

PACS numbers: 81.07.Wx, 83.80.Nb, 89.60.Ec, 91.62.Rt, 91.62.Mn, 91.65.Rg, 92.40.Lg

Зв'язок між наночастинками глинистих мінералів і забрудненням ґрунту: перспективи для екологічної стійкості

О. М. Семерня¹, О. І. Любинський¹, І. В. Федорчук¹,
Н. М. Гордій¹, О. С. Тютюнник¹, В. Г. Слободяник²

¹Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка,
вул. Огієнка, 61,

32302 Кам'янець-Подільський, Україна

²Українська академія друкарства,

вул. Під Голоском, 19,

79000 Львів, Україна

У статті розглядається можливість використання наночастинок глинистих мінералів для поліпшення екологічної стійкості ґрунту та зменшення ризику його забруднення, що є важливим завданням у сучасній науці й екології загалом. Забруднення ґрунту є серйозною проблемою, яка може негативно впливати на здоров'я людей, тварин та екосистем в цілому. У статті розглядається вплив наночастинок на фізико-хімічні властивості ґрунту, зокрема на його здатність утримувати воду та хімічні речовини, які можуть стати джерелом забруднення. Досліджується прогнозована можливість використання наночастинок глинистих мінералів для зменшення ризику забруднення ґрунту токсичними металами й іншими шкідливими речовинами, що може стати ефективним способом поліпшення екологічної стійкості ґрунту. Розробка такої теми уможливорює зрозуміти механізми взаємодії між наночастинками та ґрунтом і розробити нові технології (зокрема як елементи зелених нанотехнологій) для очищення, збереження та захисту ґрунту, зменшення забруднення навколишнього середовища в умовах сьогодення, щоб досягти значного прогресу в зменшенні негативного впливу людської діяльності на природу.

In this article, the possibility of using clay mineral nanoparticles to improve the ecological stability of soil and to reduce the risk of soil pollution is discussed. Soil pollution is a serious problem that can have a negative impact on human and animal health, ecosystems. Research on the use of clay mineral nanoparticles to improve the ecological stability of soil is an important topic in modern science and ecology. In this article, the influence of nanoparticles on the physical and chemical properties of soil, particularly, on its ability to retain water and chemicals, which can be a

source of pollution, is examined. The possibility of using clay mineral nanoparticles to reduce the risk of soil pollution with toxic metals and other harmful substances is also investigated. The prognostic results of the investigation show that the use of clay mineral nanoparticles can be an effective way to improve the ecological stability of soil and reduce its pollution. The results of the study demonstrate that the use of clay mineral nanoparticles can be an effective way to enhance soil ecological stability and reduce contamination, making this topic an essential area of research for addressing environmental challenges. The investigation of this topic can help to understand the mechanisms of interaction between nanoparticles and soil and to develop new technologies for preserving and protecting the environment. This article is important for the scientists-ecologists, as the authors of the article extensively examine the potential use of clay mineral nanoparticles for the preservation and protection of the environment. The prognostic results of research show that the use of clay mineral nanoparticles can be an effective way to improve the ecological stability of soil. The researching this topic can help to understand the mechanisms of interaction between nanoparticles and soil and to develop new technologies for conservation and protection of the environment. This article offers a new perspective on the use of clay mineral nanoparticles for soil and environmental protection that can make significant progress in reducing the negative impact of human activity on nature, can help to identify the most effective ways to use clay mineral nanoparticles for soil remediation and reducing environmental pollution.

Ключові слова: зелені нанотехнології, глинисті мінерали, наночастинки, забруднення ґрунту, токсичні метали, екологічна стійкість.

Key words: green nanotechnologies, clay minerals, nanoparticles, soil pollution, toxic metals, ecological sustainability.

(Отримано 7 квітня 2023 р; після доопрацювання — 10 квітня 2023 р.)

1. ВСТУП

У сучасному світі нанотехнології — швидко розвивана галузь, що має потенціал революціонізувати різні наукові дисципліни, включаючи ґрунтову екологію. Забруднення ґрунту — це серйозна екологічна проблема, що загрожує екологічному балансу нашої планети. Наночастинки глиноземних мінералів завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям проявилися як перспективний інструмент для очищення забруднених ґрунтів.

Метою даного дослідження є вивчення взаємозв'язку між наночастинками глиноземних мінералів і забрудненням ґрунту та дослідження перспектив використання цих наночастинок для екологічної сталості. Конкретно: ми будемо досліджувати механізми взаємодії наночастинок глиноземних мінералів із забруд-

нювачами в ґрунті та чинники, які впливають на їхню ефективність в очищенні. Крім того, ми оцінимо можливі ризики, пов'язані з використанням цих наночастинок для очищення ґрунту, та запропонуємо стратегії для безпечного й ефективного використання їх. Одержані результати дослідження мають значні наслідки для прогнозованої розробки сталих рішень у боротьбі з забрудненням ґрунту, що є важливим кроком до досягнення екологічної стабільності.

Зелені нанотехнології є важливим напрямом досліджень, оскільки вони уможливають зменшити вплив діяльності людей на навколишнє середовище й забезпечити сталий розвиток. Упровадження наночастинок глинистого ґрунту для очищення земель є одним з прикладів застосування зелених нанотехнологій.

Ці технології можуть бути використані для очищення забруднених земель внаслідок хемічної або промислової діяльності. Наночастинки глини взаємодіють з різними забруднювальними речовинами й утворюють з ними комплекси, що можуть бути легко видалені з ґрунту.

Така технологія є ефективною, оскільки забезпечує очищення ґрунту від забруднювальних речовин без використання шкідливих хемікатів. Вона може бути використана для відновлення здоров'я ґрунту та підвищення родючості. Впровадження такої технології може допомогти зменшити вплив людської діяльності на навколишнє середовище та підтримати сталий розвиток.

2. ТЕОРЕТИЧНА ЗНАЧИМІСТЬ

З аналізу літературних джерел [1–13] з'ясовано, що глинистий ґрунт — це тип ґрунту, що містить значну кількість глинистих мінералів, таких як каолінит, смектит та ілліт. Глинисті мінерали мають дуже маленький розмір частинок (зазвичай менше 2 мікрометрів); це означає, що вони мають велику поверхню порівняно для даного об'єму. Ця велика поверхня робить глинисті мінерали високореактивними та здатними взаємодіяти з матеріалами з інших речовин, включаючи наночастинки. Глинистий ґрунт є предметом досліджень багатьох вчених з різних галузей науки, таких як геологія, ґрунтознавство, екологія, біологія та інші. До провідних дослідників глинистого ґрунту відносяться наступні учені:

Ширлі Дж. Гендрікс — американська дослідниця-ґрунтознавець, яка проводила дослідження стосовно збереження ґрунтів і землеустрою в Службі сільськогосподарських досліджень Міністерства сільського господарства США [1];

Ерік Ліштфузе — французький біолог, який проводив дослідження взаємочину глинистих мінералів і бактерій у ґрунті в

Китаї [2];

Жозеф Бове — французький мікробіолог, який вивчав також молекулярні аспекти фізичних і хемічних властивостей глинистого ґрунту [3];

Девід Шімел — американський еколог, який займався біохемічним дослідженням екосистем і взаємочину ґрунту з рослинами та тваринами [4].

За літературними даними [1–13] наночастинки — це частинки, які мають розмір від 1 до 100 нанометрів. Вони широко використовуються в різних застосуваннях, включаючи медицину, електроніку та відновлення довкілля. Відповідні наночастинки можуть взаємодіяти з ґрунтом і впливати на його властивості, включаючи здатність утримувати воду, поживні речовини та забруднення.

Дослідження наночастинок є широким полем науки; тож перелік учених, які займалися цією темою, є достатньо великим. Одними з провідних науковців у дотичній галузі нанотехнологій і дослідження наночастинок можна виділити таких учених:

Пітер Деннінг — американський дослідник в області комп'ютерних і нанотехнологій та безпеки [5];

Стівен Брюк — американський дослідник в галузі нанотехнологій і біофізики [6];

Ґабор Горняк — відомий американський науковець у галузі нанотехнологій [7];

Ральф Ріштер — провідний французький дослідник наночастинок і використання їх у біології та медицині [8];

Клаус Саттлер — американський дослідник в галузі нанотехнологій і наноматеріалознавства, автор численних статей і наукових праць [9];

Марк Ратнер — провідний американський учений в галузі нанотехнологій і наноматеріалознавства, молекулярної електроніки [10].

Взаємозв'язок між швидкістю руху води через ґрунт і гідравлічною провідністю ґрунту можна описати за допомогою формули моделю ґрунту, який є загальним для екології ґрунту; на основі аналізу літературних джерел (див., наприклад, [14]):

$$Q = KA \frac{\Delta h}{L}, \quad (1)$$

де Q [м/с] — це швидкість руху води через ґрунт, K [м⁻¹·с⁻¹] — гідравлічна провідність ґрунту, A [м²] — поперечний переріз зразка ґрунту, Δh [м] — різниця рівня води між двома точками в ґрунті, L [м] — довжина зразка ґрунту.

Коли до глинистого ґрунту додають наночастинки, вони можуть взаємодіяти з глинистими мінералами та змінювати властивості ґрунту, включаючи його гідравлічну провідність. Наноча-

стинки можуть заповнювати пори між глиняними частинками, зменшуючи здатність ґрунту утримувати воду та збільшуючи його гідравлічну провідність. Це може впливати на швидкість руху води через ґрунт, як описано формулою моделю ґрунту.

Наночастинки глиноземних мінералів досліджуються широко стосовно потенціалу їх для відновлення забруднених ґрунтів. Одним із механізмів взаємочину між цими наночастинками та забрудненням ґрунту є адсорбція. Адсорбція — це процес, у якому частинки прилипають до поверхні. Наночастинки глиноземних мінералів мають високий показник відношення поверхневої площі до об'єму, що робить їх високоактивними та здатними адсорбувати забруднювачі. Коли ці наночастинки глиноземних мінералів додають до забрудненого ґрунту, вони можуть прив'язатися до забруднювачів і видалити їх з ґрунту. Ефективність цього методу залежить від різних чинників, таких як тип забруднювача, концентрація розчину наночастинок глиноземних мінералів, властивості ґрунту, час контакту між наночастинками та ґрунтом. Експериментальні дослідження учених показали [11], що наночастинки глиноземних мінералів є вельми ефективними для видалення важких металів, таких як оливо, кадмій і мідь, з ґрунту.

Іншим способом взаємочину між наночастинками глиноземних мінералів і забрудненням ґрунтів є хемічні реакції. Наночастинки глиноземних мінералів можуть реагувати з певними забрудненнями, такими як органічні забруднювачі, шляхом реакцій окиснення або відновлення, перетворюючи їх на менш шкідливі сполуки. Використання наночастинок глиноземних мінералів для відновлення ґрунтів зараз ще активно досліджуються й оптимізуються. Хоча потенційні переваги цього методу є багатообіцяльними, необхідними є подальші дослідження, щоб повністю зрозуміти ефективність і потенційні ризики, пов'язані з використанням цих наночастинок у рекультивації ґрунту.

Формула взаємозв'язку між наночастинками глиноземного ґрунту та рівнем його забруднення може мати різні варіації в залежності від конкретного контексту дослідження й використовуваних параметрів. Та основною формулою, яку можна використовувати для опису цього взаємозв'язку (див., наприклад, [14]), є

$$C = \left(\frac{N}{L} + \frac{M}{V} \right) R, \quad (2)$$

де C [кг/м³] — концентрація забруднювальної речовини в ґрунті, N [кг/м²] — кількість забруднювальної речовини, що потрапила в ґрунт, L [м] — довжина зразка ґрунту, M [кг] — маса ґрунту, в якому знаходиться забруднення, V [м³] — об'єм ґрунту, в якому знаходиться забруднення, R — коефіцієнт взаємочину між наночастинками глинозему та забруднювальною речовиною (безрозмі-

рна величина). Ця формула відображає залежність концентрації забруднювальної речовини в ґрунті від кількості забруднення, що потрапило у ґрунт, маси й об'єму ґрунту, а також коефіцієнта взаємочину між наночастинками глинозему та забруднювальною речовиною. Останній коефіцієнт може бути визначений експериментально та залежить від фізико-хімічних властивостей наночастинок і забруднювальної речовини.

Приклади застосування формули (2):

- для оцінки масштабів забруднення ґрунту в конкретному регіоні за даними про кількість забруднювальної речовини, що потрапила в ґрунт, і масу ґрунту, в який потрапило забруднення;
- для розробки ефективних методів очищення ґрунту від забруднення на основі даних про коефіцієнт взаємочину між наночастинками глинозему та забруднювальною речовиною;
- для проведення порівняльної аналізи забруднення ґрунту різними речовинами на основі даних про коефіцієнти взаємочину між наночастинками глинозему та кожною з речовин.

Наночастинки глинистих мінералів можуть бути використані для зменшення ризику забруднення ґрунту токсичними металами й іншими шкідливими речовинами шляхом адсорбції цих речовин на поверхні глинистих частинок. Глинисті мінерали мають велику поверхню для заданого свого об'єму, що забезпечує високу ефективність адсорбції.

Подільські глиноземи є одним з прикладів глинистих мінералів, які можуть бути використані для зменшення забруднення ґрунту. Ці глиноземи містять значну кількість оксидів Алюмінію та Силіцію, які є ефективними адсорбентами для багатьох токсичних металів та інших шкідливих речовин. Наприклад, наші дослідження показали, що подільські глиноземи можуть бути використані для зменшення концентрації кадмію, олова та інших токсичних металів у ґрунті. Ці глиноземи можуть бути додані до забрудненого ґрунту в якості адсорбенту, що дасть змогу зменшити ризик токсичних ефектів на рослини та тварини, які ростуть на цьому ґрунті.

Прикладом використання наночастинок глинистих мінералів для зменшення ризику забруднення ґрунту є використання монтморилоніту, який є одним з найбільш поширених глинистих мінералів на Землі. Монтморилоніт може бути використаний для зменшення концентрації токсичних металів, наприклад кадмію, міді й олова, в ґрунті. Для цього монтморилоніт може бути доданий до ґрунту як адсорбент, що забезпечує взаємодію з токсичними металами й іншими шкідливими речовинами та зменшує їхню концентрацію.

Одним з таких прикладів було дослідження, проведене в Китаї [12], де використовували монтморилоніт для зменшення забруд-

нення ґрунту токсичними металами, що походили від виробництва олива. Результати показали, що додавання монтморилоніту до ґрунту понизило концентрацію олива.

Отже, за аналізою відповідних літературних джерел [1–14], методика зменшення забруднення ґрунту за допомогою наночастинок глинистих мінералів і оцінки ризиків буде така:

1. визначення типу ґрунту та його забруднення: перед застосуванням наночастинок глинистих мінералів для зменшення забруднення ґрунту треба визначити тип ґрунту та види забруднень;
2. вибір наночастинок глинистих мінералів: вибір таких наночастинок залежить від типу ґрунту та видів забруднень; наночастинок глини можуть бути використані для зменшення присутності важких металів, пестицидів та інших забруднювачів;
3. підготовка наночастинок глинистих мінералів: наночастинок глини попередньо піддаються обробленню, щоб вони стали більш ефективними у зменшенні забруднення ґрунту; це оброблення може включати мелювання, сушіння, просіювання й інші технології;
4. нанесення наночастинок на ґрунт: після підготовки наночастинок їх можна наносити на забруднений ґрунт за допомогою різних методів, таких як розпорошення, розсипання або внесення (втілення) до ґрунту;
5. моніторинг і оцінка результатів: після нанесення наночастинок глинистих мінералів на ґрунт треба періодично проводити оцінку ризиків і моніторинг, щоб визначити ефективність методу та внести корективи до процесу, якщо це потрібно; моніторинг може включати в себе аналізу ґрунту на забруднення, визначення показників якості води й інші дослідження.

3. ПРАКТИЧНА ЗНАЧИМІСТЬ

Наночастинок глинистих мінералів — за своїм визначенням, це дуже маленькі частинки глини, розмір яких зазвичай менше 100 нанометрів. Наночастинок глини можуть мати різну форму та склад, але загалом вони складаються з мінералів, таких як каолінит, монтморилоніт, ілліт, хлорит та ін. Наприклад, оглядаючи літературні джерела, визначили, що:

1. монтморилоніт — це глинистий мінерал, що використовується в косметичці, фармації та харчовій промисловості, наприклад, як загусник, стабілізатор і засіб зволоження;
2. каолінит — це білий глинистий мінерал, що використовується в керамічній і паперовій промисловостях, косметичці, фармації;
3. хлорит — це зелений глинистий мінерал, що використовується в бурінні свердловин, та може бути використаний і в косметичці;
4. ілліт — це глинистий мінерал, що містить багато кремнію,

алюмінію й інших мінералів і використовується в бурінні свердловин.

Аналізуючи карти ґрунтів України з сайту [13], можна визначити кілька параметрів, таких як тип ґрунту, його родючість, глибина ґрунту та інші.

За даними карти найбільша область з глиновмісними землями розташована на півночі України та включає у себе території Чернігівської (рис. 1), Сумської (рис. 2) та Полтавської (рис. 3) обла-

ЧЕРНІГІВСЬКА ОБЛАСТЬ

Всі ґрунти



Рис. 1. Ґрунти Чернігівської області.¹

СУМСЬКА ОБЛАСТЬ

Всі ґрунти



Рис. 2. Ґрунти Сумської області.²

ПОЛТАВСЬКА ОБЛАСТЬ
 Всі ґрунти



Рис. 3. Ґрунти Полтавської області.³

стей. Ці області відзначено на карті темно-сірим кольором і позначено як «чорноземи, глинисті».

Найбільше забруднення ґрунтів в Україні, не враховуючи чинників війни, — це перенасичення орних земель міндобривами. Перенасичення орних земель міндобривами призводить до пониження родючості ґрунту та забруднення підземних вод. Це негативно впливає на якість продуктів харчування та загальний екологічний стан країни.

Адсорбція землями мінералів є одним із методів очищення перенасичених орних земель від міндобрив. Після адсорбції землю можна орати, щоб понизити рівень мінералів, або знімати верхній шар землі та переробляти його іншими способами, щоб відновити родючість ґрунту та поліпшити екологічний стан землі.

У теоретичній частині статті ми навели формули, які визначають міри забруднень ґрунтів і мінералів. Застосуємо їх для практичних розрахунків.

На основі табличних даних (табл.) побудуємо графік взаємозв'язку між швидкістю руху води через ґрунт і гідравлічною провідністю ґрунту; як видно з рис. 4, швидкість руху води через

ТАБЛИЦЯ. Результати досліджень для глинистого ґрунту.⁴

№	$A, \text{ м}^2$	$\Delta h, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$Q = Q(K)$
1	0,25	0,5	0,1	$1,25 \text{ м}^2 \cdot K$
2	0,5	1	0,3	$1,67 \text{ м}^2 \cdot K$
3	1	2	0,5	$4 \text{ м}^2 \cdot K$
4	2	3,5	0,7	$10 \text{ м}^2 \cdot K$
5	5	5	1	$25 \text{ м}^2 \cdot K$

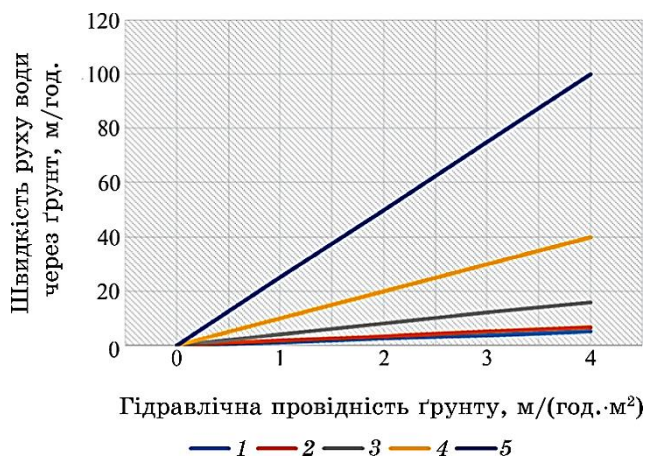


Рис. 4. Взаємозв'язок між швидкістю руху води через ґрунт і гідравлічною провідністю ґрунту.⁵

ґрунт прямо пропорційна гідравлічній провідності ґрунту. Стосовно наночастинок глинистих мінералів це означає, що насичений водою ґрунт швидше буде адсорбувати й очищатися.

Зв'язок між наночастинками глинистих мінералів і забрудненням ґрунту полягає в тому, що глинисті мінерали здатні утримувати в собі багато різних забруднювальних речовин, таких як важкі метали, пестициди й інші отруйні сполуки.

Наночастинки глинистих мінералів мають велику поверхню, що підвищує їхню здатність до зберігання забруднювальних речовин. Отже, дослідження зв'язку між наночастинками глинистих мінералів і забрудненням ґрунту має важливу практичну значимість для забезпечення екологічної безпеки та збереження якості ґрунту для сільськогосподарського виробництва.

5. ВИСНОВКИ

Зв'язок між наночастинками глинистих мінералів і забрудненням ґрунту є важливою проблемою, що має глобальні перспективи для підвищення екологічної стійкості. Такі наночастинки можна використовувати для видалення забруднювальних речовин з ґрунту, зменшення ризику поширення забруднення на водні ресурси й пониження токсичності для рослин і тварин.

Згідно з аналізом літературних джерел [1–14], одним з промислових застосувань наночастинок глинистих мінералів є створення нанокомпозитів для поліпшення якості ґрунту. Нанокомпозити можуть бути створені шляхом нанесення глинистих наночастинок на поверхню різних матеріалів, таких як пісок, глина то-

що. Наночастинки глини уможливають підвищити водоперепускність ґрунту, збільшити його пористість і вбирність вологи, що поліпшує якість ґрунту та понижує ризик його ерозії.

Крім того, глинисті наночастинки можуть бути використані для біоремедіації ґрунту, що забруднений токсичними речовинами. Глинисті мінерали здатні зв'язувати забруднювальні речовини та зменшувати їхню токсичність, що понижує ризик їхнього поширення на довкілля та ризик для здоров'я людини.

Використання нанокомпозитів і біоремедіація ґрунту за допомогою глинистих наночастинок можуть понижувати екологічне навантаження на природне середовище та забезпечувати стійкий розвиток. Однак, перед застосуванням наночастинок глинистих мінералів для біоремедіації ґрунту, потрібно провести дослідження їхньої безпеки щодо впливу на довкілля, оскільки велика концентрація наночастинок може виявитися шкідливою для живих організмів.

У цілому, використання наночастинок глинистих мінералів має великий потенціал для підвищення екологічної стійкості та зменшення негативного впливу людини на навколишнє середовище. Подальші дослідження в цьому напрямі можуть сприяти розвитку більш стійких технологій і підвищенню якості ґрунту, що є пріоритетним елементом для збереження біорізноманітності та забезпечення екосистемних послуг.

Підкреслимо, що розвиток зелених технологій, зокрема зелених нанотехнологій, є провідним напрямом для збереження природних ресурсів і зменшення негативного впливу людської діяльності на довкілля. Використання наночастинок глинистого ґрунту для очищення земель від шкідливих речовин є одним зі способів досягнення цієї мети. Цей метод має переваги перед іншими методами очищення, такі як ефективність і низька вартість. Проте необхідно продовжувати дослідження в цій області для вивчення можливих негативних наслідків використання наночастинок і для підвищення ефективності технології. У цілому, зелені нанотехнології можуть стати ключовим інструментом для досягнення сталого розвитку та збереження природних ресурсів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. J. C. Cain, Sh. J. Hendricks, R. A. Langel, and W. V. Hudson, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **19**, No. 4: 335 (1967); https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgg1949/19/4/19_4_335/_pdf/-char/ja
2. Shiqing Gu, Xiaonan Kang, Lan Wang, Eric Lichtfouse, and Chuanyi Wang, *Environmental Chemistry Letters*, **17**, No. 2: 629 (2019); <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0813-9>
3. J. M. Bové, *Clinical Infectious Diseases*, **17**, Suppl. 1: S10 (1993); <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4b576f3>

- [6586fb364eb007ede328b618ebfb7300e](https://doi.org/10.2307/1941328)
4. D. Schimel, M. A. Stillwell, and R. G. Woodmansee, *Ecology*, **66**, Iss. 1: 276 (1985); <https://doi.org/10.2307/1941328>
 5. Peter J. Denning, *The Invisible Future: The Seamless Integration of Technology into Everyday Life* (New York: McGraw-Hill: 2001).
 6. Steven R. J. Brueck, *Proceedings of the IEEE*, **93**, No. 10: 1704 (2005); [doi:10.1109/JPROC.2005.853538](https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.853538)
 7. Gabor L. Hornyak, H. F. Tibbals, Joydeep Dutta, and John J. Moore, *Introduction to Nanoscience and Nanotechnology* (Boca Raton, FL: CRC Press: 2008); <https://doi.org/10.1201/9781420047806>
 8. R. Richter, A. Mukhopadhyay, and A. Brisson, *Biophysical Journal*, **85**, No. 4: 3035 (2003); [DOI:10.1016/S0006-3495\(03\)74722-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(03)74722-5)
 9. *Handbook of Nanophysics: Principles and Methods* (Ed. Klaus D. Sattler) (Boca Raton, Florida: CRC Press: 2010); <https://doi.org/10.1201/9781420075410>
 10. Daniel Ratner and Mark A. Ratner, *Nanotechnology and Homeland Security: New Weapons for New Wars* (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR: 2004); <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108551887>
 11. D. N. Williams, K. A. Gold, T. R. P. Holoman, Sh. H. Ehrman, and O. C. Wilson Jr., *Journal of Nanoparticle Research*, **8**, Iss. 5: 749 (2006); <https://doi.org/10.1007/s11051-006-9084-7>
 12. Peng Li, Y. Li, L. Xu, H. Zhang, X. Shen, H. Xu, J. Jiao, H. Li, and F. Hu, *Geoderma*, **403**: Article 115197 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115197>
 13. *SuperAgronom: Karta Gruntiv Ukrainy* [Map of Soils of Ukraine] (2023) (in Ukrainian); <https://superagronom.com/karty/karta-gruntiv-ukrainy>
 14. M. L. Zotsenko, V. I. Kovalenko, A. V. Yakovliev, O. O. Petrakov, V. B. Shvets, O. V. Shkola, S. V. Bida, and Yu. L. Vynnykov, *Inzhenerna Geologiya. Mekhanika Gruntiv, Osnovy i Fundamenty* [Engineering Geology. Soil Mechanics, Bases and Foundations] (Poltava: PNTU: 2003) (in Ukrainian).

¹ Ivan Ohienko Kamianets-Podilskyi National University,
61, Ohienko Str.,

UA-32302 Kamianets-Podilskyi, Ukraine

²Ukrainian Academy of Printing,

19, Pid Holoskom Str.,

UA-79000 Lviv, Ukraine

¹ Fig. 1. Soils of Chernihiv region.

² Fig. 2. Soils of Sumy region.

³ Fig. 3. Soils of Poltava region.

⁴ TABLE. Research results for clay soil.

⁵ Fig. 4. Relationship between water flow rate through soil and hydraulic conductivity of soil.