
42. Zaslavsky, M. N., Larionov, G. A., Dokudovskaya, O. G., & Tarabrin, N. P. (1981). Map of the erosion index of rainfall in the European territory of the USSR and the Caucasus. *Soil erosion and channel processes*, 8, 17–29. URL: <https://f.eruditor.link/file/2885200/>

V. M. Skrobala, O. S. Dulyba

Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

RAINFALL EROSIVITY AS A CLIMATIC FACTOR OF THE MANIFESTATION OF WATER EROSION OF SOIL COVER IN PARKS AND FOREST PARKS OF LVIV

The general approaches to modeling soil cover water erosion in soil science and hydrology using numerous equations, particularly RUSLE, have been analyzed. These approaches are based on the analysis of climatic conditions (erosive potential of precipitation), soil erodibility, terrain relief, vegetation cover, and reclamation measures. It is noted that the rainfall erosivity coefficient (R-factor) is a function of the kinetic energy and intensity of precipitation. The results of studies on rainfall erosivity based on pluviograms are presented using the P. Stanescu formula, which is based on the data about the maximum 15-minute rainfall intensity. It has been established that linear, power, or exponential mathematical equations are widely used to determine the erosive potential of precipitation, using monthly and annual precipitation amounts as the argument. Based on meteorological data from 1990 to 2024, more than 50 formulas have been applied to assess the erosive potential of precipitation in Lviv. It has been established that most mathematical expressions are unsuitable for the conditions in Lviv, as they were developed based on significantly different climatic parameters. The study found that Lviv receives an average annual precipitation of 760 mm, with the majority occurring between May and September. The minimum annual precipitation of 582 mm was recorded in the dry year of 1995 when only 10 mm of rainfall fell in July. More than 900 mm of precipitation was recorded in 1998, 2001, and 2010. A formula was selected to determine the erosive potential of precipitation in Lviv based on the spatial distribution of this indicator across Poland and the EU. The Marcinkowski formula, a development of which was based on Poland's climatic parameters, was applied. It has been established that the average rainfall erosivity in Lviv is $715 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$, with a standard deviation of $101 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$. The minimum rainfall erosivity value of $537 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ was observed in the dry year of 1995, while the maximum value of $949 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ was recorded in 2001. Additionally, five approximating functions have been proposed for calculating the erosive potential of precipitation in Lviv to enable a comparative assessment of the parameters of linear and power functions. It has been revealed that functions based on the Modified Fournier Index (MFI) exhibit lower approximation accuracy.

Keywords: soil water erosion; Revised Universal Soil Loss Equation; rainfall erosivity; R-factor; Modified Fournier Index.