

УДК 504.53.062.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.149.1.34>

ЦЕЛЮЛОЗОЛІТИЧНА АКТИВНІСТЬ ТА ЩІЛЬНІСТЬ ҐРУНТІВ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ ЗА ГРАДІЄНТОМ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Бедункова О.О. – д.б.н., професор,
професор кафедри екології, технології захисту навколишнього середовища
та лісового господарства,
Національний університет водного господарства та природокористування
orcid.org/0000-0003-4356-4124

Ціпан Ю.Р. – аспірант кафедри екології, технології захисту навколишнього
середовища та лісового господарства,
Національний університет водного господарства та природокористування
orcid.org/0000-0001-7279-7416

У статті представлено результати дослідження целюлозолітичної активності ґрунтів лісових екосистем південно-східної частини Волинського Полісся за градієнтом антропогенного навантаження. Метою роботи було встановлення закономірностей зміни інтенсивності біодеструкції органічної речовини залежно від характеру впливу та визначення ролі щільності ґрунту як одного з факторів, що обумовлює ці процеси. Дослідження виконано на чотирьох ділянках, що відрізняються рівнем антропогенного навантаження (контроль, рекреаційна зона, постпірогенна територія та ділянка після суцільної рубки). Целюлозолітичну активність визначали методом розкладання лляної тканини, а щільність ґрунту за стандартною методикою відбору зразків із ненарушеною структурою. Встановлено, що досліджуваний показник характеризується вираженою сезонною динамікою з максимальними значеннями в літній період та мінімальними у зимовий. Найвищі значення целюлозолітичної активності зафіксовано на ділянці з помірним рекреаційним навантаженням, тоді як на ділянках із інтенсивним порушенням ґрунтового покриву та за відсутності антропогенного впливу показник був нижчим. Це свідчить про нелінійний характер реакції ґрунтових процесів на антропогенне навантаження. Встановлено, що щільність ґрунту змінюється як у просторі, так і в часі, досягаючи максимальних значень у зимовий період. Показано, що зв'язок між целюлозолітичною активністю та щільністю ґрунту має сезонно залежний характер: у період активізації біологічних процесів він посилюється, тоді як за узагальненими даними практично відсутній. Отримані результати підтверджують доцільність комплексного використання фізичних і біологічних показників для оцінки функціонального стану ґрунтів та їх реакції на антропогенне навантаження.

Ключові слова: біологічна активність ґрунту, щільність ґрунту, лісові екосистеми, антропогенне навантаження, ґрунти Полісся.

Biedunkova O.O., Tsipan Yu.R. Cellulolytic activity and bulk density of forest soils along an anthropogenic load gradient

The article presents the results of a study of cellulolytic activity in soils of forest ecosystems in the southeastern part of Volyn Polissya along an anthropogenic load gradient. The aim of the work was to establish patterns of change in the intensity of biodegradation of organic matter depending on the nature of the impact and to determine the role of soil density as a factor influencing these processes. The study was carried out on four areas that differ in the level of anthropogenic load (control, recreational zone, post-pyrogenic territory, and area after clear-cutting). Cellulolytic activity was determined by the method of decomposition of linen



© Бедункова О.О., Ціпан Ю.Р., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

fabric, and soil density by the standard method of sampling with an undisturbed structure. It was established that the studied indicator is characterized by pronounced seasonal dynamics with maximum values in the summer and minimum values in the winter. The highest values of cellulolytic activity were recorded on the site with moderate recreational load, while on sites with intensive disturbance of the soil cover and in the absence of anthropogenic impact, the indicator was lower. This indicates the nonlinear nature of soil processes' response to anthropogenic load. It was established that soil density varies both in space and time, reaching maximum values in the winter period. It was shown that the relationship between cellulolytic activity and soil density is seasonally dependent: during the period of activation of biological processes it increases, while according to generalized data it is practically absent. The obtained results confirm the feasibility of the comprehensive use of physical and biological indicators to assess the functional state of soils and their reaction to anthropogenic load.

Key words: biological activity of soil, soil density, forest ecosystems, anthropogenic load, soils of Polissya.

Вступ. У сучасних умовах посилення антропогенного впливу на лісові екосистеми особливої актуальності набуває оцінка не лише їх структурних характеристик, а й функціонального стану ґрунтового покриву як ключового компонента біогеохімічних циклів. Одним із найбільш чутливих інтегральних показників функціонування ґрунтових мікробних угруповань є целюлозолітична активність, що відображає інтенсивність деструкції рослинних решток і, відповідно, процеси трансформації органічної речовини. В умовах антропогенного навантаження, яке змінює фізичні, хімічні та біологічні властивості ґрунту, відбувається перебудова мікробного ценозу та трансформація швидкості біодеструкційних процесів. Водночас характер цих змін не є лінійним і може суттєво варіювати залежно від інтенсивності впливу та особливостей екосистеми, що зумовлює необхідність дослідження целюлозолітичної активності саме в контексті градієнта антропогенного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних екологічних дослідженнях оцінка біологічної активності ґрунтів розглядається як один із ключових підходів до визначення їх функціонального стану та стійкості до антропогенних впливів [1]. Особливе місце серед таких показників займає целюлозолітична активність, яка відображає інтенсивність розкладання рослинних решток і, відповідно, швидкість кругообігу органічної речовини в екосистемах [2]. Встановлено, що процеси деструкції целюлози відіграють важливу роль у формуванні гумусу, регуляції вуглецевого циклу та підтриманні родючості ґрунтів [3].

Численні дослідження свідчать, що рівень целюлозолітичної активності визначається комплексом абіотичних і біотичних чинників, серед яких провідне значення мають температура, вологість, кислотність середовища, вміст органічної речовини та структура мікробних угруповань [4; 5]. Разом із тим дедалі більше уваги приділяється фізичним характеристикам ґрунту, зокрема його щільності, яка безпосередньо впливає на пористість, аераційний режим і доступність органічного субстрату для мікроорганізмів [6]. Зміни щільності ґрунту можуть як обмежувати, так і частково стимулювати мікробіологічні процеси, що зумовлює необхідність розгляду цього показника у взаємозв'язку з біологічною активністю.

У контексті антропогенного навантаження встановлено, що різні форми впливу (рекреаційне використання територій, транспортне навантаження, вирубки, пожежі) спричиняють трансформацію як фізичних, так і біологічних властивостей ґрунтів. Більшість дослідників відзначає загальну тенденцію до зниження целюлозолітичної активності за умов інтенсивного впливу, що пояснюється пригніченням мікробного ценозу та деградацією органічного горизонту [2; 7]. Водночас у ряді робіт показано, що за помірного антропогенного навантаження можливе

підвищення активності внаслідок часткового порушення підстилки та збільшення доступності субстрату [8]. Подібні результати вказують на нелінійний характер реакції ґрунтових процесів на антропогенний вплив, що може бути пов'язано, зокрема, зі змінами щільності ґрунту.

Разом із тим, незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених біологічній активності ґрунтів, питання взаємозв'язку між целюлозолітичною активністю та фізичними характеристиками ґрунту, зокрема щільністю, у межах градієнта антропогенного навантаження залишається недостатньо вивченим. Це обумовлює необхідність одночасного аналізу целюлозолітичної активності та щільності ґрунту для виявлення закономірностей їх взаємодії та більш повного розуміння механізмів трансформації ґрунтових процесів в умовах антропогенного навантаження.

Мета, завдання та методики проведення досліджень. Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни целюлозолітичної активності ґрунтів лісових екосистем південно-східної частини Волинського Полісся за різного рівня антропогенного навантаження та визначення ролі щільності ґрунту як одного з факторів, що обумовлює ці зміни.

Дослідження виконували на території лісових масивів, розташованих у межах суборів південно-східної частини Волинського Полісся. Для аналізу було відібрано чотири ділянки, що відрізняються за характером та інтенсивністю антропогенного впливу, але мають подібні ґрунтово-лісівничі умови.

Перша ділянка (50°54'24.6" N, 26°29'45.5" E) приурочена до території, прилеглої до автомобільної дороги, і характеризується вираженим рекреаційним навантаженням. На її площі наявні облаштовані місця для відпочинку, спостерігаються ознаки трансформації лісової підстилки, локальні осередки засмічення та сліди використання відкритого вогню.

Друга ділянка (50°47'53.0" N, 27°03'58.4" E) розміщена в межах лісництва і слугує умовно еталонною, оскільки не зазнає помітного антропогенного впливу. Тут збережено природну структуру рослинного покриву та підстилки, відсутні ознаки механічного порушення ґрунтового шару.

Третя ділянка (50°50'44.4" N, 26°56'30.0" E) представлена лісовою територією, що перебуває на ранній стадії постпірогенної сукцесії, через 2 роки після пожежі середньої інтенсивності. Для неї характерні первинне часткове вигорання підстилки, зміни структури поверхневого горизонту та помітні процеси відновлення рослинності.

Четверта ділянка (50°48'05.1" N, 27°05'21.4" E) сформована в умовах після суцільної рубки деревостану. Тут спостерігається відсутність зімкнутого полог, порушення підстилкового шару та ознаки механічного впливу на ґрунт.

Усі досліджувані ділянки мають дерново-середньопідзолисті, поверхнево-оглеєні ґрунти суглинкового гранулометричного складу. Деревостан розріджений, із домінуванням сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) та наявністю підліску природного походження з листяних порід. Тип лісорослинних умов – В₂ (свіжі субори).

Целюлозолітичну активність ґрунту визначали методом розкладання целюлозовмісного матеріалу (ляного полотна) [9]. Зразки тканини стандартного розміру закладали у ґрунт на глибину 5-10 см на досліджуваних ділянках та витримували протягом визначеного періоду (30 діб). Після експозиції зразки вилучали, очищали від ґрунту, висушували до постійної маси та визначали втрату маси.

Інтенсивність розкладання целюлози оцінювали за відсотком втрати маси зразка від початкової:

$$A = ((m_1 - m_2) / m_1) \times 100\% \quad (1)$$

де А – целюлозолітична активність, %; m_1 – початкова маса зразка, г; m_2 – маса зразка після експозиції, г.

Щільність ґрунту (об'ємну масу) визначали методом відбору зразків із непо-рушеною структурою за допомогою металевих кілець відомого об'єму (100 см³) [10]. Зразки відбирали з верхнього гумусового горизонту (0-10 см) у триразовій повторності на кожній ділянці.

Відібрані зразки висушували до постійної маси при температурі 105 °С, після чого визначали масу сухого ґрунту. Щільність розраховували за формулою:

$$\rho = m / V \quad (2)$$

де ρ – щільність ґрунту, г/см³; m – маса сухого ґрунту, г; V – об'єм зразка, см³.

Отримані значення усереднювали для кожної ділянки.

Первинну обробку експериментальних даних, їх систематизацію у табличній формі та візуалізацію результатів здійснювали засобами MS Excel. Статистичний аналіз виконували за допомогою програмного пакета Statistica 8.0 [11].

Виклад основного матеріалу дослідження.

Аналіз описової статистики целюлозолітичної активності ґрунту свідчить про виражену сезонну динаміку та суттєві відмінності між досліджуваними ділянками (табл. 1).

Таблиця 1

Описова статистика результатів оцінювання целюлозолітичної активності ґрунту (%) на досліджуваних лісових ділянках

Номер досліджуваної ділянки	Статистичні показники за сезонами (n=3)				
	Mean	Minimum	Maximum	Coef.Var.	Standard Error
Літо					
1	42,77	27,03	68,94	53,37	13,18
2	19,29	12,74	26,85	36,86	4,11
3	20,72	19,29	21,96	6,49	0,78
4	15,83	7,75	25,61	57,15	5,22
Осінь					
1	25,99	20,73	29,45	17,8	2,673
2	10,68	1,37	23,77	109,3	6,738
3	15,40	14,24	16,81	8,5	0,751
4	8,68	0,72	13,11	79,6	3,986
Зима					
1	9,44	1,03	17,1	85,3	4,65
2	6,01	5,15	7,6	22,4	0,78
3	4,24	2,07	6,8	56,4	1,38
4	5,42	3,66	7,1	31,5	0,99
Весна					
1	21,76	21,11	22,47	3,13	0,394
2	8,44	0,19	19,13	114,88	5,601
3	11,21	10,48	11,66	5,73	0,371
4	14,23	11,76	16,33	16,19	1,330

Найвищі середні значення показника зафіксовано в літній період, особливо на ділянці 1 (42,77), що значно перевищує відповідні значення на інших ділянках. У цей період також спостерігається значна варіабельність результатів, зокрема на ділянках 1 та 4 (коефіцієнт варіації понад 50%), що може свідчити про неоднорідність умов середовища або активність мікробіоти. В осінній період рівень целюлозолітичної активності знижується на всіх ділянках, однак ділянка 1 зберігає лідируючі позиції. Водночас на ділянках 2 і 4 відзначається дуже високий коефіцієнт варіації (до 109,3%), що вказує на нестабільність процесів розкладу органічної речовини. У зимовий період зафіксовано мінімальні значення активності на всіх ділянках, що є очікуваним з огляду на зниження температури та пригнічення мікробіологічних процесів. Навесні спостерігається відновлення активності, особливо на ділянці 1 (21,76), при цьому варіабельність показників зменшується, що свідчить про стабілізацію біологічних процесів у ґрунті.

Загалом для всіх ділянок характерна чітка сезонна динаміка з максимумом у літній період та мінімумом узимку, що очевидно обумовлено температурним режимом і вологозабезпеченням ґрунтів (рис. 1).

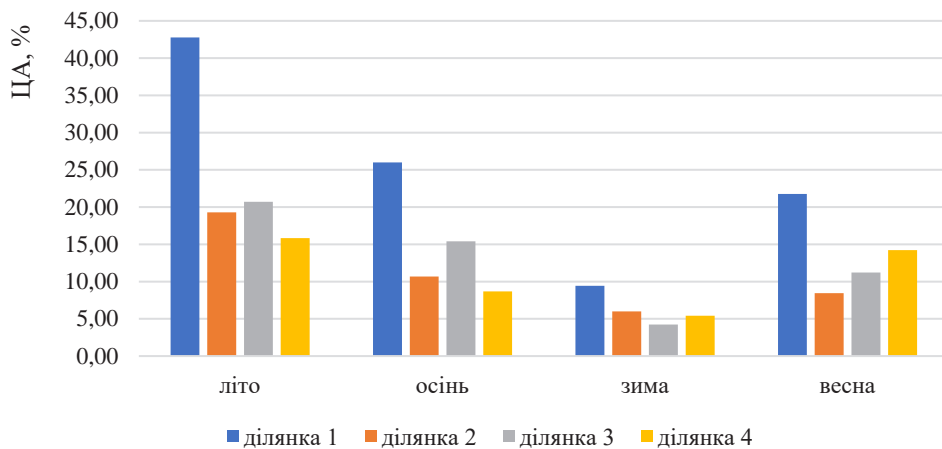


Рис. 1. Сезонні зміни целюлозолітичної активності ґрунтів досліджуваних ділянок

Так, найвищі значення ЦА зафіксовано в літній період, зокрема на ділянці № 1, де показник сягав 42,77%, що суттєво перевищує відповідні значення на інших ділянках. Для цієї ж ділянки було характерне збереження відносно високого рівня активності і в інші сезони (25,99% восени, 21,76% навесні), тоді як мінімум спостерігався взимку (9,44%).

На контрольній ділянці № 2 рівень целюлозолітичної активності був помірним у всі сезони та коливався в межах 6,01-19,29%, демонструючи загальну тенденцію до зниження від літа до зими з подальшим частковим відновленням навесні. Подібна сезонна закономірність простежувалася і для ділянки № 3, однак тут абсолютні значення показника були дещо нижчими, що може свідчити про вплив постпірогенних змін на активність мікробного ценозу.

Найнижчі або близькі до мінімальних значення ЦА у більшості сезонів були характерні для ділянки № 4 (після суцільної рубки), особливо в осінній та зимовий

періоди (8,68% і 5,42% відповідно), що вказує на пригнічення процесів деструкції органічної речовини в умовах порушення ґрунтового покриву.

Як відомо, сезонні коливання вологості та температурного режиму ґрунту змінюють його щільність, що може додатково впливати на рівень целюлозолітичної активності. Зокрема, аналіз показників щільності ґрунту свідчить про чітко виражену сезонну динаміку та відмінності між досліджуваними ділянками (табл. 2).

Таблиця 2

**Описова статистика результатів оцінювання щільності ґрунту
на досліджуваних лісових ділянках**

Номер досліджуваної ділянки	Статистичні показники за сезонами (n=3)				
	Mean	Minimum	Maximum	Coef.Var.	Standard Error
Літо					
1	1,35	1,27	1,41	5,3	0,04
2	1,10	0,95	1,20	12,0	0,08
3	1,25	1,24	1,27	1,4	0,01
4	1,30	1,28	1,33	2,0	0,02
Осінь					
1	1,48	1,47	1,50	1,03	0,01
2	1,19	1,17	1,22	2,22	0,02
3	1,33	1,28	1,35	3,05	0,02
4	1,39	1,36	1,42	2,16	0,02
Зима					
1	1,64	1,57	1,68	3,58	0,03
2	1,26	1,24	1,27	1,22	0,01
3	1,40	1,37	1,43	2,19	0,02
4	1,50	1,47	1,53	2,03	0,02
Весна					
1	1,56	1,54	1,58	1,28	0,01
2	1,24	1,22	1,25	1,24	0,01
3	1,37	1,35	1,39	1,52	0,01
4	1,41	1,38	1,44	2,13	0,02

У літній період значення щільності ґрунту варіюють у межах 1,10-1,35 г/см³. Найвищі середні значення зафіксовано на ділянці 1 (1,35 г/см³), тоді як найменші були визначені на ділянці 2 (1,10 г/см³). Водночас коефіцієнт варіації є відносно невисоким (1,4-12,0%), що свідчить про загальну однорідність показників у межах ділянок.

В осінній період спостерігається підвищення щільності ґрунту на всіх ділянках, особливо на ділянці 1 (до 1,48 г/см³). При цьому варіабельність значень суттєво знижується (C_v від 1,03 до 3,05%), що вказує на стабілізацію структури ґрунту.

Максимальні значення щільності характерні для зимового періоду, де на ділянці 1 показник досягає 1,64 г/см³. Загалом у цей сезон відзначається найвищий рівень ущільнення ґрунту на всіх ділянках, що пов'язано з дією низьких

температур і зменшенням біологічної активності. Варіабельність показників залишається низькою, що свідчить про стабільність умов.

Навесні відбувається незначне зниження щільності ґрунту порівняно із зимою, однак значення залишаються вищими, ніж у літній період. Найбільші показники знову були характерні для ділянки 1 (1,56 г/см³), тоді як найменші були характерні для ділянки 2 (1,24 г/см³).

У цілому простежується чітка тенденція до зростання показника щільності ґрунту від літнього до зимового періоду з подальшим незначним зниженням навесні (рис. 2).

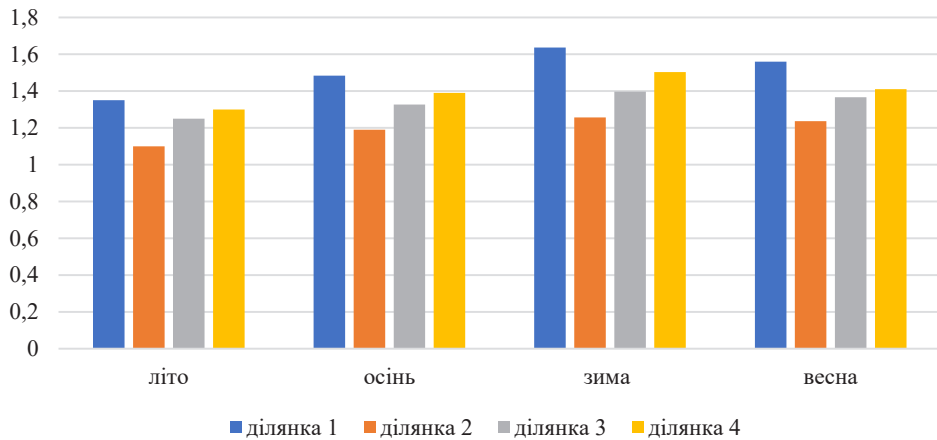


Рис. 2. Сезонні зміни щільності ґрунту на досліджуваних ділянках

Відстеження сезонної кореляції між целюлозолітичною активністю (ЦА) та щільністю ґрунту (ЩГ) є важливим для розуміння взаємозв'язку між фізичними властивостями ґрунту та інтенсивністю біологічних процесів. Аналіз кореляційних коефіцієнтів свідчить про наявність переважно помірної та тісної зв'язку між целюлозолітичною активністю та щільністю ґрунту, який варіює залежно від сезону (табл. 3).

Таблиця 3

Характер зв'язку* між целюлозолітичною активністю та щільністю ґрунту в різні сезони року

Показник	Сезон	Щільність ґрунту			
		літо	осінь	зима	весна
Целюлозолітична активність	літо	0,55	0,67	0,61	0,79
	осінь	0,57	0,66	0,62	0,77
	зима	0,43	0,58	0,51	0,70
	весна	0,87	0,94	0,91	0,98

*Примітка: ● < 0,50 – слабкий зв'язок; ● 0,50-0,64 – помірний; ● 0,65-0,84 – помітний; ● ≥ 0,85 – сильний

Так, найвищі значення коефіцієнтів кореляції встановлено у весняний період ($r = 0,87-0,98$), що вказує на посилення взаємозв'язку між фізичними та біологічними властивостями ґрунту в умовах активізації мікробіологічних процесів. Водночас у зимовий період зв'язок послаблюється ($r = 0,43-0,70$), що може бути зумовлено пригніченням біологічної активності під впливом низьких температур.

Водночас визначення загальної кореляційної залежності між целюлозолітичною активністю та щільністю ґрунту за об'єднаним масивом даних (без урахування сезонної диференціації) показало практично повну відсутність зв'язку між показниками ($r = -0,01$). Це свідчить про те, що взаємозв'язок між фізичними та біологічними характеристиками ґрунту має виражений сезонний характер і не може бути адекватно описаний узагальненими показниками. Тобто, отриманий результат вказує на нелінійність залежності та різноспрямованість впливу щільності ґрунту на целюлозолітичну активність у різні періоди року.

Висновки. Целюлозолітична активність ґрунтів лісових екосистем південно-східної частини Волинського Полісся характеризується чітко вираженою сезонною динамікою з максимальними значеннями влітку та мінімальними взимку. Рівень активності суттєво залежить від характеру антропогенного навантаження: найвищі значення зафіксовано на ділянці з помірним рекреаційним впливом, тоді як за умов інтенсивного порушення (суцільна рубка), так і на контрольній ділянці показник є нижчим, що свідчить про нелінійний характер реакції ґрунтових процесів. Щільність ґрунту варіює залежно від сезону та типу впливу, досягаючи максимальних значень у зимовий період. Зв'язок між целюлозолітичною активністю та щільністю ґрунту має сезонний характер: у період активізації біологічних процесів він посилюється, тоді як за узагальненими даними практично відсутній, що свідчить про нелінійність і різноспрямованість взаємодії показників. Отримані результати підтверджують доцільність їх комплексного використання для оцінки функціонального стану ґрунтів в умовах антропогенного навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Biological Activity of the Soil. Microbial Ecology of Soil and Plant Growth. 2004. P. 89–98. URL: <https://doi.org/10.1201/9781482280128-10>
2. Domuschy S. V., Trigub V. I. Cellulosolytic activity of soils of the Odesa city. *Odesa National University Herald. Geography and Geology*. 2022. Vol. 27, no. 1(40). P. 61–71. URL: [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2022.1\(40\).257533](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2022.1(40).257533)
3. Coupling energy balance and carbon flux during cellulose degradation in arable soils / J. Wirsching et al. *Soil Biology and Biochemistry*. 2024. P. 109691. URL: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109691>
4. Карбівська У. М. Зміна показників родючості та целюлозолітична активність ґрунту за вирощування злакових травостоїв. *Plant and Soil Science*. 2020. Т. 11, № 1. С. 33–41. URL: <https://doi.org/10.31548/agr2020.01.033>
5. Цицюра Я. Г. Мікробіологічний потенціал та целюлозолітична активність сірого лісового ґрунту за систематичного сидерального використання редьки олійної. *Аграрні інновації*. 2025. № 33. С. 299–308.
6. Ковальчук Н. С., Колесник Т. М. Зміни целюлозолітичної активності дерново-слабопідзолистого ґрунту під впливом мікробіологічних біопрепаратів. *Вісник НУВГП. Сільськогосподарські науки : зб. наук. праць*. Рівне : НУВГП, 2016. Вип. 1(73). С. 30–38.
7. Стерник В.М. Целюлозолітична активність ґрунтів урбоекосистеми м. Рівне. Наукові основи збереження біотичної різноманітності. 2015. Том 6(13), № 1. С. 317–324.

8. Palit K., Das S. Cellulolytic potential of mangrove bacteria *Bacillus haynesii* DS7010 and the effect of anthropogenic and environmental stressors on bacterial survivability and cellulose metabolism. *Environmental Research*. 2024. P. 118774. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118774>

9. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Elsevier, 1995. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-513840-6.x5014-9>

10. Фізика ґрунту : навчальний посібник / В. В. Медведєв, С. Ю. Булигін, С. В. Вітвіцький. К. : Видавничий центр НУБіП України, 2018. 292 с.

11. Статистичні методи досліджень у природничих науках : навчальний посібник / Гуменюк Г. Б., Хоменчук В. О., Гарматій Н. М., Прокоп'як М. З., Сверстюк А. С. Тернопіль, 2024. 98 с.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026