

УДК 631.42

DOI <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2026-1-23>

Смільський В. В.

кандидат технічних наук,

старший викладач кафедри автомобільного транспорту,

Відокремлений структурний підрозділ «Бережанський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Бережани, Україна

E-mail: fractalped@gmail.com

ORCID: 0009-0008-9837-812X

Павлів О. В.

кандидат ветеринарних наук,

доцент кафедри екології,

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

Бережани, Україна

E-mail: olegpavliv826@gmail.com

ORCID: 0009-0006-2970-1670

Стрихар М. І.

асистент кафедри машиновикористання та технологій

в сільському господарстві,

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

Бережани, Україна

E-mail: nikolayyakovlev1996@gmail.com

ORCID: 0009-0002-7055-4810

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ АГРОГРУНТІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ЇХ АГРОФІЗИЧНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ

Анотація

У статті обґрунтовано доцільність застосування фрактального аналізу гранулометричного складу агроґрунтів для кількісної оцінки агрофізичної деградації в умовах інтенсифікації землеробства. Показано, що традиційний підхід, у межах якого гранулометричний склад використовується переважно як класифікаційна ознака, є методологічно обмеженим і не забезпечує достатньої інформативності щодо фізичного стану ґрунтів та ризиків розвитку деградаційних процесів.

Запропоновано поєднання кумулятивного та фрактального аналізу розподілу ґрунтових часток за розмірами як інструмент кількісної інтерпретації структурної організації ґрунтової маси. Показано, що інтенсивність і спрямованість агрофізичної деградації значною мірою визначаються генезисом ґрунтів і особливостями їх гранулометричного складу. Недостатня деталізація фізичних властивостей ґрунтів та відсутність адаптивності в технологіях обробітку сприяють прогресуванню процесів переуцільнення, руйнуванню агрегатної структури та зниженню родючості. Встановлено, що форма кумулятивних кривих і характер степеневих залежностей у логарифмічних координатах відображають ступінь упорядкованості гранулометричної структури ґрунту та дозволяють ідентифікувати ознаки агрофізичної деградації, зокрема порушення ієрархічної організації структурних елементів. Показано, що відхилення гранулометричного розподілу від фрактальної поведінки може розглядатися як кількісний індикатор деградаційних змін, зумовлених механічним навантаженням.

Отримані результати підтверджують доцільність використання гранулометричних досліджень у поєднанні з кумулятивним і фрактальним аналізом для наукового обґрунтування адаптивних систем обробітку ґрунту, спрямованих на зменшення агрофізичної деградації та збереження родючості агроґрунтів. Запропонований підхід створює передумови для диференціації ґрунтів за рівнем стійкості до ущільнення і руйнування структури, а також для визначення критичних порогів антропогенного навантаження.

Ключові слова: агрофізична деградація, гранулометричний склад, кумулятивний аналіз, фрактальна розмірність, структурна ієрархія ґрунту.

Вступ. Деградація агроґрунтів в Україні набула системного характеру та є одним із ключових чинників зниження продуктивності агроєкосистем і стійкості агровиробництва. За різними оцінками, ознаки деградаційних процесів різного генезису та інтенсивності властиві 50–60 % сільськогосподарських угідь, при цьому домінуючою формою залишається агрофізична деградація [1; 2; 6; 7].

Інтенсивність і спрямованість агрофізичної деградації істотно залежать від генезису ґрунтів і їх гранулометричного складу, який визначає механічні властивості ґрунтової маси [1; 5]. Водночас у традиційній ґрунтово-агрономічній практиці гранулометричний склад здебільшого розглядається як класифікаційна ознака, що обмежує можливості кількісної діагностики деградаційних змін і не дозволяє адекватно оцінювати структурну організацію ґрунтової маси. Сучасні уявлення про ґрунт як ієрархічно організовану, поліфракційну систему зумовлюють необхідність переходу від описових до кількісних методів аналізу його структури [4]. Дослідження свідчать, що ґрунти з різним гранулометричним складом характеризуються відмінними траєкторіями деградаційних змін: легкі ґрунти швидше втрачають структурну цілісність, тоді як середні та важкі є більш схильними до ущільнення й деградації порового простору [4; 7]. За таких умов ефективність охоронних заходів значною мірою залежить від наявності кількісних діагностичних критеріїв, здатних ідентифікувати критичні пороги антропогенного навантаження на ґрунт [4]. У цьому контексті перспективним є застосування кумулятивного та фрактального аналізу гранулометричного розподілу, які забезпечують кількісну характеристику масштабної організації ґрунтових часток і дають змогу виявляти порушення структурної впорядкованості. Форма кумулятивних кривих і характер \log - \log -залежностей можуть відображати відхилення від фрактальної подібності, що може слугувати індикатором агрофізичної деградації ґрунту. В. В. Медведєв акцентує увагу на типологічній специфіці деградаційних процесів: легкі ґрунти швидше втрачають гумус і структурну організацію, середні та важкі – більш схильні до ущільнення, тоді як чорноземи, попри підвищену природну стійкість, деградують за умов надмірного механічного та агрохімічного навантаження [4; 7]. За таких умов ефективність охоронних заходів значною мірою визначається наявністю кількісних діагностичних критеріїв, здатних ідентифікувати критичні пороги антропогенного навантаження.

Висновки В. В. Медведєва узгоджуються з результатами досліджень С. М. Козішкурт [3], який зазначає, що надмірний механічний обробіток, використання важкої сільськогосподарської техніки, дисбаланс органічних і мінеральних добрив, а також порушення ґрунтозахисних технологій призводять до погіршення агрегатного складу та порушення водно-повітряного і теплового режимів кореневмісного шару ґрунту.

Дослідження О. В. Піковської [8] засвідчують, що за умов мінімального обробітку відзначено зростання вмісту агрономічно цінних агрегатів порівняно з традиційною оранкою.

О. М. Шомко та І. В. Давидова [11], досліджуючи деградовані території Українського Полісся, показали, що порушення ґрунтового покриву внаслідок відкритого видобування корисних копалин і вирубування лісів зумовлює втрату екологічної рівноваги, при цьому ріст і розвиток деревних порід безпосередньо залежать від гранулометричного складу та рівня родючості ґрунтів.

Наведені дослідження обмежуються аналізом табличних даних або побудовою кумулятивних кривих розподілу часток, що не забезпечує достатньої чутливості до ранніх стадій агрофізичної деградації за умов інтенсивного антропогенного навантаження. Це обґрунтовує доцільність пошуку кількісних методів діагностики, здатних відображати ієрархічну організацію ґрунтової маси та масштабні закономірності розподілу її елементів. У цьому контексті кумулятивний і фрактальний аналіз гранулометричного складу розглядаються як перспективний інструментарій, що забезпечує перехід від описової типології ґрунтів до кількісної оцінки ступеня впорядкованості їхньої структури [10].

Наукові положення, сформульовані В. В. Медведєвим, щодо провідної ролі гранулометричного складу у формуванні фізико-механічних властивостей ґрунтів і необхідності адаптації систем обробітку до їх фізичного стану, створюють теоретичне підґрунтя для впровадження фрактальної гранулометричної діагностики. Такий підхід дозволяє поєднати класичні уявлення про механічний склад ґрунту з сучасними кількісними методами аналізу його структурної організації. У цьому контексті кумулятивно-фрактальний аналіз гранулометричного складу розглядаються як перспективний інструментарій, що дає змогу перейти від описової типології ґрунтів до кількісної оцінки впорядкованості їхньої структури.

Мета роботи – розроблення методики фрактально-орієнтованої кількісної оцінки гранулометричного складу агроґрунтів для ідентифікації агрофізичної деградації та наукового обґрунтування адаптивних систем їх обробітку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Традиційно результати гранулометричного аналізу закінчуються табличними даними процентного вмісту окремих фракцій, і на їх підставі ґрунтам надають узагальнені класифікаційні назви – *піщані, суглинчані, легко- або важкосуглинкові тощо*. Такий описовий характер не забезпечує кількісної індивідуальної структурної впорядкованості, текстурної однорідності та деградаційного стану ґрунтового матеріалу, що обмежує можливості діагностики агрофізичних змін.

Для ілюстрації можливостей кумулятивно-фрактального аналізу використано результати гранулометричного та мікроагрегатного аналізу легкоглинистого (табл. 27) і легкосуглинкового ґрунтів (табл. 23), опубліковані в підручнику Булигіна С. Ю. та Вітвіцького С. В. [2]. Отримані дані модифіковано у вигляді відносного вмісту фракцій та представлені у таблицях 1 і 2.

Цінність обраного матеріалу полягає у поєднанні різноспрямованих факторів впливу – традиційної агротехніки, зрошення, а також відмінностей між лісовими ґрунтами та ріллею. Їх порівняння в межах класичної гранулометричної інтерпретації не дозволяє однозначно ідентифікувати відмінності між досліджуваними ґрунтами, що підтверджує обмежену діагностичну здатність суто табличного аналізу. Дані таблиць 1 і 2 були перетворені у кумулятивні суми (табл. 3 і 4). При цьому розмірні інтервали фракцій замінено їх середніми значеннями.

Таблиця 1. Гранулометричний склад легкоглинистого ґрунту (табл. 27)

Фактор впливу		Розмір фракцій, мм					
		>0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
I	1	0,103	0,308	0,145	0,083	0,161	0,193
	2	0,178	0,473	0,172	0,102	0,049	0,026
II	1	0,084	0,316	0,121	0,072	0,157	0,240
	2	0,126	0,376	0,202	0,193	0,067	0,036

Фактор впливу: I – загальноприйнята агротехніка, II – загальноприйнята агротехніка і зрошення слабо мінералізованими водами

Склад: 1 – гранулометричний, 2 – мікроагрегатний.

Таблиця 2. Гранулометричний склад легкосуглинкового ґрунту (табл. 23)

фон склад		Розмір фракцій, мм					
		>0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
I	1	0,024	0,120	0,564	0,041	0,098	0,161
	2	0,067	0,226	0,603	0,060	0,037	0,007
II	1	0,023	0,108	0,561	0,054	0,090	0,154
	2	0,050	0,146	0,625	0,078	0,053	0,027

Фон: I – ліс; II – рілля

Склад: 1 – гранулометричний, 2 – мікроагрегатний.

Таблиця 3. Кумулятивний склад фракцій легкоглинистого ґрунту

Фактор впливу		розмір фракцій, мм						D	R ²
		0,300	0,150	0,030	0,0075	0,003	0,0005		
I	1	1	0,890	0,582	0,437	0,354	0,193	0,251	0,99
	2	1	0,822	0,349	0,177	0,075	0,026	0,58	0,99
II	1	1	0,906	0,59	0,469	0,397	0,240	0,219	0,99
	2	1	0,874	0,498	0,296	0,103	0,036	0,524	0,99

Фактор впливу: I – загальноприйнята агротехніка,

II – загальноприйнята агротехніка і зрошення слабо мінералізованими водами

Склад: 1 – гранулометричний, 2 – мікроагрегатний.

Таблиця 4. Кумулятивний склад фракцій легкосуглинкового ґрунту

фон склад		розмір фракцій, мм						D	R ²
		0,300	0,150	0,030	0,0075	0,003	0,0005		
I	1	1,000	0,984	0,864	0,300	0,259	0,161	0,317	0,85
	2	1,000	0,933	0,707	0,104	0,044	0,007	0,747	0,75
II	1	0,990	0,967	0,859	0,298	0,244	0,154	0,323	0,85
	2	0,979	0,929	0,783	0,158	0,080	0,027	0,600	0,77

Фон: I – ліс; II – рілля

Склад: 1 – гранулометричний, 2 – мікроагрегатний.

На основі отриманих даних побудовано графіки (рис. 1). Отримані криві візуально засвідчують відмінності між ґрунтами, однак не дозволяють повною мірою охарактеризувати ієрархічну організацію гранулометричних фракцій та масштабну неоднорідність ґрунтової маси.

На рисунку 1а спостерігається практична ідентичність кривих 1 (після застосування загальноприйнятої агротехніки) та 2 (після зрошення). Така ситуація свідчить про недостатню диференційованість результатів і не дозволяє здійснити чітку інтерпретацію фізичних змін у структурно-елементному складі ґрунту, що підтверджує обмежену діагностичну чутливість кумулятивного аналізу. Аналогічний ефект простежується й на рисунку 1, б, де кумулятивні криві 1 та 2, відповідно для лісового та орного ґрунтових фонів, демонструють високий ступінь збігу, що також ускладнює диференціацію їхніх фізико-генетичних характеристик.

Значно вищий рівень інформативності дає подання результатів у логарифмічних координатах (рис. 2). Фрактальний аналіз реалізується шляхом апроксимації кумулятивних кривих у log–log координатах, де фрактальна розмірність виступає інтегральним показником упорядкованості гранулометричної структури. Кут нахилу кривих до осі абсцис визначає показник степені D апроксимувальної функції, який тут використовується як індекс фрактальності. Точність апроксимації оцінювали за коефіцієнтом детермінації R², числові значення якого наведено в таблицях 3 і 4. Високі значення R², отримані для даних таблиці 3, істотно контрастують із низькими значеннями

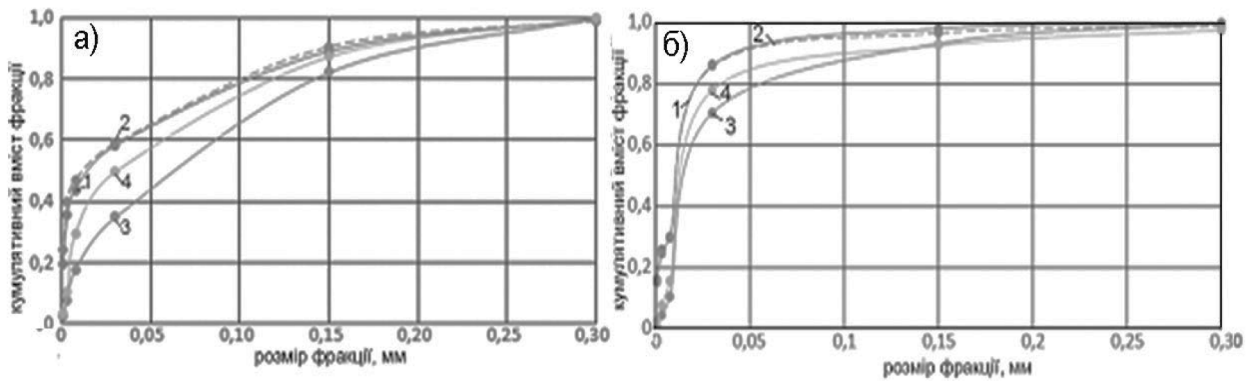


Рис. 1. Графіки кумулятивного складу гранулометричних фракцій:
а – легкоглинистого ґрунту різного використання; б – сірого лісового легкосуглинкового ґрунту

для таблиці 4, що може свідчити про наявність фізичної деградації ґрунту. Як видно з рисунка, структурно стабільні ґрунти характеризуються плавними залежностями близькими до степеневих (рис. 2 а), натомість механічно порушені – ламаними кривими з вираженими перегинами (рис. 2, б), що підтверджує наявність істотних відмінностей у структурній організації ґрунтів різного агрофізичного стану. Такі перегины відображають порушення ієрархічної організації часток та акумуляцію фракцій у критичних інтервалах розмірів. Зміна кривизни графіків укаже на існування масштабних порогів, що відповідають переходу від домінування первинної текстурної організації до вторинної агрегації, модифікованої антропогенним впливом. Порушення лінійності залежностей у $\log\text{-}\log$ координатах свідчить про нефрактальний характер розподілу елементів у окремих масштабних інтервалах, що доцільно розглядати як кількісний індикатор агрофізичної деградації ґрунту техногенного походження. З огляду на нелінійний характер графіків на рис. 2, визначення усередненої фрактальної розмірності D для всього діапазону фракцій є методично спрощеним підходом і може маскувати діагностично важливу інформацію.

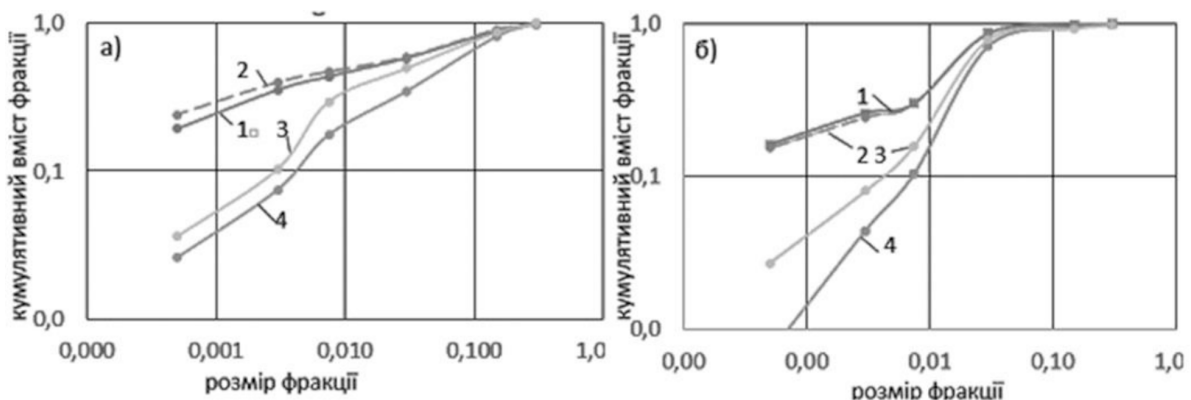


Рис. 2. Log–log-залежність кумулятивного вмісту фракцій від їх розміру, мм:
а – легкоглинистого ґрунту різного використання; б – сірого лісового легкосуглинкового ґрунту;
1 і 2 – гранулометричні фракції; 3 і 4 – мікроагрегатні фракції

У досліджуваних ґрунтах показник D змінюється залежно від масштабного інтервалу, що суперечить припущенню про фрактальну самоподібність у широкому діапазоні розмірів ґрунтових елементів. Саме порушення масштабної інваріантності доцільно розглядати як кількісний індикатор агрофізичної деградації, зокрема руйнування агрегатної ієрархії та втрати структурної цілісності. Для деградованих ґрунтів відхилення від фрактальної закономірності проявляється у зміні нахилу кривих і нестабільності значень D .

Висновки. Обґрунтовано ефективність кумулятивно-фрактального аналізу як екологічно орієнтованого інструменту діагностики фізичного стану ґрунтів. Запропонований підхід забезпечує кількісну оцінку структурної стабільності ґрунтового покриву та дає змогу своєчасно виявляти початкові прояви агрофізичної деградації, які не завжди фіксуються традиційними показниками.

Встановлено, що форма логарифмічних кумулятивних кривих гранулометричного складу є інформативним діагностичним критерієм для ідентифікації критичних масштабних інтервалів ґрунтових часток. Саме ці інтервали визначають особливості водно-повітряного режиму, структурну цілісність та екологічну функціональність ґрунтів.

Показано, що порушення лінійності $\log\text{-}\log$ -залежностей відображає нефрактальний характер структурної організації ґрунту в окремих масштабних діапазонах. Такі відхилення можуть розглядатися як надійний кількісний індикатор техногенно зумовленої деградації ґрунтів і свідчать про порушення їх ієрархічної структури під впливом антропогенних навантажень.

Перспективними напрямками подальших досліджень є:

- розширення застосування кумулятивно-фрактального аналізу на ґрунти різних генетичних типів і гранулометричних класів з метою уточнення універсальності отриманих діагностичних критеріїв;
- інтеграція фрактальних параметрів із показниками водопроникності, пористості та механічної стійкості агрегатів для комплексної оцінки екологічного стану ґрунтів;
- дослідження динаміки фрактальних характеристик у часовому аспекті з урахуванням змін землекористування та агротехнологій;

Список використаних джерел

1. Бережнюк Є. М., Наумовська О. І., Бережнюк М. Ф. Деградаційні процеси в ґрунтах України та їх негативні наслідки для довкілля. *Біологічні системи: теорія та інновації*. 2022. Т. 13, № 3–4. С. 96–109. [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014)
2. Булигін С. Ю., Вітвіцький С. В. Агрофізика ґрунту. Підручник. К. : Видавництво, 2021. 315 с.
3. Козішкурт С. М. Збереження родючості ґрунтів Полісся потребує локального моніторингу. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Технічні науки. 2014. Вип. 1. С. 19–26.
4. Медведєв В. В., Лактіонова Т. М. Гранулометричний склад ґрунтів України: генетичний, екологічний і агрономічний аспекти: монографія. Харків, 2011. 292 с.
5. Медведєв В. В., Пліско І. В. Теоретичні і прикладні аспекти прогнозування стану ґрунтового покриву. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 1 (814). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202101-01>
6. Медведєв В. В., Лактіонова Т. М. Агрофізична деградація ґрунтів. Родючість ґрунтів. Моніторинг та управління. Київ : Урожай, 1992. С. 80–90.
7. Медведєв В. В. Структура ґрунту як екологічний чинник. *Вісник Харківського національного аграрного університету*. 2009. Вип. 3. С. 25–31.
8. Піковська О. В. Вплив мінімізації обробітку ґрунту на структурний стан чорнозему звичайного. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Агрономія*. 2013. Вип. 183 (2). С. 193–197.
9. Пліско І. В., Уваренко К. Ю., Криlach С. І., Накісько С. Г. Закономірності прояву фізичної деградації в орних ґрунтах України та регіони підвищеного її ризику. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 10 (823). С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202110-01>
10. Човнок Ю. В., Броварець О. О. Використання методів фрактального аналізу довгострокових часових рядів для дослідження параметрів електропровідності ґрунтів сільськогосподарського призначення. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. № 3 (66), т. 2. С. 112–119.
11. Шомко О. М., Давидова І. В. Фізико-механічний склад ґрунтів рекультивованих територій після видобування ільменіту на Житомирському Поліссі. *Технічна інженерія*. 2022. № 1. С. 166–175. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-1\(89\)-166-175](https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-166-175)

Smilskyi V. V.

*Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Motor Transport,
Detachabled Subdivision*

*“Berezhany Professional College of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine”
Berezhany, Ukraine*

E-mail: fractalped@gmail.com

ORCID: 0009-0008-9837-812X

Pavliv O. V.

*Candidate of Veterinary Sciences,
Associate Professor at the Department of Ecology,
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
“Berezhany Agrotechnical Institute”
Berezhany, Ukraine*

E-mail: olegpavliv826@gmail.com

ORCID: 0009-0006-2970-1670

Stryhar M. I.

*Assistant at the Department of Machinery Use and Technologies in Agriculture,
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
“Berezhany Agrotechnical Institute”
Berezhany, Ukraine*

E-mail: nikolayyakovlev1996@gmail.com

ORCID: 0009-0002-7055-4810

FRACTAL ANALYSIS OF AGRICULTURAL SOILS FOR ASSESSMENT OF THEIR AGROPHYSICAL DEGRADATION

Abstract

The paper substantiates the applicability of fractal analysis of particle-size distribution for the quantitative assessment of agrophysical degradation of agricultural soils under intensive land use. It is shown that the conventional approach, in which particle-size composition is treated mainly as a classification characteristic, is methodologically limited and does not provide sufficient information on the physical condition of soils or the risks of degradation processes.

A combined cumulative and fractal analysis of soil particle-size distribution is proposed to quantify the structural organization of the soil mass. The study is based on granulometric data obtained by standard laboratory methods, followed by the construction of cumulative distribution curves and their analysis in logarithmic coordinates. Fractal parameters were determined from the slope of power-law relationships using linear regression, and the quality of approximation was evaluated to ensure the reliability of the obtained indicators.

The results demonstrate that the shape of cumulative curves and the characteristics of log-log dependencies reflect the degree of ordering of the granulometric structure and allow the identification of agrophysical degradation features, including disturbances of the hierarchical organization of soil structural elements. Deviations from fractal behavior of the particle-size distribution are shown to be a quantitative indicator of degradation changes caused by mechanical loading, soil compaction, and destruction of the aggregate structure.

The obtained findings confirm the feasibility of integrating granulometric studies with cumulative and fractal analysis for the scientific substantiation of adaptive soil tillage systems aimed at reducing agrophysical degradation and maintaining soil fertility. The proposed approach enables soil differentiation according to resistance to compaction and structural breakdown, as well as the identification of critical thresholds of anthropogenic pressure.

Key words: agrophysical degradation, particle-size distribution, cumulative analysis, fractal dimension, soil structural hierarchy.

References

1. Berezniak, Ye. M., Naumovska, O. I., Berezniak, M. F. (2022). Dehradatsiini protsesy v gruntakh Ukrainy ta yikh nehatyvni naslidky dlia dovkillia. [Degradation processes in the soils of Ukraine and their negative environmental impacts]. *Biologichni systemy: teoriia ta innovatsii – Biological Systems: Theory and Innovation*, vol. 13, no. 3–4, pp. 96–109. DOI: 10.31548/biologiya13(3-4).2022.014 [in Ukrainian].
2. Bulyhin, S. Yu., & Vitvitskyi, S.V. (2021). Ahrofizyka gruntu [Soil agrophysics]. Kyiv, Vydavnytstvo, 315 p. [in Ukrainian].
3. Kozishkurt, S. M. (2014). Zberezhennia rodiuchosti gruntiv Polissia potrebuie lokalnoho monitorynhu [Preservation of soil fertility in Polissia requires local monitoring]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Tekhnichni nauky – Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering. Technical Sciences*, issue 1, pp. 19–26 [in Ukrainian].
4. Medvediev, V. V., & Laktionova, T. M. (2011). Hranulometrychnyi sklad gruntiv Ukrainy: henetychnyi, ekolohichniy i ahronomichniy aspekty [Particle-size distribution of soils of Ukraine: Genetic, ecological and agronomic aspects]. Kharkiv, 292 p. [in Ukrainian].
5. Medvediev, V. V., & Plisko, I. V. (2021). Teoretychni i prykladni aspekty prohnozuvannia stanu gruntovoho pokryvu. [Theoretical and applied aspects of forecasting the state of soil cover.]. *Visnyk ahrarynoy nauky – Bulletin of Agricultural Science*, no. 1 (814), pp. 5–14. DOI: 10.31073/agrovisnyk202101-01 [in Ukrainian].
6. Medvediev, V. V., & Laktionova, T. M. (1992). Ahrofizychna dehradatsiia gruntiv. In: *Rodiuchist gruntiv [Agrophysical soil degradation. In Soil fertility. Monitoring and management]*. Kyiv, Urozhai, pp. 80–90 [in Ukrainian].
7. Medvediev, V. V. (2009). Struktura gruntu yak ekolohichniy chynnyk [Soil structure as an environmental factor]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu – Bulletin of Kharkiv National Agrarian University*, issue 3, pp. 25–31 [in Ukrainian].
8. Pikovska, O. V. (2013). Vplyv minimizatsii obrobitku gruntu na strukturnyi stan chornozemu zvychainoho [Influence of tillage minimization on the structural condition of typical chernozem]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya: Ahronomiia – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Agronomy*, issue 183 (2), pp. 193–197 [in Ukrainian].
9. Plisko, I. V., Uvarenko, K. Yu., Krylach, S. I., & Nakisko, S. H. (2021). Zakonomirnosti proiavu fizychnoi dehradatsii v ornykh gruntakh Ukrainy ta rehiony pidvyshchenoho yii ryzyku [Regularities of physical degradation manifestation in arable soils of Ukraine and regions of increased risk]. *Visnyk ahrarynoy nauky – Bulletin of Agricultural Science*, no. 10 (823), pp. 5–13. DOI: 10.31073/agrovisnyk202110-01 [in Ukrainian].
10. Chovnok Yu. V., & Brovarets O. O. (2018). Vykorystannia metodiv fraktalnogo analizu dovhostrokovykh chasovykh riadiv dlia doslidzhennia parametriv elektroprovodnosti gruntiv silskohospodarskoho pryznachennia [Application of fractal analysis methods of long-term time series to study soil electrical conductivity parameters]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, no. 3 (66), vol. 2, pp. 112–119 [in Ukrainian].
11. Shomko O. M., & Davydova I. V. (2022). Fizyko-mekhanichniy sklad gruntiv rekultyvovanykh terytorii pislia vydobuvannia ilmenitu na Zhytomyrskom Polissi [Physical and mechanical composition of soils in reclaimed areas after ilmenite mining in Zhytomyr Polissia]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering*, no. 1, pp. 166–175. DOI: 10.26642/ten-2022-1(89)-166-175 [in Ukrainian].

