

УДК 631.459:551.585.55(251.1)(477.7)

Кліматичний фактор вітрової ерозії ґрунту в Степу України: просторовий аналіз

С. Г. Чорний

Чорноморський національний університет ім. П. Могили, Миколаїв, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 15.11.2024 Отримано після доопрацювання 16.12.2024 Затверджено до видання 18.12.2024 Доступно онлайн 27.12.2024	У статті представлено результати дослідження просторового розподілу кліматичного параметра вітрової ерозії ґрунту по всій території Степу України. Вітрова ерозія в степовій зоні України, реалізація якої залежить від низки природних та антропогенних факторів, значною мірою визначається кліматичними умовами, такими як швидкість та постійність вітру, а також температура повітря, кількість опадів і величина випаровування, що в сукупності формують водний баланс ґрунту. Вологі поверхні ґрунту достатньо стійкі, щоб протистояти сильному вітру, проте навіть невеликий сухий поверхневий шар може стати причиною початку вітрової ерозії. Для просторового аналізу небезпеки вітрової ерозії, застосовували кліматичний фактор (C) із математичної моделі Wind Erosion Equation (WEQ), який використовується для оцінки середніх багаторічних втрат ґрунту вітром. Для цього використовували дані спостережень за швидкістю вітру, температурою повітря та опадами, зібрані на метеорологічних станціях у зоні Степу України, а також узагальнені дані щодо середньорічної швидкості вітру, місячних опадів і температур. Оцінку кліматичного параметра вітрової ерозії проведено на основі даних 33 метеорологічних станцій в Україні, а також на прилеглих територіях Молдови та РФ. Розрахунки та картування кліматичного фактора за допомогою моделі WEQ показали, що його значення залежать від просторового розподілу його складових — середньої швидкості вітру та індексу «ефективних опадів» Торнтвейта. У північному Степу України, де значення індексу «ефективних опадів» максимальне, а швидкість вітру стабільна, в межах 3–5 м/с, кліматичний фактор вітрової ерозії є мінімальним (менше 10). У приморських регіонах Одеської, Миколаївської та Херсонської областей та степовому Криму, де індекс «ефективних опадів» максимальний (30–45), а середня багаторічна швидкість вітру сягає 6 м/с і більше, показник C коливається в межах 25–35. Найбільш небезпечними щодо вітрової ерозії є райони з дерновими піщаними та глинисто-піщаними ґрунтами та піщаними субстратами у пониззі Дніпра (Олешківські піски), де стійкість ґрунтів до дефляції найнижча на фоні високих значень кліматичного фактора C. Ці території є найбільш вразливими до вітрової ерозії у всьому українському Степу.

* E-mail: s.g.chornyy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9764-677X

Форма цитування: Чорний С. Г. Кліматичний фактор вітрової ерозії ґрунту в Степу України: просторовий аналіз. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. темат. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2024. Вип. 97. С. 25–30. doi: 10.31073/acss97-03

1. Вступ

Вітрова ерозія відбувається на багатьох посушливих та напівпосушливих територіях по всьому Світу, і на її інтенсивність впливають ґрунтові, рослинні та кліматичні фактори, а також діяльність людини. Вітрова ерозія (або дефляція) — це процес відриву та переміщення часточок ґрунту під дією вітру. Вона починається в той момент, коли тиск вітру на ґрунтові окремість переважає силу тяжіння. Вітер переміщує більш-менш великі ґрунтові агрегати вздовж поверхні ґрунту серією стрибків (процес, який має назву «сальтація»), рухає ґрунтові частки по поверхні (так званий, «кріп»), а також виносить у високі шари атмосфери найбільш дрібні пилові окремість, які переміщуються повітряними потоками на сотні кілометрів. Часточки, які видуються з поверхні містять важливі елементи живлення, органічну речовину, що дозволяє відносити вітрову ерозію до провідних процесів, які ведуть до деградації родючості ґрунту.

Найбільш небезпечним є екстремальний прояв вітрової ерозії — пилові бурі, коли негодою охоплюються значні площі у сотні квадратних кілометрів. В Україні, за сучасними оцінками, площа земель з потенційною загрозою вітрової ерозії оцінюється приблизно у 20 млн га, у тому числі ріллі — 16–18 млн га [1].

Небезпека вітрової ерозії є функцією від стану поверхні ґрунту (наявність різного розміру, міцності та розташування борозн та гребнів відносно панівних напрямків вітрів), рослинного фактора (наявність достатньої кількості мульчі, ґрунтозахисної рослинності,

лінійних лісових насаджень, розташованих приблизно перпендикулярно панівним вітрам тощо), властивостей ґрунту (грудкуватість, вологість, наявність та міцність ґрунтової кірки). Але всі ці фактори вітрової ерозії можуть бути реалізовані лише за наявності сильного вітру, який постійно дме в одному напрямку.

Вітер є рушійною силою вітрової ерозії, якщо він перевищує задану порогову швидкість або швидкість тертя. Інші кліматичні фактори, які впливають на вітрову ерозію, це — температура, опади та величина випаровування. Вони визначають водний баланс ґрунту. Вологі поверхні досить стійкі, щоб протистояти силам вітру, а для початку вітрової ерозії достатньо наявності малопотужного сухого поверхневого шару ґрунту [2].

Кліматичний фактор вітрової ерозії був винайдений видатним американським вченим Чепілем зі співавторами [3] та застосований у математичній моделі Wind Erosion Equation (WEQ) для оцінки середніх багаторічних втрат ґрунту вітром. Він є однією з п'яти незалежних змінних цього рівняння, яке в канонічному та модифікованому варіантах широко використовується з початку 60-х років XX століття у США, Канаді, у європейських країнах, а також у Китаї та Монголії для розрахунку середніх багаторічних втрат ґрунту та планування ґрунтозахисних заходів [4, 5, 6, 7].

Згідно з WEQ втрати ґрунту (E , т/га за рік) є функцією від п'ятих параметрів [5, 8, 9]:

$$E = f(I, K, C, L, V), \quad (1)$$

де I — показник податливості ґрунту до дефляції, т/га за рік; K — показник шорсткості поверхні ґрунту; C — кліматичний параметр вітрової ерозії; L — величина незахищеної відстані, м; V — показник ґрунтозахисної ефективності рослинного покриву.

Метою цієї статті є висвітлення результатів дослідження кліматичного параметра вітрової ерозії ґрунту та його територіального розподілу для найбільш вітроерозійно-небезпечної частини України — Степу.

2. Матеріали та методи

Кліматичним параметром (C) враховується середня багаторічна швидкість вітру та вологість ґрунту. Його величина пропорційна кубу середньорічної швидкості вітру (v) та обернено пропорційна квадрату індексу «ефективних опадів» американського кліматолога Ч. Торнсвайта (PE). Цей параметр розраховується за формулою [5, 9]:

$$C = 386 \cdot v^3 / (PE)^2, \quad (2)$$

де 386 — константа, яка використовується для приведення місцевих значень до базового показника 100, що є значенням кліматичного фактора C за даними метеорологічної станції Гарден-сіті в штаті Канзас, США [5, 8].

Індекс Торнтвейта, розроблений для оцінки «ефективності опадів» і який опосередковано показує на вологість ґрунту, розраховується як [5, 8]:

$$PE = 3,16 \cdot \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{P_i}{(1,8 \cdot T_i + 22)} \right]^{\frac{10}{9}}, \quad (3)$$

де P_i — середні багаторічні опади кожного місяця року, мм; T_i — середні багаторічні температури кожного місяця року в градусах за Цельсієм.

Очевидно, що для розрахунку кліматичного параметра (C) необхідні стандартні дані спостережень за швидкістю вітру, температурами та опадами по метеорологічних станціях Степу України, або за вже розрахованими узагальненнями — середніми багаторічними величинами швидкості вітру та середніми багаторічними місячними значеннями опадів та температур. Для оцінки кліматичного параметра вітрової ерозії нами були використані саме такі узагальнення за даними з 33 метеорологічних станцій Степу України, а також прилеглих територій Молдови та РФ, які були опубліковані на сайтах Weatherbase (<https://www.weatherbase.com>), Meteoblue (<https://www.meteoblue.com>) та у «Методичних вказівках» [10].

3. Результати та обговорення

Отже було зроблено розрахунки показника C для низки метеорологічних станцій за формулою (2) та побудовано карту просторового розподілу кліматичного фактора вітрової ерозії по території Степу України (Рис. 1).

Що стосується середніх річних значень швидкості вітру, то для більшості метеостанцій регіону вони коливаються в межах 3,0–4,5 м/с. Винятком є деякі приморські метеорологічні станції, де швидкість вітру більше ніж 5 м/с. Це такі метеорологічні станції — Генічеськ — 5,2, Маріуполь — 6,1, Очаків — 5,1, Одеса — 5,4, Євпаторія 5,4 м/с. Окремим випадком є відносно високі значення середньої річної швидкості вітру за даними метеорологічної станції Луганськ (5,7 м/с).

Щодо індексу «ефективних опадів», то найбільші значення (від 60 до 85) спостерігаються по метеорологічних станціях північного Степу (Знаменка — 61, Дніпро — 61, Бобринець — 62, Павлоград — 62, Ізюм — 80, Куп'янськ — 85, Волноваха — 78, Донецьк — 70, Сватово — 80 та ін.). Водночас найменші значення притаманні найбільш посушливим південним приморським регіонам. Так, по метеорологічній станції Одеса індекс «ефективних опадів» дорівнює лише 40, Миколаїв — 44, Очаків — 43, Херсон — 37, Асканія-Нова — 39, Генічеськ — 37, Євпаторія — 42, Чорноморське — 29 (це найменше значення), Феодосія — 34 тощо.

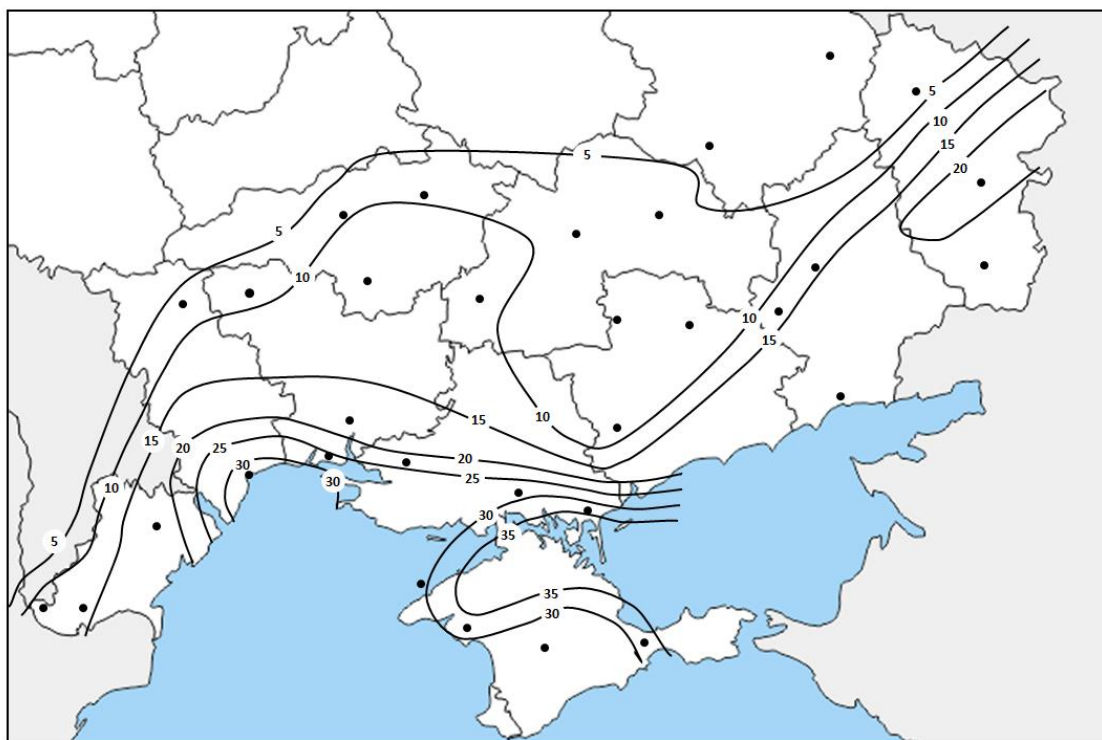


Рис. 1. Просторовий розподіл кліматичного фактора вітрової ерозії по території Степу України

Слід зазначити, що для регіону Степу України саме індекс «ефективних опадів» (PE) значною мірою визначає величину кліматичного фактора вітрової ерозії С. На рисунку 2 зображений графік зв'язку між PE та величиною кліматичного фактора вітрової ерозії С. Форма графіку показує, що існує досить тісна залежність між цими показниками ($r^2 = 0,61$). Характер залежності свідчить, що суттєвий вплив на величину кліматичного фактора вітрової ерозії С існує при великих значеннях індексу «ефективних опадів» (більше ніж 50), а при менших значеннях цього показника (30–50) величина С змінюється мало. Тобто в північних районах регіону, де спостерігаються значні величини індексу «ефективних опадів», його внесок у підсумкове значення кліматичного фактора вітрової ерозії є суттєвим, а в південних посушливих районах Степу, відносно незначним. У цій частині регіону, що вивчається, зростає внесок середньої річної швидкості вітру в підсумковий результат.

Але загальний просторовий розподіл показника С все одно залежить від просторового розподілу всіх його складників — середньої швидкості вітру та індексу «ефективних опадів». У північному Степу України, де значення індексу «ефективних опадів» максимальне, а швидкість вітру стабільна, в межах 3–5 м/с, значення кліматичного фактора вітрової ерозії мінімальне — менше ніж 10 (Рис. 1). У приморських регіонах — Одеській, Миколаївській та Херсонській областях та в степовому Криму, де

індекс «ефективних опадів» мінімальний (30–45), а середня багаторічна швидкість вітру досягає 6 і більше метрів за секунду, показник C коливається в межах 25–35 (Рис. 1).

Якщо порівнювати розраховані результати зі значеннями параметра C , розрахованими для різних частин Світу, то на Великих рівнинах США, а також у штатах Аризона, Невада, Юта та Каліфорнія величина кліматичного фактора вітрової ерозії коливається в широких межах від 0 до 150 [5]. У Словаччині, для території, яка розташована на Дунайській низовині, показник C дорівнює 10 [6]. У східній частині Австрії кліматичний фактор вітрової ерозії коливається в межах 5–7 [4]. У Монголії максимальне значення кліматичного фактора C коливається в межах 20–39 у південних напівпустельних та пустельних регіонах, а у північних лісистих регіонах цей показник дорівнює близько одиниці [7].

Повний аналіз просторового розподілу кліматичного показника вітрової ерозії неможливо зробити без урахування іншого складника вітрової ерозії з математичного виразу (2), а саме, показника податливості ґрунту до дефляції (I). Цей параметр, як і кліматичний параметр C , є суто природним фактором вітрової ерозії, який дуже незначно залежить від антропогенної діяльності.

Слід зазначити, що в південній частині Степу є кілька регіонів, де значення показника вітроерозійної стійкості ґрунту мінімальні, тобто величини податливості ґрунту до дефляції будуть максимальними. Це райони з дерново-піщаними ґрунтами, глинисто-

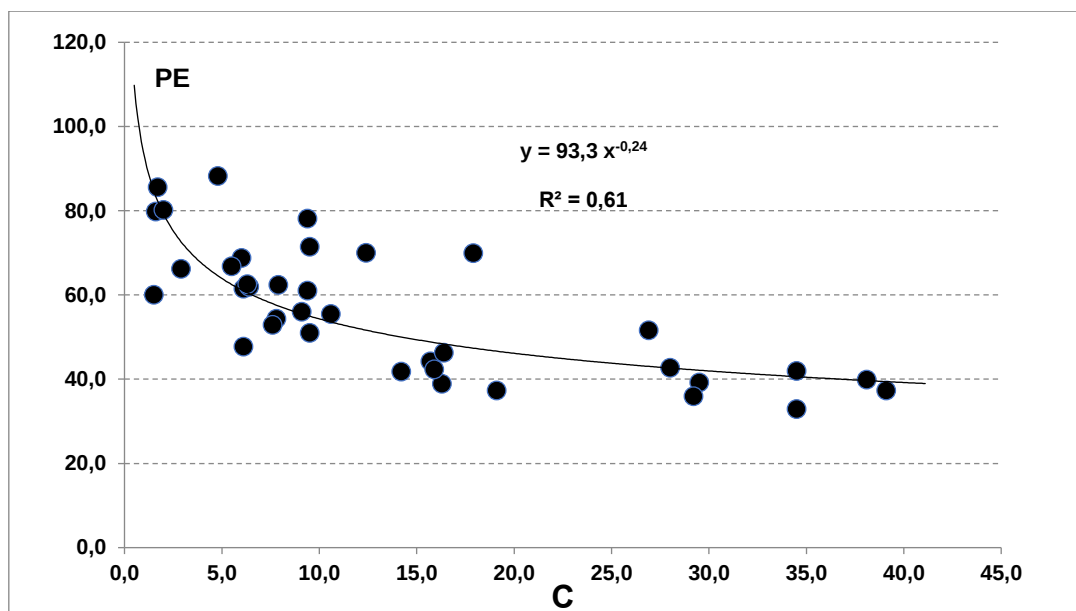


Рис. 2. Залежність між індексом «ефективних опадів» (PE) та величиною кліматичного фактору вітрової ерозії C

піщаними ґрунтами та слабо задернованими, слабогумусованими та негумусованими пісками в пониззі Дніпра (Олешківські піски). Результати спеціальних досліджень цих ґрунтів і ґрунтоподібних піщаних субстратів показали [11], що індекс податливості ґрунту до дефляції (I) тут змінюється в діапазоні 150–700 т/га. Це контрастує з важко- і середньосуглинковими чорноземами та темно-каштановими ґрунтами, які розташовані навколо цього ареалу піщаних ґрунтів, і для яких значення показника податливості ґрунту до дефляції не перевищує 50 т/га.

Значення кліматичного фактора C для цієї території з дефляційнонебезпечним станом ґрунтів відносно велике і становить 25–30, тобто ця територія, скоріш за все, найбільше потерпає від вітрової ерозії у всьому українському Степу.

Невеликі ареали піщаних ґрунтів з високим значенням показника податливості ґрунту до дефляції (I) є ще в долинах річок Південний Буг та Сіверський Донець, але, як правило, ці землі не є землями сільськогосподарського призначення, і зайняті лісами, а величини кліматичного показника для цих територій відносно невеликі.

4. Висновки

Якщо враховувати природні характеристики податливості ґрунту до дефляції, то винятково велика вітроерозійна небезпека існує у лівобережному пониззі Дніпра (в районі Олешківських пісків), де, при великих значеннях показника C (20–30), протидефляційна стійкість ґрунту мінімальна ($I = 150\text{--}700 \text{ т/га}$).

1. *Наукові та прикладні основи захисту ґрунтів від ерозії в Україні* : монографія / за ред. С. А. Балюка та Л. Л. Товажнянського. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. 460 с. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/16452/1/Naukovi_ta_prykladni_osnovy_zakhystu_gruntiv_vid_erozii_v_Ukraini.pdf

2. Skidmore E. L. Wind-erosion climatic erosivity. *Climate Change*. 1986. 9. P. 195–208. <https://doi.org/10.1007/BF00140536>

3. Chepil W. S., Siddoway F. H., & Armbrust, D. V. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *Jour. Soil and Water Conserv.* 1962. №17(4). P.162–165. https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew_pdf/752.pdf

4. Klik A. Wind erosion assessment in Austria using wind erosion equation and GIS. *Agricultural Impacts on Soil Erosion and Soil Biodiversity: Developing Indicators for Policy Analysis* edited by R. Francaviglia. Rome: Proceedings from an OECD Expert Meeting. 2004. P. 145–154. <https://www.researchgate.net/publication/228798188> Wind erosion assessment in Austria using wind erosion equation and GIS

5. Huffman R. L, Fangmeier D. D., Elliot W. J., Workman S. R. Chapter 20. Soil erosion by wind. In: *Soil and Water Conservation Engineering*. Seventh Edition. St. Joseph, Michigan: ASABE, 2013. P. 483–499.

6. Stredansky J., Lasckova L., Stredanska A., Varga V. Determination of soil endangerment by wind erosion with consideration of legislative changes in acceptable soil loss. *Ecologia (Bratislava)*. 2015. Vol. 34. No.1, P.1–6. <https://doi.org/10.1515/eko-2015-0001>

7. Mandakh N., Tsogtbaatar J., Dash D., Khudulmur S. Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia. *J. Geogr. Sci.* 2016. 26(4). P. 473–483. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1280-5>

8. *National Agronomy Manual*. 4th Ed., U.S. Department of Agriculture. February 2011. 250 p. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/National-Agronomy-Manual.pdf>

87. Чорний С. Г. Кількісна оцінка вітрової ерозії ґрунту: можливості WEQ. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2018. С. 23–28. <https://doi.org/10.31073/acss87-04>

10. Галік О. І., Басюк Т. О. *Методичні вказівки «Довідкові дані з клімату України»*. Рівне: НУВГП, 2014. 158 с. <https://ep3.nuwm.edu.ua/591/1/01-03-16.pdf>

11. Chornyy, S., & Pismenniy, O. Verification of the wind erosion equation on the Ukrainian Steppe. In: Dent, D., Boincean, B. (Eds.). *Regenerative Agriculture*. Springer, Cham, 2021. P. 319-327. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72224-1_29

12. National Soil Survey Handbook; Compiled 9/19/2022/ 618.79 Wind Erodibility Group and Index.
<https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1712932090/35155.pdf>

UDC 631.4

Climatic factor of soil wind erosion in the Steppe of Ukraine: spatial analysis**S. G. Chornyy****P. Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine**
s.g.chornyy@gmail.com

Received 15.11.2024, Revised 16.12.2024, Accepted 18.12.2024, Available online 27.12.2024

Abstract

Wind erosion in the Steppe of Ukraine, which depends on a number of natural and anthropogenic factors, is largely determined by specific climatic conditions. These conditions, in addition to wind strength and constancy, include air temperature, precipitation, and evaporation. These parameters collectively determine the water balance of the soil. Wet surfaces are stable enough to resist strong winds, while a dry soil layer with low moisture is enough to initiate wind erosion. To achieve the goal of the study – spatial analysis of wind erosion hazard – the climate factor (C) from the Wind Erosion Equation (WEQ) mathematical model used to estimate the average long-term soil loss by wind. For this purpose, we used standard data on wind speed, temperature, and precipitation from meteorological stations in the Ukrainian Steppe, as well as published generalizations of long-term average wind speed, monthly precipitation, and temperature. To estimate the climatic parameter for wind erosion, we used meteorological observation data from 33 stations in the Steppe of Ukraine, as well as from adjacent territories in Moldova and the Russian Federation. The calculations and mapping of the climate factor from the WEQ model showed that its values depend on the spatial distribution of all its components – the average wind speed and the Thornthwait "effective precipitation" index. In the northern Steppe of Ukraine, where the value of the effective precipitation index is highest and wind speed remains stable between 3 to 5 m/s, the climatic factor for wind erosion is minimal – less than 10. In the coastal regions of Odesa, Mykolaiv, and Kherson oblasts, as well as in the steppe Crimea, where the effective precipitation index is minimal (30 – 45) and the average long-term wind speed exceeds 6 m/s, the C index ranges from 25 to 35. Considering the anti-deflation resistance of the soil, the areas with sod-sandy soils, clay-sandy soils, and soil-like sandy substrates in the lower reaches of the Dnipro River (Oleshky Sands) are the most wind erosion-prone areas in the entire Ukrainian Steppe. These areas have the lowest resistance to strong winds and, despite their relatively high value of the climatic factor of wind erosion (C), are the most vulnerable to wind erosion.

Keywords: wind erosion; climatic parameter; effective precipitation index; Steppe of Ukraine**Citing:** Chornyy S. G. (2024). Climatic factor of soil wind erosion in the Steppe of Ukraine: spatial analysis. *AgroChemistry and Soil Science*, 97, 25-30. doi: 10.31073/acss97-03 [in Ukrainian]**References**

1. Balyuk, S. A. & Tovazhnianskyi, L. L. (Eds.). (2010). *Scientific and applied foundations of soil erosion protection in Ukraine: monograph*. Kharkiv: NTU "KhPI". https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/16452/1/Naukovi_ta_prykladni_osnovy_zakhystu_gruntiv_vid_erozii_v_Ukraini.pdf [In Ukrainian].
2. Skidmore, E. L. (1986). Wind erosion climatic erosivity. *Climatic Change*, 9, 195–208 <https://doi.org/10.1007/BF00140536>
3. Chepil, W. S., Siddoway, F. H., & Armbrust, D. V. (1962). Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *Jour. Soil and Water Conserv.*, 17(4), 162–165. https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew_pdf/752.pdf
4. Klik, A. (2004). Wind erosion assessment in Austria using wind erosion equation and GIS. In: *Agricultural Impacts on Soil Erosion and Soil Biodiversity: Developing Indicators for Policy Analysis edited by R. Francaviglia*. Rome: Proceedings from an OECD Expert Meeting. 145–154. https://www.researchgate.net/publication/228798188_Wind_erosion_assessment_in_Austria_using_wind_erosion_equation_and_GIS
5. Huffman, R. L., Fangmeier, D. D., Elliot, W. J., & Workman, S. R. (2013). Chapter 20. Soil erosion by wind. Pages 459-481 in *Soil and Water Conservation Engineering*, 7th Edition. Copyright 2013 American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Mich. <https://doi.org/10.13031/swce.2013.20>
6. Stredansky, J., Lasckova, L., Stredanska, A., & Varga, V. (2015). Determination of soil endangerment by wind erosion with consideration of legislative changes in acceptable soil loss. *Ecologia (Bratislava)*, 34(1), 1–6. <https://doi.org/10.1515/eko-2015-0001>
7. Mandakh, N., Tsogtbaatar, J., Dash, D., & Khudulmur, S. (2016). Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia. *J. Geogr. Sci.*, 26(4), 473–483. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1280-5>
8. U.S. Department of Agriculture. (2011) *National Agronomy Manual*. 4th Ed., February <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/National-Agronomy-Manual.pdf>
9. Chornyy, S. G. (2018). Quantifying soil wind erosion: WEQ capabilities. *Agrochemistry and Soil Science*, 87, 23–28. <https://doi.org/10.31073/acss87-04> [In Ukrainian].
10. Galik, O. I., & Basyuk, T. O. (2014). *Methodological guidelines "Reference data on the climate of Ukraine"*. Rivne: NUVHP. <https://ep3.nuwm.edu.ua/591/1/01-03-16.pdf> [In Ukrainian].
11. Chornyy, S., Pismenniy, O. (2021). Verification of the Wind Erosion Equation on the Ukrainian Steppe. In: Dent, D., Boincean, B. (Eds.) *Regenerative Agriculture*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72224-1_29
12. National Soil Survey Handbook; Compiled 9/19/2022/ 618.79 Wind Erodibility Group and Index. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2/1712932090/35155.pdf>