

УДК: 631.459:551.311.2(477.7)

**Кліматичний чинник вітрової ерозії на Півдні України:
статистичний аналіз та тенденції в контексті зміни клімату****С. Г. Чорний**

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

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 11.05.2026 Отримано після доопрацювання 07.06.2026 Затверджено до видання 08.06.2026 Доступно онлайн 30.06.2026	Представлено результати оцінювання кліматичного фактора вітрової ерозії ґрунтів для Півдні України. Вітрова ерозія є одним з основних процесів, що призводить до деградації ґрунтів, в степових та сухостепових регіонів України та має значний вплив на продуктивність сільськогосподарських угідь. Кліматичний параметр (С) математичної моделі WEQ дозволяє зробити оцінку небезпеки виникнення вітрової ерозії в умовах сучасних кліматичних змін і має значні регіональні контрасти на Півдні України. Максимальний вітро-ерозійний потенціал клімату спостерігається на узбережжі Чорного та Азовського морів (більше ніж 40 одиниць С), мінімальні значення притаманні континентальним районам (менше ніж 20 одиниць С). Такі контрасти визначаються середньорічними швидкостями вітру, які найбільші на узбережжі, вищими у південних районах з місячними температурами повітря та опадами. Небезпека вітрової ерозії в регіоні визначається не довгостроковими середніми характеристиками, а частотою та інтенсивністю екстремальних подій. А тому при проектування протидефляційних заходів повинно використовувати значення С, що дорівнює перцентилі 90 %. На Півдні України спостерігається певна строкатість і в напрямку (додатному або від'ємному), і в інтенсивності змін кліматичного показника вітрової ерозії. Амплітуда змін нахилу Сена становить 6–7 одиниць С за 10 років. Найвище зниження кліматичного потенціалу дефляції за період 1980–2024 рр. (-3 до -6 одиниць С на десятиліття) спостерігається в прибережній зоні. Невеликі позитивні значення нахилу Сена (0 до +0,9 одиниці С на десятиліття), які вказують на поступове зростання кліматичного дефляційного потенціалу спостерігається в континентальних районах Херсонської та Запорізької області. На тлі стабільних значень середньорічної швидкості вітру, така динаміка визначається балансом між темпами зростання середньорічної температури цього показника та змінами в річній кількості опадів. Виходячи з чинних прогнозів щодо компонентів коефіцієнта С очікується, що виявлені тенденції в регіоні зберуться принаймні до 40-х – 50-х років XXI століття.
<i>Ключові слова:</i> вітрова ерозія; кліматичний параметр; швидкість вітру; індекс ефективності опадів; нахил Сена; зміна клімату	
✉ s.g.chornyy@gmail.com	
ORCID: 0000-0001-9764-677X	
<i>Форма цитування:</i> Чорний С. Г. Кліматичний чинник вітрової ерозії на Півдні України: статистичний аналіз та тенденції в контексті зміни клімату. <i>Агрохімія і ґрунтознавство</i> / ННЦ «Ін-т ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2026. Вип. 100. С. 49–58. https://doi.org/10.31073/acss100-04	
<i>Поширення статті здійснюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY–NC 4.0</i>	

1. Вступ

Вітрова ерозія є одним з основних процесів, що призводить до деградації ґрунтів, особливо у посушливих степових та пустельних регіонах Світу. Цей процес, відомий також як «дефляція ґрунту», є актуальним для степових та сухостепових регіонів України, де він має значний вплив на продуктивність сільськогосподарських угідь. Зараз, коли розораність території досягла свого максимального рівня, майже щороку спостерігається локальне проявлення вітрової ерозії, а кожні 5–10 років — регіональні та трансконтинентальні курні бурі («чорні» бурі).

Ерозія становить значну проблему для землекористувачів на глобальному рівні. Планетарні оцінки інтенсивності вітрової ерозії з 1980 до 2020 року, здійснені за допомогою рівняння вітрової ерозії (RWEQ), показують, що протягом цього періоду втрати ґрунтів через вітрову ерозію щорічно становлять 359 ± 25 млрд тонн та існує тенденція до зростання глобальної вітрової ерозії протягом останніх чотирьох десятиліть, причому уражені райони розширюються по всьому світу. Таке зростання пов'язане зі зростанням швидкості вітру та швидкою аридизацією клімату [1].

Кліматичні умови відіграють ключову роль у процесах вітрової ерозії. Швидкість вітру, режим опадів, вологість ґрунту та температура у сукупності визначають як ерозійну силу вітру, так і схильність поверхні ґрунту до дефляції [2]. В останні десятиліття зміна клімату дедалі частіше визнається важливим чинником вітрової ерозії. Підвищення температури, збільшення частоти посух та зміна характеру опадів можуть суттєво вплинути на кліматичний потенціал вітрової ерозії.

Одним із найпоширеніших емпіричних підходів до оцінювання кліматичного потенціалу вітрової ерозії є параметр C у рівнянні вітрової ерозії (WEQ), розробленому Міністерством сільського господарства США та спочатку застосованому у Великих рівнинах [3–6]. Кліматичний параметр (C) інтегрує ефекти швидкості вітру та ефективності опадів, відображаючи як ерозійну здатність клімату з позиції деградації ґрунтів під впливом сильних вітрів, так і роль ефективності опадів як комплексного показника вологості ґрунту, що істотно впливає на схильність ґрунту до дефляції [6]. Просторовий розподіл цього показника дозволяє зробити оцінку небезпеки виникнення вітрової ерозії в регіональному масштабі в умовах сучасних кліматичних змін.

Попередні дослідження з цього питання показали [7], що найбільша небезпека вітрової ерозії в Україні притаманна південним областям та степовим районам республіки Крим. Метою цієї статті є більш детальна оцінка просторового розподілу цього показника в середині регіону, а також визначення часових трендів за допомогою оцінювача Тейла-Сена, що дозволяє зробити прогноз можливих майбутніх тенденцій щодо дефляційного потенціалу клімату.

2. Методика дослідження

2.1. Вихідні дані

Для оцінки кліматичного фактора вітрової ерозії (C) використано багаторічні дані (44 роки) метеорологічних спостережень мережею станцій Півдня України (територія Одеської, Миколаївської, Херсонської, Запорізької областей та Республіки Крим). До аналізу були залучено ряди місячних значень кількості опадів (P , мм); середньомісячної температури повітря (T , °C); середньорічної швидкості вітру (v , м/с) за період 1980–2024 рр.

Метеорологічні дані були отримані з опублікованих наземних спостережень, наданих репозиторієм Українського гідрометеорологічного інституту, а також з бази даних NASA POWER, яка надає глобальні метеорологічні набори даних, отримані з супутникових спостережень (наприклад, Terra, Aqua) та скореговані з наземними вимірами. Використання даних NASA POWER [8] було особливо важливим через брак даних спостережень у зонах, що зазнали впливу російсько-української війни, та тимчасово окупованих територіях у межах досліджуваного регіону. Попередні дослідження продемонстрували хорошу узгодженість між даними NASA POWER та наземними спостереженнями [9–11 та ін.).

2.2. Розрахунок кліматичного фактора (C) та статистичних параметрів

Кліматичний фактор вітрової ерозії визначено відповідно до рівняння вітрової ерозії (WEQ) [5, 6]:

$$C = 386 \cdot v^3 / (PE)^2, \quad (1)$$

де: v – середньорічна швидкість вітру (м/с); PE – індекс ефективності опадів.

Індекс РЕ визначено за модифікованою формулою Торнтвейта [5, 6]:

$$PE = 3,16 \cdot \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{P_i}{(1,8 \cdot T_i + 22)} \right]^{\frac{10}{9}}, \quad (2)$$

де: P_i – кількість опадів за i -й місяць; T_i – середньомісячна температура повітря. У розрахунках враховували таке обмеження:

$$1,8 \cdot T_i + 22 \leq 0.$$

У випадках, коли ця умова не могла бути виконана, відповідні місяці виключали з розрахунку, що дозволяло уникнути від'ємних значень в чисельнику формули (2).

Для кожної метеостанції були розраховані значення таких параметрів: середнє значення ($C_{\text{сеп}}$); медіана ($C_{\text{мед}}$); коефіцієнт варіації (C_v); стандартна помилка середнього (SE); перцентилі (C_{90} , C_{95}); максимальні значення (C_{max}).

Коефіцієнт варіації розраховували як

$$C_v = \frac{\sigma}{C_{\text{сеп}}} \quad (3)$$

Стандартну помилку середнього визначали за формулою:

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4)$$

У формулах (3) та (4): σ – стандартне відхилення; n – кількість років спостережень.

2.3. Аналіз трендів

Часові тенденції коефіцієнта C аналізували за допомогою оцінювача Тейла-Сена — непараметричного методу, який широко застосовується в аналізуванні метеорологічних часових рядів [12–14]. Цей підхід був рекомендований Всесвітньою метеорологічною організацією для виявлення тенденцій у кліматичних змінних, включаючи температуру, опади, вологість та вітровий режим.

Оцінювач Тейла-Сена [15] забезпечує надійну оцінку темпу змін шляхом обчислення медіани всіх парних нахилів (β або нахил Сена) між спостереженнями в часовому ряді:

$$\beta = \text{median} \frac{C_j - C_i}{j - i}, \forall j > i \quad (5)$$

де C_i та C_j — значення кліматичного коефіцієнта вітрової ерозії в моменти часу “ i ” та “ j ” відповідно.

Цей метод нечутливий до виняткових значень і не вимагає нормального розподілу даних, що робить його придатним для аналізу кліматичних часових рядів, які характеризуються високою мінливістю.

Результати представлено у перерахунку на період 10 років. Додатні значення нахилу Сена (β) у період 1981–2024 рр. вказують на тенденцію до зростання потенціалу кліматичної вітрової ерозії, тоді як від'ємні — до зниження.

Для перевірки статистичної значущості трендів використовували критерій Манна-Кендала [16, 17]. Був використаний показник τ Манна-Кендала, який вказує на напрямок і стабільність тренду та критерій p -value, що визначає рівень значущості. Величина τ змінюється від -1 до +1. Додатні значення τ вказують на зростання параметрів показника C у часі, від'ємні — на зниження. Чим ближче значення до 1(-1), тим більш впорядковано (менш «шумно») ряд змінюється у часі. А тренд вважається статистично значущим лише при $p < 0,05$. Менш значущим тренд буде, коли $0,05 < p < 0,10$.

Отже оцінювання параметрів кліматичного фактора вітрової ерозії по Півдню України базувалося на поєднанні середніх значень (характеристика вітро-ерозійного кліматичного фону), перцентилів (характеристика екстремальних вітро-ерозійних умов), показників варіабельності (C_v , SE) та трендів (нахил Сена, критерій Манна-Кендала). Такий комплексний підхід дозволяє більш-менш повно оцінити як середній рівень кліматичної вітроерозійної небезпеки в регіоні, так

і ризику, які пов'язані з екстремальними погодними подіями (наявність сильних вітрів при висушеному ґрунті), які можуть призвести до великих втрат ґрунту.

3. Результати досліджень

3.1. Просторовий розподіл кліматичного параметру вітроерозійної небезпеки

Кліматичний фактор вітрової ерозії (С) демонструє значну просторову диференціацію в межах півдня України. Різниця між мінімальними та максимальними середніми значеннями С перевищує майже у 5 разів, що свідчить про різко виражені регіональні контрасти. Максимальні середні багаторічні значення ($C_{сер}$) (більше ніж 40 одиниць) спостерігаються в приморських районах (Керч, Феодосія, Генічеськ, Скадовськ, Очаків, Чорноморське). Значення, близькі до максимальних, має берегова зона Одещини. Мінімальні значення ($C_{сер} < 20$) притаманні периферійним, північним районам регіону, передгір'ям Криму, а також майже всій території Запорізької області (Табл. 1).

Таблиця 1

Статистичні параметри кліматичного фактора вітрової ерозії по метеорологічних станціях Півдня України

№	Метеорологічна станція	$C_{сер}$	C_{med}	C_{90}	C_{95}	C_{max}	SE	C_v
1.	Армянськ	44,50	40,33	73,13	80,68	89,92	3,03	0,45
2.	Джанкой	25,81	22,94	42,57	49,40	65,10	1,89	0,49
3.	Євпаторія	36,45	32,70	60,85	67,78	99,31	2,79	0,51
4.	Керч	45,12	38,20	74,80	85,25	125,65	3,68	0,54
5.	Симферопіль	15,59	14,40	24,21	27,90	46,07	1,21	0,51
6.	Чорноморське	47,43	42,81	75,02	95,02	100,35	3,23	0,45
7.	Генічеськ	48,54	44,90	78,35	93,19	106,47	3,30	0,46
8.	Феодосія	48,64	39,87	82,83	94,04	140,05	4,01	0,55
9.	Асканія-Нова	20,97	19,46	32,69	34,45	47,79	1,52	0,48
10.	Нижні Сірогози	21,06	18,60	32,39	44,42	53,80	1,69	0,53
11.	Нова Каховка	21,67	19,82	32,53	33,66	75,95	1,97	0,60
12.	Скадовськ	48,53	44,65	78,50	100,68	105,00	3,53	0,48
13.	Херсон	29,31	26,53	44,66	62,22	92,38	2,64	0,60
14.	Баштанка	17,21	15,64	27,20	32,28	79,79	1,92	0,74
15.	Вознесенськ	14,69	13,55	23,78	34,70	53,45	1,55	0,70
16.	Миколаїв	22,25	19,85	35,46	45,15	91,09	2,40	0,71
17.	Очаків	43,01	34,43	67,37	100,32	142,42	4,34	0,67
18.	Первомайськ	11,41	10,58	20,70	24,92	28,79	1,04	0,61
19.	Ананьєв	11,99	10,30	23,87	27,56	32,98	1,22	0,67
20.	Арциз	23,44	19,34	42,40	59,87	76,01	2,39	0,68
21.	Белгород-Дністровський	28,26	23,35	46,50	67,97	84,98	2,62	0,61
22.	Вилкове	35,72	31,16	64,84	97,41	107,18	3,61	0,67
23.	Ізмаїл	8,41	6,90	15,97	22,49	29,87	0,92	0,72
24.	Одеса	30,86	24,93	52,53	79,53	99,67	3,11	0,67
25.	Бердянськ	21,70	19,64	35,20	42,90	66,10	1,82	0,56
26.	Гуляй Поле	14,23	12,22	23,41	29,00	47,38	1,36	0,63
27.	Запоріжжя	12,32	10,37	20,69	25,29	32,22	1,03	0,56
28.	Мелітополь	21,43	20,06	36,52	42,32	60,26	1,85	0,57
29.	Пологи	14,23	12,22	23,41	29,00	47,38	1,36	0,63
30.	Токмак	15,83	13,36	26,98	30,40	48,54	1,53	0,64

Такі контрасти насамперед визначаються двома факторами. Перший — приморські території характеризуються найбільшими середньорічними швидкостями вітру (м/с): Скадовськ — 4,9, Генічеськ — 5,4, Одеса — 4,7, Чорноморське — 5,6 та ін.), які є чисельником у формулі (1). У континентальних районах цей показник має менші значення (Баштанка, Первомайськ, Вознесенськ — 4,2, Запоріжжя — 4,4, Пологи, Токмак, Гуляй-Поле — 4,5 м/с). Другий фактор — індекс ефективності опадів (PE), який є знаменником у формулі (1), у приморських

районах помітно зменшується порівняно з більш континентальними північними районами, що пов'язано з порівняно невеликою кількістю як річних опадів, так і опадів по конкретних місяцях, у причорноморській зоні Миколаївщини, Херсонщини, у Приазов'ї та в Північному Криму. Річна кількість опадів, наприклад, по метеостанції Скадовськ становить 398,2, Генічеськ — 443,0, Одеса — 450,7, Херсон — 412,0 мм. Тоді як у більш північних районах регіону кількість опадів на 30–70 мм більша (наприклад, Токмак — 472,2, Пологи — 484,2, Первомайськ — 510,4, Вознесенськ — 468,4 мм). До того ж причорноморські та приазовські регіони мають порівняно вищі середньорічні температури повітря та температури кожного місяця. Наприклад, за даними метеорологічної станції Скадовська середньорічна температура становить 12,2 °С, Генічеська — 12,3, Одеси — 11,4, Чорноморська — 12,7 тощо. В більш північних районах Півдня України значення на 2,0–2,5 °С нижче, наприклад, по Токмаку 10,0 °С, Первомайську 9,3, Гуляй-Полю 9,6.

Варіабельність часових рядів кліматичного параметра вітрової ерозії, покладених в основу розрахунків (C_v) коливається в діапазоні 0,45–0,74. Але спостерігаються певні територіальні особливості. Відносно стабільні ряди ($C_v = 0,45–0,50$) спостерігаються в Криму та на узбережжі Чорного та Азовського морів. Але континентальним районам притаманна більша нестабільність ($C_v = 0,60–0,74$). Максимальні значення коефіцієнта варіації були отримані за даними метеорологічних станцій Баштанка (0,74), Ізмаїл (0,72) та Миколаїв (0,71) (Табл. 1). Значна варіація рядів (C_v) вказує, що вітроерозійний ризик по всьому Півдню України буде визначатися не стільки середнім рівнем цього показника, скільки екстремальними значеннями прояву процесів дефляції. І навіть у регіонах з відносно низькими середніми значеннями C (північні райони Одеської та Миколаївської областей і Запорізька область) можливі роки з високим вітроерозійним потенціалом (Табл. 1).

Виключно висока варіабельність рядів вітроерозійного показника C вимагає прискіпливої уваги до екстремальних значень його параметрів. Проектування протидефляційних заходів за допомогою WEQ при таких високих коефіцієнтах варіації річних рядів C будуть неефективними за використання середніх значень цього показника тому, що максимальна руйнація ґрунту (наприклад, під час екстремальних курних («чорних») бур) стається при подіях рідкісної повторюваності. Як правило, інженерні підходи щодо проектування протидефляційних заходів, базуються на перценталі 90 %. У нашому випадку застосування у проектуванні величини кліматичного параметру вітрової ерозії цього перценталю (C_{90}) буде визначати врахування 90 % років з максимальними випадками потенційного прояву вітрової ерозії. Зрозуміло, що такий підхід суттєво посилює надійність протидефляційних заходів, але очевидно призведе до зростання їх вартості.

Значення C_{90} та C_{95} порівняно з середніми значеннями цього показника зростають в 1,5–2,5 раза, досягаючи максимальних значень у приморських регіонах (Скадовськ ($C_{95} = 100,7$), Феодосія ($C_{95} = 94$), Генічеськ ($C_{95} = 93$), Чорноморське ($C_{95} = 95$)). У цих районах спостерігаються і максимальні по Півдню України абсолютні максимуми показника C (Очаків ($C_{\max} = 142$), Феодосія ($C_{\max} = 140$), Керч ($C_{\max} = 126$)). Величини C_{90} та C_{95} для континентальних районів зростають приблизно на такі самі величини, але абсолютні значення набагато менші ніж у приморських районах (наприклад, Первомайськ $C_{95} = 24,9$, Ананьєв $C_{95} = 27,6$, Запоріжжя $C_{95} = 25,3$) (Табл. 1). Це вказує на наявність локальних зон дуже високого вітроерозійного ризику, які пов'язані з прибережними територіями (Табл. 1).

Стандартна помилка (SE) коливається в діапазоні 0,9–4,3 і становить приблизно 5–10 % від середнього (Табл. 1). А отже середні значення відносно статистично стабільні, але фізично нерепрезентативні під час екстремальних випадків прояву вітрової ерозії.

3.2. Аналіз часових трендів

На Півдні України спостерігається певна строкатість і в напрямі (додатному або від'ємному), і в інтенсивності змін кліматичного показника вітрової ерозії. Значення ухилу Сена варіюють у широких межах: від +0,94/10 років (Токмак) до -6,59/10 років (Керч), тобто амплітуда змін становить 6–7 одиниць С за 10 років. Що стосується статистичної значущості, то $p < 0,05$ спостерігається лише по одній станції Керч ($p = 0,011$) (Табл. 2). Менш значущі, коли $0,05 < p < 0,10$ були зміни по Феодосії (0,063) та Очакову (0,086). А по інших станціях $p \gg 0,05$, тобто тренд був статистично незначущий (Табл. 2).

Таблиця 2
Аналіз трендів

№	Метеорологічна станція	Ухил Сена (за 10 років)	τ Манна-Кендала	p-value	№	Метеорологічна станція	Ухил Сена (за 10 років)	τ Манна-Кендала	p-value
1.	Армянськ	-1,77	-0,085	0,418	16.	Миколаїв	-0,24	-0,021	0,840
2.	Джанкой	-1,38	-0,085	0,418	17.	Очаків	-4,03	-0,180	0,086
3.	Євпаторія	-1,34	-0,057	0,585	18.	Первомайськ	-0,25	-0,034	0,746
4.	Керч	-6,59	-0,266	0,011	19.	Ананьєв	0,23	0,023	0,824
5.	Симферопіль	0,14	0,017	0,871	20.	Арциз	-0,78	-0,059	0,571
6.	Чорноморське	0,86	0,053	0,613	21.	Білгород-Дністровський	-2,55	-0,163	0,119
7.	Генічеськ	-2,21	-0,093	0,380	22.	Вілкове	-2,63	-0,131	0,210
8.	Феодосія	-4,21	-0,195	0,063	23.	Ізмаїл	-0,29	-0,070	0,504
9.	Асканія-Нова	0,41	0,025	0,808	24.	Одеса	-3,02	-0,156	0,134
10.	Нижні Сірогози	0,74	0,055	0,599	25.	Бердянськ	-0,49	-0,032	0,762
11.	Нова Каховка	0,75	0,053	0,613	26.	Гуляй Поле	0,78	0,082	0,430
12.	Скадовськ	-3,42	-0,148	0,157	27.	Запоріжжя	-0,11	-0,017	0,871
13.	Херсон	-1,01	-0,063	0,544	28.	Мелітополь	0,77	0,049	0,642
14.	Баштанка	-0,27	-0,030	0,777	29.	Пологи	0,78	0,082	0,430
15.	Вознесенськ	-0,08	-0,013	0,903	30.	Токмак	0,94	0,089	0,396

Що стосується просторової мінливості як за величиною, так і за напрямом тенденцій кліматичного дефляційного потенціалу, то у північних районах Одеської та Миколаївської областей, спостерігається незначний від'ємний нахил Сена. Це вказує на поступове зменшення кліматичного дефляційного потенціалу протягом досліджуваного періоду. Середній темп зниження нахилу Сена коливається від 0 до -1 одиниці С за десятиліття.

Натомість південні регіони, зокрема прибережні райони Одеської, Миколаївської та Запорізької областей, а також більша частина Херсонської області та Криму, тобто території, що повністю розташовані в зоні найбільшої схильності до дефляції в Україні [7], демонструють найвиразніше зниження кліматичного потенціалу дефляції за період 1980–2024 рр. У цих районах нахил Сена досягає значень від -6 до -3 одиниць С на десятиліття. Найнижче значення було зафіксовано на Керченській метеостанції (-6,7 одиниці С на десятиліття) (Табл. 2).

Водночас у кількох районах у центральній та східній частинах Херсонської та Запорізької областей, а також у передгір'ях Криму спостерігаються невеликі позитивні значення нахилу Сена, що вказує на поступове зростання кліматичного дефляційного потенціалу у період 1981–2024 рр. Діапазон позитивних тенденцій коливається від 0 до +0,9 одиниць С на десятиліття. Найвище значення нахилу Сена було зафіксовано на метеостанції Токмак (центральна частина Запорізької області) +0.94 одиниць С (Табл. 2).

На перший погляд, переважно негативна тенденція кліматичного дефляційного потенціалу в степовій зоні України, суперечить загальній картині останніх кліматичних змін. Підвищення середньорічної температури повітря за останні 40–50 років добре задокументовано в численних дослідженнях (наприклад, [18–20] і, згідно з рівнянням (2), як очікується, має призвести до зниження індексу ефективності опадів (PE) і, як наслідок, до суттєвого збільшення кліматичного коефіцієнта вітрової ерозії (C). Однак детальний часовий аналіз окремих компонентів рівнянь (1) та (2), заснований на даних метеорологічних станцій, які представляють райони з найвищим ризиком вітрової ерозії (Керч, Феодосія, Скадовськ і Одеса), вказує на більш складну закономірність. По-перше, протягом усього періоду спостережень (44 роки) чисельник рівняння (1), тобто середньорічна швидкість вітру, практично не змінюється у всіх частинах степової зони України. По-друге, аналіз знаменника у рівнянні (1) показує, що часові зміни індексу ефективності опадів (PE) в часі визначаються балансом між темпами зростання середньорічної температури цього показника та змінами річної кількості опадів.

Сучасні кліматичні зміни у степовій зоні України не обмежуються загальним підвищенням температури повітря, а ще характеризуються помітним збільшенням річних опадів у певних частинах регіону. Про збільшення кількості опадів на тлі підвищення температури в регіоні повідомляється, до речі, і в дослідженнях українських кліматологів (наприклад, [18–21]).

Тобто, на загал для півдня України, при стабільній швидкості вітру зростання температури повітря на більшій частині регіону компенсується зростанням кількості опадів, а тому індекс ефективності опадів (PE) не зменшується, а в деяких випадках навіть зростає. А відтак, кліматичний фактор вітрової ерозії (C) у більшості випадків поступово зменшується. Особливо це помітно в приморських регіонах. Виключенням є центральні та східні частини Херсонської та Запорізької області і передгір'я Криму, де зростання кількості опадів повністю не компенсує додатної динаміки температур і кліматичний фактор вітрової ерозії поступово, але не набагато, зростає.

Щодо оцінки структури часових рядів кліматичного фактора вітрової ерозії, то τ Кендала змінюється в межах від -0,266 до +0,089 (Табл. 2), що демонструє відсутність стійкої одноманітно монотонної тенденції до зростання (або зменшення) значень, тобто всі часові ряди погано впорядковані.

Виходячи з чинних прогнозів кліматологів [18, 22–24] щодо окремих компонентів коефіцієнта C, які прямо, або побічно вони використовують у розрахунках (середньорічна швидкість вітру, середньорічна температура та річна норма опадів), очікується, що виявлені тенденції на Півдні України збережуться принаймні до 2040–2050 років. Тобто передбачається поступове зниження кліматичного дефляційного потенціалу, причому найвиразніше зниження відбуватиметься у прибережних регіонах та в Криму (за винятком передгірних територій). Водночас у степових районах Херсонської та Запорізької областей очікується поступове зростання кліматичного коефіцієнта вітрової ерозії.

4. Висновки

Кліматичний фактор вітрової ерозії (C) на Півдні України має значні регіональні контрасти. Максимальний вітроерозійний потенціал клімату спостерігається на узбережжі Чорного та Азовського морів (більше ніж 40 одиниць C), мінімальні значення притаманні континентальним районам Херсонської та Запорізької областей та півночі Миколаївщини та Одещини (менше ніж 20 одиниць C). Такі контрасти визначаються середньорічними швидкостями вітру, які найбільші на узбережжі, вищими у південних районах місячними температурами повітря та опадами, максимальні значення яких спостерігаються в більш північних частинах регіону. Кліматичний фактор вітрової ерозії (C) в регіоні визначається не довгостроковими статистично надійними середніми характеристиками,

а частотою та інтенсивністю екстремальних подій. А тому проектування протидефляційних заходів слід проводити на значеннях C , які базуються на перценталях 90 %.

На Півдні України спостерігається певна строкатість і в напрямі (додатному або від'ємному), і в інтенсивності змін кліматичного показника вітрової ерозії. Амплітуда змін нахилу C становить 6–7 одиниць C за 10 років. Найвище зниження кліматичного потенціалу дефляції за період 1980–2024 рр. (від -3 до -6 одиниць C на десятиліття) спостерігається у прибережній зоні. Невеликі позитивні значення нахилу C (до +0,9 одиниці C на десятиліття), які вказують на поступове зростання кліматичного дефляційного потенціалу спостерігається в континентальних районах Херсонської та Запорізької областей. На тлі стабільних значень середньорічної швидкості вітру, така динаміка визначається балансом між темпами зростання середньорічної температури цього показника та змінами річної кількості опадів. Виходячи з чинних прогнозів щодо компонентів коефіцієнта C очікується, що виявлені тенденції в регіоні зберуться принаймні до 40-х – 50-х років XXI століття.

Список використаних джерел

1. Chu Z., Liu M., Zhang Q. et al. Spatiotemporal distribution of global wind erosion over the past four decades. *Environmental Research Letters*. 2024. Vol. 19. Article 114019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad7d22>.
2. Shao Y. *Physics and modelling of wind erosion*. Springer. Netherlands, 2008. URL: <https://www.amazon.com/Physics-Modelling-Atmospheric-Oceanographic-Sciences/dp/1402088949>
3. Chepil W. S., Woodruff N. P. Estimations of wind erodibility of farm fields. *Agricultural Research Service*, U.S. Department of Agriculture, 1959. URL: https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew_pdf/504.pdf
4. Chepil W. S., Siddoway F. H., Armbrust D. V. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *Journal of Soil and Water Conservation*. 1962. Vol. 17. P. 162–165. URL: https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew_pdf/752.pdf
5. Woodruff N. P., Siddoway F. H. A wind erosion equation. *Soil Science Society of America Proceedings*. 1965. Vol. 29. Iss. 5. P. 602–608. URL: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30200525/897%20A%20wind%20erosion%20equation.pdf>
6. Lyles L. Erosive wind energy distributions and climatic factors for the West. *Journal of Soil and Water Conservation*. 1983. Vol. 38. Iss. 2. P. 106–109. URL: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30200525/82-393-J%20Erosive%20wind%20energy%20distributions%20and%20climatic%20factors%20for%20the%20West.pdf>
7. Чорний С. Г. Кліматичний фактор вітрової ерозії ґрунту Степу України: просторовий аналіз. *Агрохімія і ґрунтознавство* / ННЦ «Ін-т ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2024. Вип. 97. P. 25–30. <https://doi.org/10.31073/acss97-03>
8. NASA POWER. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources database. 2025. URL: <https://power.larc.nasa.gov>.
9. Rodrigues G. C., Braga R. P. Evaluation of NASA POWER reanalysis products for estimating daily weather variables. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Iss. 6. Article 1207. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061207>
10. Rosa S. L. K., Souza J. L. M., Santos A. A. NASA POWER data and weather stations in evapotranspiration estimation. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2023. Vol. 58. Article e03261. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03261>
11. Abubakar I. M., Idi B. Y. Statistical analysis of NASA POWER meteorological data for the assessment of climate variability in Adamawa State. *Environmental Technology and Science Journal*. 2024. Vol. 15. №2. P. 119–129. <https://doi.org/10.4314/etsj.v15i2.13>
12. Romanić D., Čurić M., Jovičić I., Lompar M. Long-term trends of the “Koshava” wind (1949–2010). *International Journal of Climatology*. 2014. Vol. 35. Iss. 2. P. 288–302. <https://doi.org/10.1002/joc.3981>
13. Aditya F., Gusmayanti E., Sudrajat J. Rainfall trend analysis using Mann–Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 893. Article 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012006>
14. Han J., Gelata F. T., Gameda S. C. Application of Mann–Kendall test and Sen's slope estimator to assess climate change impacts. *Journal of Water and Climate Change*. 2023. Vol. 14. Iss. 3. P. 977–988. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.508>
15. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63. Iss. 324. P. 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
16. Kendall M. G. Rank correlation methods (4th ed.). Charles Griffin, 1975.
17. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 1945. Vol. 13. №. 3. P. 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
18. Серха Е. М., Хохлов В. М., Недострелова Л. В. Сучасна динаміка кліматичних параметрів у північно-західному регіоні Чорного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. № 26. С. 37–49. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.03>
19. Vyshnevski V. I. Climate change in Ukraine and its consequences. *Journal of Landscape Ecology*. 2025. Vol. 18. Iss. 4. P. 150–174. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0032>
20. Світличний О. О. Сучасні кліматичні зміни в північно-західному регіоні Чорного моря. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*, 2025. Т. 30. Вип. 2(47). С. 36–49. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2\(47\).344743](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2(47).344743)
21. Вишневецький В. І., Доніч О. А. Довгострокові зміни кількості опадів в Україні. *Праці Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського*. 2022. Вип. 18(32). С. 10–19. URL: <https://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/pratsi-tsgo-vipusk-18-32>

22. Степаненко С. М., Половий А. М., Лобода Н. С. та ін. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України : монографія. Одеса: Вид. «ТЕС». 2015. 520 с. URL: https://www.researchgate.net/profile/Sergiy-Stepanenko/publication/308526389_Klimaticni_zmini_ta_ih_vpliv_na_sferi_ekonomiki_Ukraini/links/57e654cf08ae9e5e45564d8a/Klimaticni-zmini-ta-ih-vpliv-na-sferi-ekonomiki-Ukraini.pdf

23. Хохлов В. М., Єрмоленко Н. С. Майбутні зміни клімату та їх вплив на режим опадів і температури в Україні. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. № 16. С. 76–82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>

24. Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Апостолов О. А., Ходоровський А. Я. Зміни вітрових параметрів в Україні в умовах глобальних кліматичних змін. *Доповіді Національної академії наук України*. 2019. № 10. С. 57–66. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.10.057>

UDC 631.459:551.311.2(477.7)

The climatic factor of wind erosion in southern Ukraine: statistical analysis and trends in the context of climate change

S. G. Chorny

P. Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine,

✉ s.g.chorny@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9764-677X

Received 11.05.2026; Revised 08.06.2026; Accepted 08.06.2026; Available online 30.06.2026

Abstract

Wind erosion is one of the main processes leading to soil degradation in the steppe and dry steppe regions of Ukraine and has a significant impact on the productivity of agricultural land. The climatic parameter of the WEQ mathematical model (C) allows for an assessment of the risk of wind erosion under current climate change conditions and exhibits significant regional contrasts in southern Ukraine. The maximum wind erosion potential of the climate is observed along the Black Sea and Azov Sea coasts (more than 40 units C), while the minimum values are characteristic of continental regions (less than 20 units C). These contrasts are determined by average annual wind speeds, which are highest on the coast, as well as higher monthly air temperatures and precipitation in the southern regions. The risk of wind erosion in the region is determined not by long-term average characteristics, but by the frequency and intensity of extreme events. Therefore, when designing anti-deflation measures, a C value equal to the 90th percentile should be used. In southern Ukraine, there is a certain degree of variability in both the direction (positive or negative) and the intensity of changes in the climatic indicator of wind erosion. The amplitude of changes in the Sen slope is 6–7 C units over 10 years. The greatest decrease in the climatic deflation potential for the period 1980–2024 (–3 to –6 C units per decade) is observed in the coastal zone. Small positive values of the Sen slope (0 to +0.9 units C per decade), indicating a gradual increase in the climatic deflation potential, are observed in the continental regions of the Kherson and Zaporizhzhia regions. Against the backdrop of stable values for the average annual wind speed, the balance between the rate of increase in the average annual temperature of this indicator and changes in annual precipitation determines this trend. Based on current projections regarding the components of the C coefficient, it is expected that the identified trends in the region will persist at least until the 2040s–2050s.

Keywords: wind erosion; climatic parameter; wind speed; precipitation efficiency index; Sen's slope; climate change.

Cite: Chorny, S. G. (2026). The climatic factor of wind erosion in southern Ukraine: statistical analysis and trends in the context of climate change. *AgroChemistry and Soil Science*, 100, 49–58. <https://doi.org/10.31073/acss100-04> [in Ukrainian].

This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

References

1. Chu, Z., Liu, M., Zhang, Q., Cai, X., Zhang, Y., Hu, T., Qiu, X., Huang, Z., & Wang, X. (2024). Spatiotemporal distribution of global wind erosion over the past four decades. *Environmental Research Letters*, 19, 114019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad7d22>
2. Shao, Y. (2008). *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Springer, Netherlands. Available from <https://www.amazon.com/Physics-Modelling-Atmospheric-Oceanographic-Sciences/dp/1402088949>
3. Chepil, W. S., & Woodruff, N. P. (1959). Estimations of wind erodibility of farm fields. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture. Retrieved from https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew_pdf/504.pdf
4. Chepil, W. S., Siddoway, F. H., & Armbrust, D. V. (1962). Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17, 162–165. Retrieved from https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/publications/Andrew_pdf/752.pdf
5. Woodruff, N. P., & Siddoway, F. H. (1965). A wind erosion equation. *Soil Science Society of America Proceedings*, 29(5), 602–608. Retrieved from <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30200525/897%20A%20wind%20erosion%20equation.pdf>
6. Lyles, L. (1983). Erosive wind energy distributions and climatic factors for the West. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(2), 106–109. Retrieved from <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30200525/82-393-J%20Erosive%20wind%20energy%20distributions%20and%20climatic%20factors%20for%20the%20West.pdf>
7. Chorny, S. G. (2024). Climatic factor of soil wind erosion in the Steppe of Ukraine: spatial analysis. *AgroChemistry and Soil Science*, 97, 25–30. <https://doi.org/10.31073/acss97-03> [in Ukrainian].
8. NASA POWER. (2025). NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources database. <https://power.larc.nasa.gov>
9. Rodrigues, G. C., & Braga, R. P. (2021). Evaluation of NASA POWER reanalysis products for estimating daily weather variables. *Agronomy*, 11(6), 1207. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061207>

10. Rosa, S. L. K., Souza, J. L. M., & Santos, A. A. (2023). NASA POWER data and weather stations in evapotranspiration estimation. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 58, e03261. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03261>
11. Abubakar, I. M., & Idi, B. Y. (2024). Statistical analysis of NASA POWER meteorological data for the assessment of climate variability in Adamawa State. *Environmental Technology and Science Journal*, 15(2), 119–129. <https://doi.org/10.4314/etsj.v15i2.13>
12. Romanić, D., Čurić, M., Jovičić, I., & Lompar, M. (2014). Long-term trends of the “Koshava” wind (1949–2010). *International Journal of Climatology*, 35(2), 288–302. <https://doi.org/10.1002/joc.3981>
13. Aditya, F., Gusmayanti, E., & Sudrajat, J. (2021). Rainfall trend analysis using Mann–Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 893, 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012006>
14. Han, J., Gelata, F. T., & Gameda, S. C. (2023). Application of Mann–Kendall test and Sen's slope estimator to assess climate change impacts. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 977–988. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.508>
15. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
16. Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). Charles Griffin.
17. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
18. Serga, E. N., Khokhlov, V. M., & Nedostrelova, L. V. (2020). Modern dynamics in main climate characteristics at sites of North-Western Black Sea coast. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 26, 37–49. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.03> [in Ukrainian]
19. Vyshnevski, V. I. (2025). Climate change in Ukraine and its consequences. *Journal of Landscape Ecology*, 18(4), 150–174. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0032>
20. Svitlychnyi, O. O. (2025). Modern climate changes in the north-western Black sea region. *Odesa National University Herald. Geography and Geology*, 30(2(47)), 36–49. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2\(47\).344743](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2(47).344743) [in Ukrainian].
21. Vyshnevskiy, V. I., & Donich, O. A. (2022). Long-term changes in precipitation in Ukraine. *Proceedings of the Central Geophysical Observatory named after Borys Sreznevskiy*, 18(32), 10–19. Retrieved from <https://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/pratsi-tsgo-vipusk-18-32> [in Ukrainian].
22. Stepanenko, S. M., Polovyi, A. M., Loboda, N. S., et al. (2015). *Climate changes and their impact on the spheres of the economy of Ukraine: monograph*. Odesa: Publishing House "TES". Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Sergiy-Stepanenko/publication/308526389_Klimaticni_zmini_ta_ih_vpliv_na_sferi_ekonomiki_Ukraini/links/57e654cf08ae9e5e45564d8a/Klimaticni-zmini-ta-ih-vpliv-na-sferi-ekonomiki-Ukraini.pdf [in Ukrainian].
23. Khokhlov, V. M., & Yermolenko, N. S. (2015). Future climate change and its impact on precipitation and temperature in Ukraine. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 16, 76–82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>
24. Laylko, V., Elistratova, L., Apostolov, A., & Khodorovskiy, A. (2019). Changing the wind parameters on the Ukrainian territory during global climate changes. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 10, 57–66. <https://doi.org/10.15407/dopovid2019.10.057>