

УДК 631.43:631.84

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.3.10>

ВПЛИВ СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ НА РОЗПОДІЛ КОЛОЇДНИХ ЧАСТИНОК ГУМІНОВИХ КИСЛОТ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ ДЕРВНОВО-ПІДЗОЛИСТОГО ҐРУНТУ

Скрильник Є.В. – доктор сільськогосподарських наук, професор,
завідувач лабораторії органічних добрив і гумусу,
Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства
та агрохімії імені О. Н. Соколовського»
orcid.org/0000-0002-8642-8547

Попірний М.А. – кандидат біологічних наук,
науковий співробітник лабораторії органічних добрив і гумусу,
Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства
та агрохімії імені О. Н. Соколовського»
orcid.org/0009-0002-0651-9324

Криlach С.І. – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник лабораторії органічних добрив і гумусу,
Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О. Н. Соколовського»
orcid.org/0000-0002-3347-6561

Кутова А.М. – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник лабораторії органічних добрив і гумусу,
Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О. Н. Соколовського»
orcid.org/0000-0003-2680-566X

У роботі досліджено вплив систем удобрення на розподіл нано- та субмікронних колоїдних частинок розчинів гумінових кислот органічної речовини дерново-підзолистого ґрунту, екстрагованих методом Тюріна у модифікації Пономарьової та Плотникової, визначених методом динамічного розсіювання світла. Встановлено їх взаємозв'язок зі стадіями гідрофобної гуміфікації органічної речовини ґрунту. Внесення органічних добрив сприяє активізації процесів новоутворення гумусу внаслідок інтенсивної біотрансформації свіжої органічної речовини, що супроводжується підвищенням полідисперсності та збільшенням частки дрібнодисперсних наноагрегатів гумінових кислот. Встановлено, що застосування органо-мінеральної системи удобрення сприяє підвищенню дисперсності та рухомості гумусової системи ґрунту, що проявляється у збільшенні вмісту популяції нано-частинок гумінових кислот із розмірами близько 20 нм. Такий розподіл частинок свідчить про закріплення процесів гуміфікації на початковій стадії активного новоутворення гумусових речовин. Натомість застосування органічного добрива у поєднанні із сидеральною культурою знижує дисперсність новоутвореного гумусу та зумовлює зміщення розподілу нано- і субмікронних частинок гумінових кислот у бік більших розмірів. Це може бути пов'язано зі зниженням інтенсивності мінералізації та посиленням гідрофобної агрегації, що зумовлює перехід процесів гуміфікації до зрілої стадії та підвищення стабільності новоутворених гумусових речовин. Отримані результати можуть слугувати основою для розроблення прогностичних моделей спрямованості та стадій гідрофобної гуміфікації органічної речовини ґрунту. На основі отриманих результатів запропоновано схематичну модель розподілу колоїдних частинок гумінових кислот ґрунту, що відповідає основним стадіям гуміфікації органічної речовини.

Ключові слова: система удобрення, органічна речовина ґрунту, гумінові кислоти, нано-частинки, гідрофобна гуміфікація.



© Скрильник Є.В., Попірний М.А., Криlach С.І., Кутова А.М., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Skrylnyk Ie.V., Popirny M.A., Krylach S.I., Kutova A.M. The Influence of Fertilization Systems on the Distribution of Colloidal Particles of Humic Acids in the Organic Matter of Sod-Podzolic Soil

The study investigates the influence of fertilization systems on the distribution of nano- and submicron colloidal particles in solutions of humic acids derived from the organic matter of sod-podzolic soil. The humic acids were extracted using the Tyurin method modified by Ponomareva and Plotnikova and analyzed by dynamic light scattering. Their relationship with the stages of hydrophobic humification of soil organic matter was established. The application of organic fertilizers promotes the activation of humus formation processes due to the intensive biotransformation of fresh organic matter, which is accompanied by increased polydispersity and a higher proportion of fine-dispersed nanoaggregates of humic acids. It was found that the use of an organo-mineral fertilization system enhances the dispersity and mobility of the soil humus system, manifested in an increased content of humic acid nanoparticles with sizes of about 20 nm. Such a particle size distribution indicates the stabilization of humification processes at the initial stage of active formation of humic substances. In contrast, the application of organic fertilizers in combination with a green manure crop reduces the dispersity of newly formed humus and causes a shift in the distribution of nano- and submicron humic acid particles toward larger sizes. This may be associated with a decrease in mineralization intensity and an increase in hydrophobic aggregation, leading to the transition of humification processes to a mature stage and enhancing the stability of newly formed humic substances. The obtained results can serve as a basis for developing predictive models of the direction and stages of hydrophobic humification of soil organic matter. Based on the findings, a schematic model of the distribution of humic acid colloidal particles corresponding to the main stages of organic matter humification is proposed.

Key words: *fertilization system, soil organic matter, humic acids, nanoparticles, hydrophobic humification.*

Постановка проблеми. Як відомо різні системи управління ґрунтом змінюють як кількість, так і якість органічної речовини ґрунту (ОРГ), впливаючи тим самим на процеси мікробної біотрансформації та фізико-хімічні і молекулярні властивості гумусових речовин (ГР), включаючи їх молекулярний розмір та розподіл маси [1-4]. Так методами проникаючої гель-хроматографії було встановлено, що природні ґрунти зазвичай містять вищу частку великих за розміром високомолекулярних гумінових фракцій, тоді як сільськогосподарські ґрунти, особливо за інтенсивного обробітку збагачуються переважно меншими за розмірами молекул низькомолекулярних фракцій гумінових кислот (ГК) [4]. Незважаючи на важливість оцінки колоїдного розміру супрамолекулярних агрегатів, детальний аналіз розподілу розмірів частинок у фракціях ГК із сільськогосподарських ґрунтів залишається обмеженим, значною мірою через нещодавнє використання сучасної техніки динамічного розсіювання світла (ДРС) порівняно з багаторічним застосуванням гель-хроматографії.

Тому дослідження спрямовані на вивчення розподілу колоїдних частинок нано- та субмікронного розміру у розчинах гумінових фракцій, екстрагованих з дерново-підзолистого ґрунту після тривалого внесення добрив, із застосуванням сучасної техніки ДРС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Успішне застосування фізико-хімічних характеристик ізольованих фракцій ГР ґрунту забезпечує цінний та деталізований підхід до оцінювання якості й динаміки гуміфікованої органічної речовини ґрунту (ОРГ) [5–7]. Сучасні дослідження ГР дедалі частіше потребують методів їх аналізу на нано- та субмікронному рівнях колоїдної організації, оскільки саме цей масштаб безпосередньо пов'язаний із первинними молекулярними та фізико-хімічними процесами гуміфікації та стабілізації ОРГ [8, 9]. Це дає змогу більш обґрунтовано прогнозувати, оцінювати та моніторити динаміку і якість гуміфікованої ОРГ як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі [10, 11].

Відповідно, актуальним напрямом у вивченні ОРГ є розробка та впровадження нових методів колоїдно-хімічного аналізу ГР.

Розроблення та ефективність методів дослідження ГР на колоїдному та молекулярному рівнях значною мірою визначаються сучасним станом розуміння їх молекулярної природи, а також встановленням взаємозв'язків між колоїдними й молекулярними характеристиками та процесами трансформації органічної речовини ґрунту (ОРГ) [5, 6, 11]. Водночас взаємозв'язок між колоїдно-дисперсними властивостями ізольованих фракцій ГР ґрунту та механізмами трансформації й гуміфікації ОРГ залишається недостатньо з'ясованим, що зумовлено складною, динамічною, гетерогенною та полідисперсною природою ГР [5, 9–12].

Згідно з новою супрамолекулярною парадигмою ГР, гуміфікація не розглядається як процес конденсаційної полімеризації з утворенням ковалентно-пов'язаних макромолекул великого розміру, а трактується як термодинамічно зумовлений процес селекції та самоорганізації відносно малих гетерогенних біомолекул. Ключовим фізико-хімічним механізмом цього процесу виступає гідрофобний ефект, який забезпечує ентропійно вигідну асоціацію амфіфільних молекул у водному середовищі та самозбірку супрамолекулярних агрегатів через слабкі нековалентні взаємодії (гідрофобні, π - π , водневі, ван-дер-ваальсові тощо) [12, 13].

Тривимірна структура супраагрегатів стабілізується завдяки впливу полярних функціональних груп на розчинник і представляє їх як сукупність молекул, розділених молекулами розчинника, а також невеликих щільно зв'язаних структур, утримуваних міцними водневими зв'язками. Такі структури здатні формувати великі супрамолекулярні агрегати через слабкі міжмолекулярні взаємодії за певних значень рН, іонної сили та концентрації [13, 14]. Внутрішня частина агрегатів демонструє гідрофобні властивості, що стабілізуються π -стекінгом між неполярними кільцями ароматичних структур. У результаті формується супрамолекулярна агрегація малих і середніх олігомерних фрагментів із молекулярною масою приблизно від 750 Да до 10 кДа. Гідрофобні супраструктурні збірки являють собою нанорозмірні сфероїдальні частинки (до 100 нм), які можуть додатково агрегуватися з утворенням супраструктурних агрегатів більшого розміру (понад 150 нм) і вищого рівня структурної організації [13]. Вуглеводи відіграють важливу гідрофільну роль, виконуючи функції ліотропних стабілізаторів гідрофобних структур та надаючи їм виражених гідрогелеподібних властивостей [13, 14]. У межах цього підходу ГР у розчинах розглядаються як сукупність динамічно-оборотних колоїдних супраагрегатів із діапазоном розмірів приблизно від 10–1000 нм до мікронного розміру залежно від концентрації, рН, іонної сили та інших факторів середовища [11, 15, 16].

У сучасному розумінні гідрофобна гуміфікація розглядається як фізико-хімічний процес спонтанного самозбирання гідрофобних та амфіфільних молекул у ґрунтовому розчині з подальшим їх фазовим витісненням із водної фази на поверхню дрібнодисперсних мінеральних частинок. У результаті спонтанної самозбірки міцелоподібних супрамолекулярних агрегатів відбувається формування нових гідрофобних центрів, які завдяки взаємній спорідненості акумулюють інші гідрофобні структури, утворюючи хімічно захищені від біодеградації мультисупрамолекулярні багатошарові структури гумусу. При цьому іони металів на поверхні мінералів виконують роль електростатичних екранів, організовуючи супрамолекулярні субодиниці в шари зі спадною полярністю [12]. Додатково стабільність супраагрегатів гумусу посилюється взаємодією з двовалентними та тривалентними катіонами (особливо кальцію та заліза), які широко представлені в ґрунтах і значною мірою сприяють довготривалій стабілізації ОРГ [9, 11, 12].

Гумінові кислоти (ГК) – водно-лужна фракція ГР, які представляють найбільш стійку гідрофобно-гуміфіковану частину ОРГ. Вони формуються переважно з гідрофобно-стабілізованих супрамолекулярних збірок ароматичних поліфенольних структур і ліпідних гідрофобних компонентів, що сприяють акумуляції та стабілізації гумусу й органічного вуглецю ґрунту [5, 6]. Представлення ГК у межах сучасної супрамолекулярної парадигми має важливі наслідки для розуміння процесів накопичення органічної речовини та вуглецю в ґрунтах, оскільки саме гідрофобні взаємодії значною мірою зумовлюють стабілізацію органо-мінеральних комплексів гумусу та структури ґрунту [11, 12]. Саме ГК визначають рівень, інтенсивність та спрямованість гідрофобної гуміфікації ОРГ. Тому дослідження їх колоїдно-дисперсних характеристик має не лише фундаментальне, але й важливе прикладне значення у контексті оцінювання, прогнозування та моніторингу гуміфікаційних процесів і якості гумусу агрогенних ґрунтів на наноколоїдному рівні організації.

У водних екосистемах і ґрунтових розчинах ГК здатні до самозбірки з утворенням функціонально стабільних колоїдних супраагрегатів, які можна розглядати як сукупності природних суб- та нанорозмірних супрамолекулярних структур [11, 15, 16]. Слабко- та середньоконцентровані водні розчини ГК, як правило, є гетерогенними та полідисперсними колоїдними системами з розподілом розмірів гумінових частинок або супраагрегатів у межах приблизно 20–1000 нм [15–18]. Тому розмір цих частинок виступає ключовим фізичним параметром рівня супрамолекулярної самоорганізації ГК і характеризує полідисперсність та гетерогенність виділених розчинів ГК на субмікронному та нанорозмірному рівнях колоїдної організації [11, 15–18].

Застосування техніки динамічного розсіювання світла (ДРС) є особливо цінним для визначення та оцінювання розподілу розмірів колоїдних супрамолекулярних агрегатів у ГР в ефективному діапазоні від 20 до 1000 нм [16–18]. Метод мікрореологічного відстеження нано- та субмікронних частинок за допомогою ДРС успішно використовується як новий сучасний інструмент дослідження молекулярної мікроорганізації та процесів самоагрегації ГР у розчинах [18, 19].

Методика досліджень. Дослідження проводили в лабораторії органічних добрив і гумусу ННЦ «ПА імені О. Н. Соколовського» в пробах ґрунту, відібраних у багаторічному польовому досліді, на території Волинської державної сільськогосподарської дослідної станції Інституту сільського господарства Західного Полісся НААН України, що розташована в селищі Рокині Луцького району Волинської області в природно-кліматичній зоні Полісся. Ґрунт дослідної ділянки – дерново-слабокідзолістий глинисто-піщаний, класифікований за міжнародною системою WRB як Albic Arenosols. Дослід було закладено у 1990 р. Для досліджень обрано такі варіанти: А – контроль (без внесення добрив); Б – органо-мінеральна система удобрення (гній 10 т/га + $N_{60}P_{37}K_{50}$) та В – органічна система удобрення (гній 10 т/га) у поєднанні із сидератами (редька олійна і пелюшка).

Фракції гумінових кислот (ГК) були отримані згідно методики Тюріна в модифікації Пономарьової та Плотникової за ДСТУ 7828-2015 [20], що дозволяє виділити зрілу гумінову фракцію органічної речовини ґрунту, стабілізовану кальцієвими зв'язками. Виділення проводили шляхом декальцинації ґрунтового зразка та подальшої її лужної екстракції, осадження гумінових кислот при рН 1 та їх повторного розчинення у 0,1-н розчині NaOH та подільшого центрифугування за 6000 об/хв 15 хв для відділення органо-мінеральних домішків тощо.

Розміри колоїдних частинок гумінових кислот визначали методом динамічного розсіювання світла за допомогою приладу Zetasizer Nano ZS Malvern Instruments

ZEN3600 за постійної температури 25 °С. Довжина хвилі лазера становила 632,8 нм, кут розсіяного світла – 173°. Вимірювання проводили в полістирольних кюветах. Кожне вимірювання повторювали тричі, кожне з яких є середнім по 10 пробігам (повторюваність вимірювання, яку встановлюють за допомогою програмного забезпечення). За його результатами отримували середні дані зі стандартним відхиленням (визначається за застосування програмного забезпечення) і встановлювали напівширину інтервалу невизначеності з використанням статистичних формул за t-критерієм Стьюдента з довірчою вірогідністю 95%.

Результати досліджень. Розглядаючи всі типи розподілу розмірів колоїдних частинок досліджуваних гумусових розчинів (за інтенсивністю, об'ємом та кількістю), встановлено, що ГК, есктраговані з ґрунту за умов застосування добрив, характеризувалися переважанням значної кількості дрібнодисперсних частинок із гідродинамічним діаметром <100 нм. Натомість розчин ГК із ґрунту без внесення добрив (контроль) мав переважно мономодальний розподіл і містив значну кількість частинок діаметром близько 150 нм. Як відомо, у лужному середовищі частинки або агрегати ГК схильні до формування колоїдних структур, що характеризуються наявністю переважно дрібних частинок нано- та субмікронного розміру (від 10 до 100 нм і від 100 до 1000 нм відповідно) [17, 18].

На рисунку 1 наведено розподіл розмірів частинок за об'ємом (by volume) у виділених розчинах ГК ґрунту за різних систем удобрення. За умов застосування добрив спостерігається формування бімодального розподілу частинок у розчинах ГК, що зумовлено появою вираженого піку популяції наночастинок із розмірами до 100 нм.

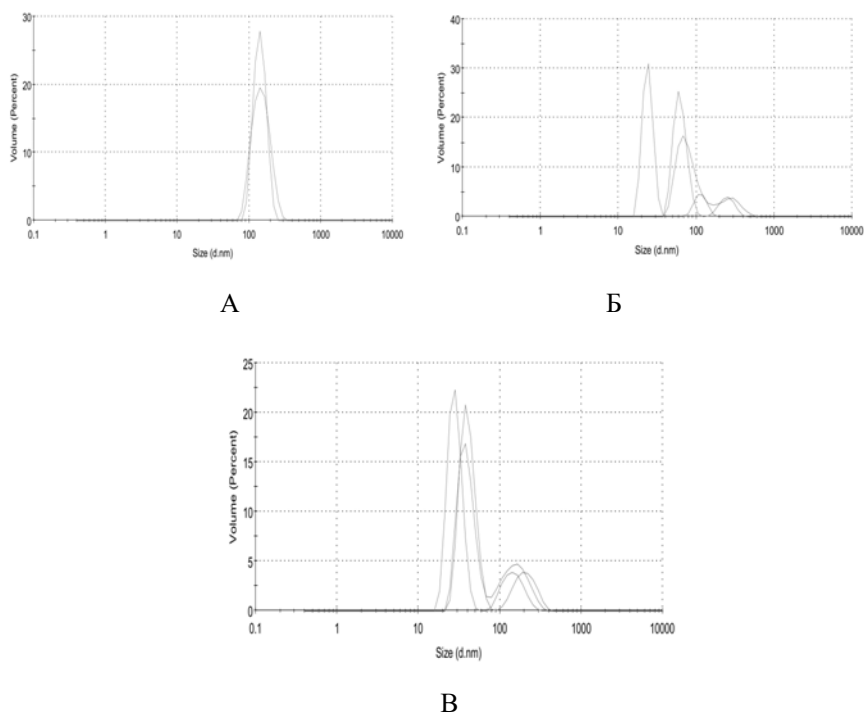


Рис. 1. Розподіл розмірів частинок за об'ємом (by volume) виділених розчинів ГК з ґрунту: контроль (А), органо-мінеральна система удобрення (Б) та органічна система удобрення (В)

Оскільки розподіл частинок за кількістю (by number) був мономодальним, кількість великих частинок, які займають значно більший об'єм, виявилася дуже незначною. Тому для детального аналізу розподілу розмірів колоїдних частинок у розчинах ГК було використано об'ємний розподіл (by volume). Подібний підхід застосували Есфাহані та ін., які на основі об'ємного розподілу частинок виявили три популяції частинок у розчинах фульвокислот (ФК) і ГК (Aldrich): 10–100, 100–1000 нм та >1 мкм [16]. Запропонована класифікація також була ефективно використана у подальших дослідженнях колоїдної мікроорганізації та міжмолекулярної агрегації гумінових розчинів у роботах M.J.M. Wells, M.R. Esfahani, M. Klusakova та інших авторів [15–19].

Детальний розподіл розмірів частинок за об'ємним параметром у всіх досліджених гумінових системах ґрунту, згідно з підходом M.R. Esfahani та ін. [16], разом з індексом полідисперсності (ПДІ) наведено в таблиці 1 та на рисунку 2. Встановлено, що за умов застосування добрив відбувається підвищення індексу ПДІ розчинів ГК та поява вираженого піку популяції наночастинок (табл. 1). Водночас встановлено збільшення гідродинамічного розміру популяцій субмікронних частинок і наночастинок у розчинах ГК ґрунту за умов застосування органічного добрива та сидерату.

Таблиця 1

Індекс полідисперсності (ПДІ) та розмір (гідродинамічний діаметр, нм) за об'ємним розподілом колоїдних частинок ГК виділених з ґрунту

Варіант	ПДІ	Пік 1 субмікрочастинок	Пік 2 наночастинок
Контроль (А)	0,373	150	-
Органо-мінеральна система удобрення (Б)	0,720	114	23
Органічна система удобрення (В)	0,401	161	40

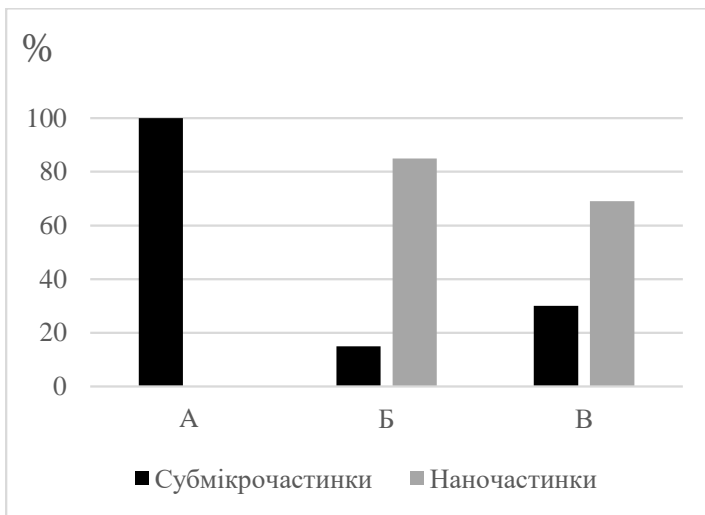


Рис. 2. Вміст (%) популяції субмікрочастинок та наночастинок розчинів ГК з ґрунту: контроль (А), органо-мінеральна система удобрення (Б) та органічна система удобрення (В)

Встановлено, що застосування добрив призводить до збільшення частки популяції наночастинок у розчинах ГК (рис. 2). За органо-мінеральної системи удобрення виявлено найвищий вміст (85 %) найбільш дрібних за розміром (23 нм) наночастинок у розчині ГК, що зумовило суттєве підвищення індексу полідисперсності (ПДІ) до 0,720. Водночас за застосування органічного добрива та сидерату спостерігається зниження частки наночастинок до 69 %, проте відбувається збільшення їх розміру до 40 нм. При цьому також відзначено зростання вмісту (до 30 %) і розміру популяції субмікронних частинок (до 161 нм).

За результатами аналізу встановлено підвищення загального вмісту ГР, що відбувається переважно за рахунок збільшення вмісту вуглецю ФК у ґрунті за умов застосування органічних добрив (таблиця 2).

Таблиця 2

Вміст вуглецю гумусових речовин за різного удобрення

Варіант	Сгк	Сфк	Сзаг
	%		
Контроль (А)	0,09	0,15	0,24
Органо-мінеральна система удобрення (Б)	0,07	0,19	0,26
Органічна система удобрення (В)	0,06	0,20	0,26

Органічні добрива сприяли активізації процесів біотрансформації ОРГ, що зумовило інтенсивне новоутворення ГР зі збільшенням частки фракції ФК. Це пояснюється тим, що в дерново-підзолистих ґрунтах у складі гумусу переважають саме фульвокислоти. Відомо, що ФК представлені переважно низькомолекулярними ароматичними структурами меншого розміру з підвищеним вмістом окиснених функціональних груп [6, 12]. Стабілізація їх дрібних супрамолекулярних збірок відбувається головним чином завдяки водневим зв'язкам між оксигеновмісними функціональними групами, що зумовлює їх високу гідрофільність і кислотність у ґрунтовому середовищі [6, 11].

Активне новоутворення та самоорганізація супраагрегатів ГР ґрунту під впливом органічних добрив супроводжується високим вмістом популяції наночастинок розміром до 100 нм. Амфифільні компоненти ГК здатні до самоорганізації у наноструктуровані композити, що впливає на їх реакційну здатність і мікробну мінералізацію. При цьому складні самоорганізовані надмолекулярні збірки ГК більшого розміру, як правило, розкладаються мікроорганізмами легше, ніж дрібніші структурно впорядковані надмолекулярні комплекси [3]. За органо-мінеральної системи удобрення мінеральні компоненти можуть посилювати процеси мінералізації ОРГ, що зумовлює формування та високий вміст дрібних наночастинок розміром близько 20 нм і зміщує розподіл новоутворених супрамолекулярних агрегатів ГК у бік менших розмірів. Водночас зниження інтенсивності мінералізації ОРГ за умов застосування органічного добрива у поєднанні із сидератом сприяє збільшенню розміру субмікронних і наночастинок ГК, що, відповідно, зумовлює зміщення розподілу новоутворених супрамолекулярних агрегатів у бік більших розмірів.

Добре відомо, що розміри колоїдних агрегатів ГР значною мірою визначають рухомість і реакційну здатність гуминової системи ґрунту [15–19]. Рухомість будь-якої колоїдної частинки істотно залежить від її розміру: зокрема, для глобулярних частинок коефіцієнт дифузії зменшується пропорційно квадрату їх діаметра [18]. Зменшення розміру або підвищення дисперсності частинок ГР сприяє зростанню

рухомості гумусової системи та слабшому закріпленню органічної речовини у ґрунтовому профілі. Натомість гідрофобна молекулярна агрегація частинок ГР, що супроводжується збільшенням розміру колоїдних агрегатів, може приводити до зниження їх рухомості та потенційного закріплення органічної речовини у ґрунтовому профілі.

Таким чином, органо-мінеральна система удобрення дерново-підзолистого ґрунту підвищує дисперсність і рухомість гумусової системи ОРГ за рахунок високого вмісту популяції наночастинок ГК розміром близько 20 нм, що свідчить про консолідацію процесів гуміфікації на початковій стадії активного новоутворення ГР. Водночас застосування органічного добрива у поєднанні із сидератом знижує дисперсність гумусової системи ОРГ та зміщує розподіл субмікронних і наночастинок ГК у бік більших розмірів, що може бути пов'язано з переходом процесів гуміфікації до більш зрілої стадії та підвищенням стабільності новоутворених ГР.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати досліджень можуть слугувати основою для розробки прогностичних моделей спрямованості та стадій гідрофобної гуміфікації ОРГ, використовуючи розподіл колоїдних частинок ГК як базовий параметр динамічного стану супрамолекулярних агрегатів.

Органічні добрива сприяють активному новоутворенню гумусу через інтенсивну біотрансформацію свіжої органічної речовини, що супроводжується підвищенням полідисперсності (ПДІ) та збільшенням мілкодисперсних популяцій наноагрегатів. Зниження інтенсивності мінералізації може стимулювати перехід до зрілої стадії гуміфікації та сприяти стабілізації гумусу у вигляді більших за розмірами колоїдних частинок.

На основі результатів досліджень запропоновано схематичну модель розподілу колоїдних частинок гумінових розчинів ґрунту, що відповідає основним стадіям гуміфікації ОРГ.

Примітка. Публікація підготовлена за підтримки Міністерства освіти і науки України в рамках виконання наукового дослідження «Комплексне наукове дослідження інноваційних рішень з відновлення ґрунтів та запобігання їхньої деградації з метою поліпшення екологічного стану регіонів України».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Drosos M., Piccolo A. The molecular dynamics of soil humus as a function of tillage. *Land Degradation & Development*. 2018. Vol. 29 (6). P. 1792-1805. <https://doi.org/10.1002/ldr.2989>.
2. The impact of long-term field experiments under different cropping systems on the molecular dynamics and stability of the soil Humeome / C. Savarese et al. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2022. Vol. 331. 107928. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107928>
3. Khalaf M.M.R., Chilom G., Rice J.A. Comparison of the effects of self-assembly and chemical composition on humic acid mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 73. P. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.02.013>
4. Chromatographic characteristics (HPLC, HPSEC) of humic acids of soil fertilised with various organic fertilisers / B. Debska et al. 2010. Vol. 26. P. 49–57. <https://doi.org/10.1080/02757540.2010.501027>
5. Using Humic Fractions to Understand Natural Organic Matter Processes in Soil and Water: Selected Studies and Applications / D.C. Olk et al. *Journal of Environmental Quality*. 2019. Vol. 48 (6). P. 1633–1643. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0100>.
6. Characterization of Soil Organic Matter Individual Fractions (Fulvic Acids, Humic Acids, and Humins) by Spectroscopic and Electrochemical Techniques in Agricultural Soils / A. Ukalska-Jaruga et al. *Agronomy*. 2021. Vol. 11 (6). 1067. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061067>.

7. Quantitative Approaches in Assessing Soil Organic Matter Dynamics for Sustainable Management / Y.T. Murindangabo et al. *Agronomy*. 2023. Vol. 13 (7). 1776. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071776>
8. Exploring the Macroscopic Properties of Humic Substances Using Modeling and Molecular Simulations / Y. Escalona et al. *Agronomy*. 2023. Vol. 13 (4). 1044. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041044>.
9. Soil organic matter stabilization at molecular scale: The role of metal cations and hydrogen bonds / E. Galicia-Andr es et al. *Geoderma*. 2021. Vol. 401. 115237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115237>.
10. Saito S. Separation approaches towards understanding supramolecular aggregate formation of humic acid. *Analytical Sciences*. 2022. Vol. 38. P. 233–234. <https://doi.org/10.1007/s44211-021-00020-3>.
11. Humic substances: From supramolecular aggregation to fractal conformation—Is there time for a new paradigm? / R. Angelico et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13 (4). 2236. <https://doi.org/10.3390/app13042236>
12. Piccolo A., Drosos M. The supramolecular structure of the soil humeome and the significance of humification. *Advances in Agronomy*. 2024 Vol. 188. P. 405-455. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.06.006>.
13. Supramolecular aggregation of colloidal natural organic matter masks priority pollutants released in water from peat soil / L. Pontoni et al. *Environmental Research*. 2021. Vol. 195. 1107612021. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110761>
14. Recent Developments on the Three-Dimensional Structure of Dissolved Organic Matter: Toward a Unified Description / K.E. Norris et al. *Environmental Science & Technology*. 2025 Vol. 59 (6). P. 2928-2936. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c09627>
15. Wells M.J.M. Supramolecular answers to the organic matter controversy. *Journal of Environmental Quality*. 2019. Vol. 48 (6). P. 1644–1651. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0089>.
16. Esfahani M.R., Stretz H.A., Wells M.J. Abiotic reversible selfassembly of fulvic and humic acid aggregates in low electrolytic conductivity solutions by dynamic light scattering and zeta potential investigation. *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 537. P. 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.001>
17. Klucakova M., Veznikova K. Micro-organization of humic acids in aqueous solutions. *Journal of Molecular Structure*. 2017. Vol. 1144. P. 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.05.012>
18. Klucakova M. Size and charge evaluation of standard humic and fulvic acids as crucial factors to determine their environmental behavior and impact. *Frontiers in Chemistry*. 2018. Vol. 6. 235. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00235>
19. Self-aggregation of soil humic acids with respect to their structural characteristics / U.D. Jovanović et al. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2022. Vol. 87 (6). P. 761–773. DOI:10.2298/JSC211125010J
20. Якість ґрунту. Визначення групового та фракційного складу гумусу за методом Тюріна у модифікації Пономарьової та Плотникової: ДСТУ 7828:2015. [Чинний від 22.06.2015]. Київ: Держспоживстандарт України, 2015. 9 с.

Дата першого надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026