

УДК: 631.4:631.53.01:632.9:57.085.2

DOI 10.37000/abbsl.2026.120.23

Юрій Сотников,

кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій,
кібернетики та захисту інформації

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

ORCID ID 0000-0003-1032-9283

email: yesaul.halt@knau.kharkov.ua

Сергій Рєзнік,

доктор філософії, викладач кафедри ґрунтознавства

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

ORCID ID 0000-0002-2703-1021

email: serhey021@gmail.com

Дмитро Гавва,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри ґрунтознавства

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

ORCID ID 0000-0001-6516-7846

email: pochvoved@ukr.net

Юрій Дегтярьов,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри ґрунтознавства

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

ORCID ID 0000-0003-1200-2364

email: degt7@ukr.net

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА АЛЕЛОПАТИЧНОЇ АКТИВНОСТІ ҐРУНТІВ РІЗНИХ АГРОЕКОСИСТЕМ ЗА МОРФОМЕТРИЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ПРОРОСТКІВ 16 ТЕСТ-КУЛЬТУР

Анотація

*Наведено результати порівняльної оцінки алелопатичної активності ґрунтів різних агроєкосистем за морфометричними показниками проростків 16 тест-культур. Актуальність дослідження зумовлена визначальною роллю ранніх етапів онтогенезу у формуванні конкурентоспроможності рослин, а також значенням ґрунту як складного біогеохімічного середовища, здатного накопичувати та трансформувати алелохімічні сполуки. Дослідження проводили методом лабораторного біотестування на чорноземі типовому середньогумусному середньосуглинковому Полтавської області. Ґрунтові зразки відбирали в межах чотирьох агроєкосистем: насаджень абрикоса (*Prunus armeniaca*), горіха волоського (*Juglans regia* L.), плантації ехінацеї пурпурової (*Echinacea purpurea*) та перелогу з різнотрав'ям. Контрольним субстратом слугував кварцовий пісок. Реакцію рослин оцінювали за показниками схожості насіння, довжини кореня, довжини пагона та загальної довжини проростка. Загалом проаналізовано 16 000 морфометричних вимірювань.*

Алелопатичний ефект визначали за нормалізованим індексом *Response Index (NRI)* відповідно до методики *Williamson i Richardson*.

Встановлено значну міжвидову варіабельність вихідних морфометричних параметрів проростків. Алелопатична реакція тест-культур мала виражений видоспецифічний і селективний характер. Найбільш чутливими до інгібувального впливу виявилися буряк (середній $NRI = -0,438$), кріп ($-0,212$), люпин ($-0,206$) та гарбуз ($-0,174$). Стабільну стимуляцію росту в усіх варіантах субстрату продемонстрували гірчиця біла ($+0,402$), цибуля піщана ($+0,365$), базилік ($+0,324$) та цибуля-батун ($+0,297$). Серед досліджених агроєкосистем найсильніший інгібувальний ефект зафіксовано в ґрунті під ехінацеєю пурпуровою (середній $NRI = -0,086$; пригнічення 10 із 16 тест-культур), тоді як ґрунт перелогу характеризувався переважно стимулювальною дією (середній $NRI = +0,130$; позитивні значення NRI у 11 культур). Ґрунт під горіхом волоським відзначався найвищою варіабельністю та контрастністю реакцій ($SD = 0,328$; діапазон $NRI = 1,210$). Описані результати свідчать про селективний характер алелопатичної дії ґрунтів різних агроєкосистем і підтверджують ефективність використання комплексу тест-культур для оцінювання алелопатичної активності ґрунтового середовища.

Ключові слова: алелопатія, агроєкосистеми, біотестування, морфометрія проростків, *Response Index*, тест-культури.

Вступ. Формування продуктивних агроєкосистем значною мірою залежить від успішного проростання насіння та раннього розвитку рослин. Початкові етапи росту визначають подальшу конкурентоспроможність культур, їхню здатність ефективно використовувати ресурси середовища та формувати стабільні рослинні угруповання. Морфометричні показники проростків, зокрема довжина кореня та пагона, широко використовуються як індикатори фізіологічного стану рослин і їхнього адаптивного потенціалу на ранніх етапах розвитку [1, 2, 3]. Ці параметри відображають інтенсивність ростових процесів і дозволяють оцінювати реакцію рослин на різні фактори середовища.

Одним із ключових компонентів агроєкосистеми, що визначає умови проростання та початкового розвитку рослин, є ґрунт, який виконує функцію не лише фізичного субстрату, а й складного біогеохімічного середовища, у якому відбуваються трансформації органічних речовин, накопичення біологічно активних сполук і взаємодія мікробних угруповань [4, 5]. Хімічний склад ґрунтового середовища, наявність органічних залишків та активність ґрунтової біоти можуть суттєво впливати на проростання насіння та ріст проростків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливим екологічним механізмом взаємодії рослин у ґрунтовому середовищі є алелопатія. Алелопатичні речовини, що виділяються рослинами або утворюються під час розкладання рослинних решток, здатні впливати на проростання насіння, ріст проростків та конкурентні взаємодії між видами [6, 7, 8]. У природних і аграрних екосистемах алелохімічні сполуки можуть накопичуватися у ґрунті та проявляти як інгібувальний, так і стимулювальний вплив на рослини. Відомо, що деякі види формують специфічні алелопатичні умови у ґрунті. Наприклад, деревні насадження волоського горіха (*Juglans regia*) здатні виділяти юглон – біологічно активну речовину, яка пригнічує проростання та ріст багатьох видів рослин [9, 10]. Подібні ефекти можуть формуватися також у трав'янистих агроєкосистемах

унаслідок накопичення вторинних метаболітів та продуктів розкладання рослинної біомаси [11].

Для оцінки алелопатичної активності ґрунтів широко застосовуються лабораторні біотести проростання насіння. Вони дозволяють кількісно оцінити реакцію рослин на вплив алелохімічних речовин, що містяться у ґрунтовому середовищі [12, 13, 14]. У біотестах найбільш інформативними показниками вважаються морфометричні параметри проростків, насамперед довжина кореня та пагона, які характеризують інтенсивність росту рослин на ранніх етапах онтогенезу. Реакція різних видів рослин на алелопатичний вплив може суттєво відрізнятися, що зумовлює доцільність використання комплексу тест-культур із різними морфофункціональними характеристиками [15, 16].

Застосування широкого набору тест-культур дозволяє виявити селективний характер алелопатичного впливу ґрунтового середовища, коли одні види рослин демонструють пригнічення росту, тоді як інші залишаються толерантними або реагують стимуляцією розвитку [17, 18]. Такий підхід підвищує інформативність біотестування та дозволяє повніше оцінити екологічні особливості різних агроєкосистем.

Незважаючи на значну кількість досліджень алелопатії, порівняльна оцінка алелопатичної активності ґрунтів різних агроєкосистем за реакцією широкого комплексу тест-культур залишається недостатньо вивченою. Особливо актуальним є дослідження селективного впливу ґрунтового середовища на ранній розвиток рослин за морфометричними показниками проростків [19, 20].

Припускається, що ґрунти різних агроєкосистем відрізняються за алелопатичною активністю, а деревні насадження (абрикос, горіх волоський) виявлятимуть більш виражений інгібувальний вплив на проростання тест-культур порівняно з трав'янистими угрупованнями (ехінацея, переліг) внаслідок специфічного накопичення вторинних метаболітів у ґрунтовому середовищі. Водночас передбачається, що алелопатичні ефекти матимуть виражений видоспецифічний характер, а вплив конкретних агроєкосистем може виявитися відмінним від очікуваного у зв'язку із взаємодією багатьох ґрунтових факторів [21].

Метою дослідження є порівняльна оцінка алелопатичної активності ґрунтів різних агроєкосистем за морфометричними показниками проростків 16 тест-культур.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження алелопатичної активності ґрунтів проводили на чорноземі типовому середньогумусному середньосуглинковому на лесі на території Лівобережного Лісостепу України (Миргородський район, Полтавська область). Уміст гумусу – 3,47 %, гідролітична кислотність – 1,10 мг-екв/100 г ґрунту, легкогідролізований азот – 61,6 мг/кг сухого ґрунту, рухомий фосфор – 313,5 мг/кг, обмінний калій – 145,2 мг/кг. Ґрунтові зразки відбирали у межах чотирьох агроєкосистем: насадження абрикоса (*Prunus armeniaca*), насадження горіха волоського (*Juglans regia* L.), плантації ехінацеї пурпурової (*Echinacea purpurea*) та перелогу

(різнотрав'я). Як контрольний субстрат використовували абіотичний субстрат – промитий кварцовий пісок.

Дослідження проводили за схемою повністю рандомізованого дизайну. Експериментальна матриця включала 16 тест-культур та 5 варіантів субстрату (4 агроєкосистеми та контроль). Для кожної комбінації «тест-культура × субстрат» закладали 4 повторення, у кожному з яких висівали по 25 насінин. Загалом у експерименті було проаналізовано 16 000 морфометричних вимірювань проростків (8 000 для кореня та 8 000 для пагона).

У дослідженні використовували насіння 16 тест-культур, що належать до різних ботанічних родин: *Fabaceae* (горох посівний – *Pisum sativum*, люпин багатолістий – *Lupinus polyphyllus*), *Brassicaceae* (редька посівна – *Raphanus sativus*, гірчиця біла – *Sinapis alba*, хрениця посівна – *Lepidium sativum*), *Poaceae* (кукурудза – *Zea mays*, пшениця м'яка озима – *Triticum aestivum*), *Amaryllidaceae* (цибуля піщана – *Allium scorodoprasum*, цибуля-батун – *Allium fistulosum*), *Amaranthaceae* (буряк звичайний – *Beta vulgaris*, амарант – *Amaranthus spinosus*), *Cucurbitaceae* (гарбуз звичайний – *Cucurbita pepo*), *Lamiaceae* (базилік – *Ocimum basilicum*), *Apiaceae* (кріп – *Anethum graveolens*), *Polygonaceae* (гречка звичайна – *Fagopyrum esculentum*), *Asteraceae* (соняшник звичайний – *Helianthus annuus*).

Якість насіння та показники його схожості визначали відповідно до міжнародних методик International Seed Testing Association.

Алелопатичну активність ґрунтів визначали за допомогою лабораторного біотесту проростання насіння. Насіння тест-культур пророщували у відповідних ґрунтових субстратах у контрольованих лабораторних умовах. Для кожної тест-культури визначали такі морфометричні показники проростків: схожість насіння (GER), довжину кореня (ROOT), довжину пагона (SHOOT) та загальну довжину проростка (TSL).

Алелопатичний ефект оцінювали за нормалізованим індексом відповіді (Normalized Response Index, NRI) за методом Williamson & Richardson:

$$NRI = (T - C)/(T + C),$$

де T – значення показника у досліджуваному варіанті, C – значення показника у контрольному варіанті. Діапазон індексу становить від -1 (повне пригнічення) до +1 (максимальна стимуляція). Додатні значення NRI свідчать про стимуляцію росту проростків, від'ємні – про пригнічення.

Первинні експериментальні дані реєструвалися у електронних таблицях Microsoft Excel 2021. Розрахунок індексів NRI, статистичний аналіз узагальнення результатів – у середовищі R 4.5.2. Для порівняння алелопатичної активності ґрунтів між агроєкосистемами використовували двофакторний дисперсійний аналіз (two-way ANOVA) з факторами «агроєкосистема» (4 рівні) та «тест-культура» (16 рівнів). Контрольний варіант (пісок) до аналізу не включали, оскільки значення NRI розраховували відносно контролю. Нормальність розподілів перевіряли за критерієм Шапіро-Уїлка, однорідність дисперсій – за критерієм Левеня. Для попарного порівняння агроєкосистем використовували тест HIP_{05} (LSD). Візуалізацію результатів здійснювали за допомогою теплової

карти з ієрархічною кластеризацією та графічного відображення спектра чутливості досліджуваних видів.

Результати досліджень. Морфометричні показники проростків демонстрували значну міжвидову варіабельність (табл. 1), що відображає різні стратегії раннього росту рослин і потенційно зумовлює відмінності у сприйнятливості до алелопатичних впливів ґрунтового середовища [22]. Схожість насіння (GER) варіювала в межах 30-100 %, тобто більш ніж утричі між крайніми значеннями. Найвищу схожість продемонструвала пшениця (100 %), тоді як мінімальні значення спостерігалися у базиліка та цибулі піщаної (по 30 %). Довжина кореня (ROOT) змінювалася більш ніж у 16 разів – від 0,80 см у базиліка до 12,81 см у гороху. Загальна довжина проростка (TSL) варіювала від 1,76 до 25,98 см, тобто майже у 15 разів.

Алелопатична реакція тест-культур у ґрунтах досліджуваних агроєкосистем істотно відрізнялася як за видовою належністю, так і за типом агроєкосистеми (табл. 2). У більшості випадків спостерігалось пригнічення росту проростків порівняно з контролем, що свідчить про виражену алелопатичну активність досліджених ґрунтів.

Таблиця 1.

**Морфометричні показники проростків тест-культур
у алелопатичному біотесті**

Тест-культура	GER, %	ROOT, см	SHOOT, см	TSL, см
Горох	89,0 ± 1,9	12,81 ± 0,25	8,47 ± 0,18	21,28 ± 0,27
Пшениця	100,0 ± 0,00	9,71 ± 0,11	16,27 ± 0,15	25,98 ± 0,24
Соняшник	83,0 ± 1,0	6,28 ± 0,04	10,36 ± 0,07	16,64 ± 0,07
Редиска	97,0 ± 1,9	7,21 ± 0,05	9,30 ± 0,05	16,51 ± 0,07
Кукурудза	90,0 ± 2,6	9,69 ± 0,38	4,20 ± 0,03	13,89 ± 0,38
Гречка	63,0 ± 1,0	3,74 ± 0,04	8,89 ± 0,09	12,63 ± 0,12
Кріп	97,0 ± 1,0	4,84 ± 0,06	7,95 ± 0,08	12,80 ± 0,12
Гарбуз	39,0 ± 6,4	4,34 ± 0,72	4,40 ± 1,24	8,74 ± 1,93
Хрінниця	86,0 ± 3,5	3,48 ± 0,02	4,44 ± 0,01	7,92 ± 0,02
Гірчиця	57,0 ± 3,8	3,53 ± 0,06	3,58 ± 0,05	7,11 ± 0,11
Буряк	76,0 ± 6,3	2,46 ± 0,24	3,12 ± 0,24	5,59 ± 0,14
Цибуля піщана	50,0 ± 3,8	1,85 ± 0,13	3,50 ± 0,24	5,35 ± 0,35
Люпин	58,0 ± 11,6	4,05 ± 0,77	1,14 ± 0,25	5,19 ± 1,02
Амарант	80,0 ± 1,6	1,78 ± 0,05	2,81 ± 0,04	4,59 ± 0,05
Цибуля-батун	30,0 ± 2,6	1,44 ± 0,02	1,50 ± 0,01	2,95 ± 0,02
Базилік	30,0 ± 3,5	0,80 ± 0,06	0,96 ± 0,08	1,76 ± 0,14

Примітка: M ± SE – середнє значення ± стандартна помилка; GER – схожість насіння; ROOT – довжина кореня; SHOOT – довжина пагона; TSL – загальна довжина проростка.

Найбільшу чутливість до алелопатичних факторів ґрунтового середовища продемонстрували буряк (середній NRI = -0,438), кріп (-0,212), люпин багаторічний (-0,206) та гарбуз (-0,174). Особливо виражений інгібувальний ефект щодо гарбуза зафіксовано у ґрунті під горіхом волоським (NRI = -0,661) – найнижче значення у всій матриці даних, що може свідчити про специфічну

чутливість гарбуза до юглону та інших алелохімічних сполук цієї агроєкосистеми [23]. Виражене пригнічення буряка спостерігалось в усіх чотирьох агроєкосистемах (NRI від -0,530 до -0,334), що вказує на його стабільно високу чутливість незалежно від типу ґрунту.

Натомість гірчиця біла (середній NRI = +0,402), цибуля піщана (+0,365), цибуля-шніт (+0,297) та базилік (+0,324) демонстрували стійку стимуляцію росту в усіх агроєкосистемах. Це свідчить про їх толерантність або навіть позитивну відповідь на алелохімічне середовище досліджених ґрунтів [24].

Аналіз реакцій за агроєкосистемами виявив відмінності у характері їхнього впливу. Ґрунт під ехінацеєю пурпуровою найчастіше чинив інгібувальний ефект, так, із 16 тест-культур 10 продемонстрували від'ємні значення NRI. Ґрунт перелогу, навпаки, переважно стимулював ріст проростків – позитивні значення NRI зафіксовані для 11 тест-культур. Ґрунт під горіхом волоським характеризувався найбільш контрастними реакціями: поряд із найсильнішим пригніченням гарбуза (-0,661) тут зафіксовано і найвищу стимуляцію цибулі піщаної (+0,549) та гірчиці білої (+0,522). Така полярність реакцій свідчить про виражений селективний характер алелопатичного впливу цієї агроєкосистеми [25].

Таблиця 2.

**Алелопатична реакція тест-культур
у ґрунтах різних агроєкосистем за індексом NRI**

Тест-культура	Абрикос	Горіх волоський	Ехінацея пурпурова	Переліг, різнотрав'я	Середній
Горох	-0,150	-0,145	-0,147	0,156	-0,071
Пшениця	0,009	-0,071	-0,225	-0,116	-0,101
Соняшник	-0,169	-0,144	-0,217	0,133	-0,099
Редиска	-0,123	0,051	-0,177	0,047	-0,050
Кукурудза	-0,112	-0,070	0,171	0,092	0,020
Гречка	0,222	-0,138	0,017	0,261	0,090
Кріп	-0,136	-0,260	-0,260	-0,193	-0,212
Гарбуз	-0,080	-0,661	-0,206	0,252	-0,174
Хрінниця	0,217	0,146	-0,121	0,175	0,104
Гірчиця	0,465	0,522	0,202	0,419	0,402
Буряк	-0,530	-0,469	-0,334	-0,420	-0,438
Цибуля піщана	0,495	0,549	0,076	0,339	0,365
Люпин	-0,209	-0,290	-0,462	0,137	-0,206
Амарант	0,152	-0,042	-0,321	0,335	0,031
Цибуля-батун	0,246	0,252	0,407	0,283	0,297
Базилік	0,595	0,292	0,227	0,181	0,324

Примітка: NRI – нормалізований індекс алелопатичного ефекту (Normalized Response Index). Додатні значення NRI свідчать про стимуляцію росту проростків, від'ємні – про його пригнічення; NRI = 0 відповідає контролю.

Показовим є також аналіз культур із контрастною реакцією між агроєкосистемами. Гречка демонструвала стимуляцію під абрикосом (+0,222) і

перелогом (+0,261), але інгібування під горіхом (-0,138). Кукурудза реагувала стимуляцією під ехінацеєю (+0,171) та перелогом (+0,092), але пригніченням під абрикосом (-0,112) та горіхом (-0,070). Це підтверджує, що алелопатичний ефект ґрунтів є видоспецифічним і не може бути охарактеризований єдиним показником без урахування типу тест-культури [22, 26].

Для наочнішої інтерпретації алелопатичних реакцій тест-культур матрицю значень NRI було візуалізовано у вигляді теплової карти з ієрархічною кластеризацією (рис. 1). Теплова карта дозволила виявити групи тест-культур із подібною реакцією на алелопатичні чинники ґрунту. Найбільш виражений інгібувальний ефект спостерігався у ґрунті під ехінацеєю пурпуровою.

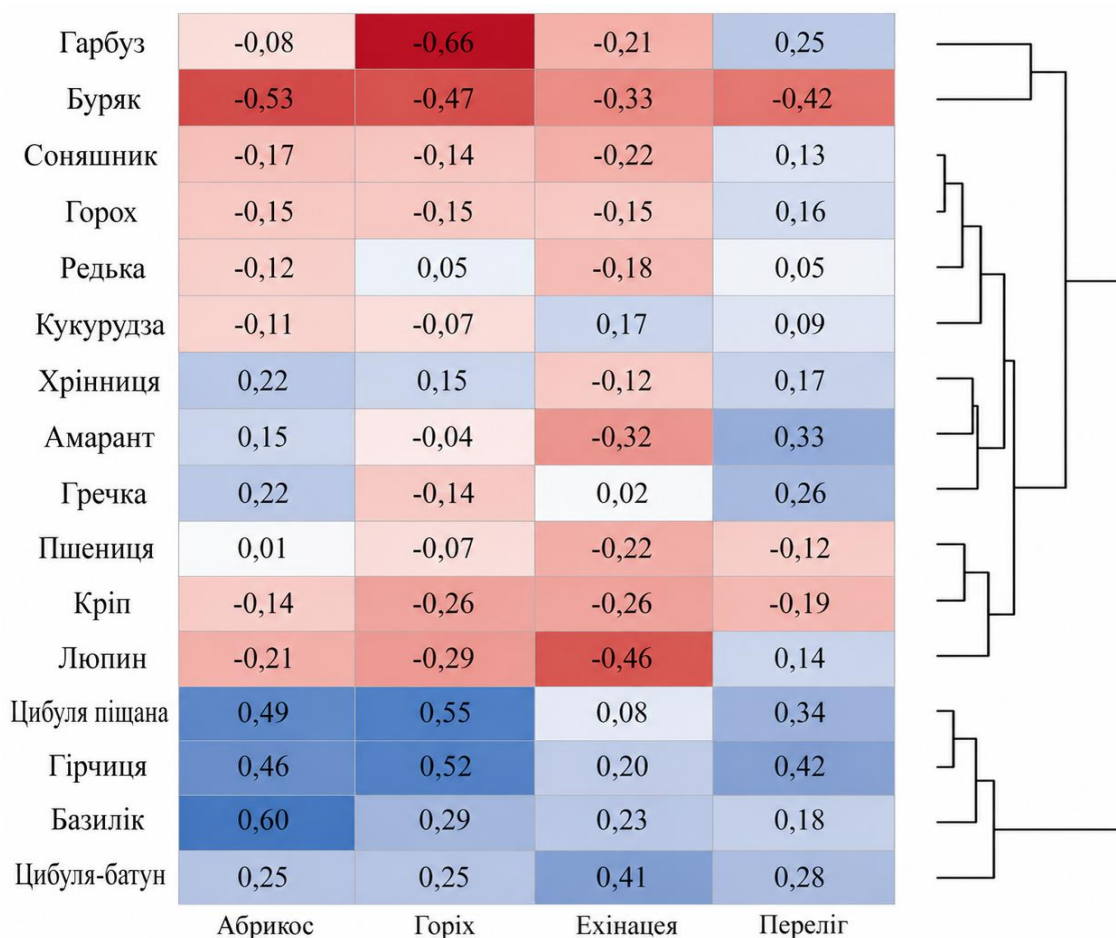


Рис. 1. Теплова карта алелопатичної реакції тест-культур у ґрунтах різних агроєкосистем за індексом NRI

Примітка: NRI – індекс алелопатичної реакції. Додатні значення (сині відтінки) відображають стимуляцію росту проростків, від’ємні (червоні) – пригнічення. Дендрограма відображає подібність реакцій тест-культур за результатами ієрархічної кластеризації.

Порівняння алелопатичної активності агроєкосистем за інтегральними показниками (табл. 3) підтвердило висновки, отримані при аналізі таблиці 2. Ґрунт під ехінацеєю пурпуровою характеризувався найнижчим середнім NRI (-0,086), тоді як переліг – найвищим (+0,130). Усі чотири агроєкосистеми

утворили окремі статистичні групи (a, b, c, d) за результатами тесту HIP_{05} ($LSD = 0,041$), що свідчить про достовірну відмінність між кожною парою агроєкосистем.

Важливо зазначити, що 95 % довірчі інтервали для абрикоса (-0,023; 0,135) та горіха волоського (-0,113; 0,053) включають нуль. Це свідчить, що середній ефект цих агроєкосистем статистично не відрізняється від контрольного рівня, хоча щодо окремих тест-культур вони справляють достовірний вплив. Натомість достовірний інтервал (ДІ) ехінацеї (-0,151; -0,020) та перелугу (0,073; 0,187) не перетинають нуль, що підтверджує статистично значущий напрямлений ефект цих агроєкосистем на проростання тест-культур.

Щодо показника варіабельності, найбільший діапазон NRI зафіксовано для горіха волоського (1,210 при $SD = 0,328$), що більш ніж удвічі перевищує аналогічний показник перелугу (0,839 при $SD = 0,217$). Це відображає не стільки загальну силу алелопатичного впливу, скільки його вибірковість: ґрунт під горіхом волоським одночасно є одним із найсильніших інгібіторів для одних тест-культур і стимулятором для інших, що, ймовірно, пов'язано зі специфічним складом алелохімічних сполук цієї агроєкосистеми, зокрема юглону [9, 27].

Таблиця 3.

Алелопатична активність ґрунтів різних агроєкосистем за значеннями нормалізованого індексу NRI та результатами статистичного аналізу

Агроєкосистема	Середній NRI	SE	95% ДІ	SD	Діапазон NRI	Група
Ехінацея пурпурова	-0,086	0,033	(-0,151; -0,020)	0,242	0,869	d
Горіх волоський	-0,030	0,042	(-0,113; 0,053)	0,328	1,210	c
Абрикос	0,056	0,040	(-0,023; 0,135)	0,303	1,125	b
Переліг, різнотрав'я	0,130	0,028	(0,073; 0,187)	0,217	0,839	a
Пісок (контроль)*	-0,006	0,013	—	0,013	0,042	—
HIP_{05}	0,041					

Примітка: Середній NRI – середнє значення індексу для 16 тест-культур; SE – стандартна помилка середнього; 95 % ДІ – довірчий інтервал; SD – стандартне відхилення; Діапазон NRI – різниця між максимальним та мінімальним значенням NRI. Різні літери у стовпці «Група» позначають статистично значущі відмінності між агроєкосистемами (двофакторний ANOVA, тест HIP_{05} , $p < 0,05$). *Контроль до статистичного аналізу не включався; наведене значення NRI для контролю є технічним артефактом, обумовленим незначною варіацією всередині повторень контрольного варіанту (теоретично NRI контролю = 0).

Двофакторний дисперсійний аналіз виявив статистично значущий вплив агроєкосистеми ($F_{3,192} = 41,71$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,076$), тест-культури ($F_{15,192} = 64,87$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,593$) та їх взаємодії ($F_{45,192} = 7,79$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,214$) на значення NRI. Оцінка величини ефекту (η^2) свідчить про відносний внесок кожного фактора у загальну варіацію показника. Найбільшу частку варіації пояснює фактор «тест-культура» ($\eta^2 = 0,593$), що підтверджує визначальну роль видових особливостей рослин у формуванні алелопатичної відповіді. Вплив

агроекосистеми є значно меншим ($\eta^2 = 0,076$), однак статистично достовірним і екологічно релевантним. Водночас суттєва величина ефекту взаємодії ($\eta^2 = 0,214$) вказує на те, що реакція проростків на алелопатичний вплив значною мірою залежить від конкретної комбінації «тест-культура × агроекосистема», тобто має виражений селективний характер.

Отримані результати лише частково підтверджують первинну гіпотезу щодо більш вираженого інгібувального ефекту деревних насаджень порівняно з трав'янистими угрупованнями. Зокрема, на рівні середніх значень найсильніший інгібувальний ефект зафіксовано у ґрунті під ехінацеєю пурпурою (NRI = -0,086), тоді як ґрунт під горіхом волоським характеризувався не стільки односпрямованим пригніченням, скільки найбільшою варіабельністю реакцій тест-культур (SD = 0,328). Це свідчить про те, що тип рослинного покриву не може розглядатися як достатній предиктор ні напряму, ні сили алелопатичного впливу, а сам ефект формується внаслідок складної взаємодії видових особливостей рослин та специфіки алелохімічного середовища ґрунту [28, 29].

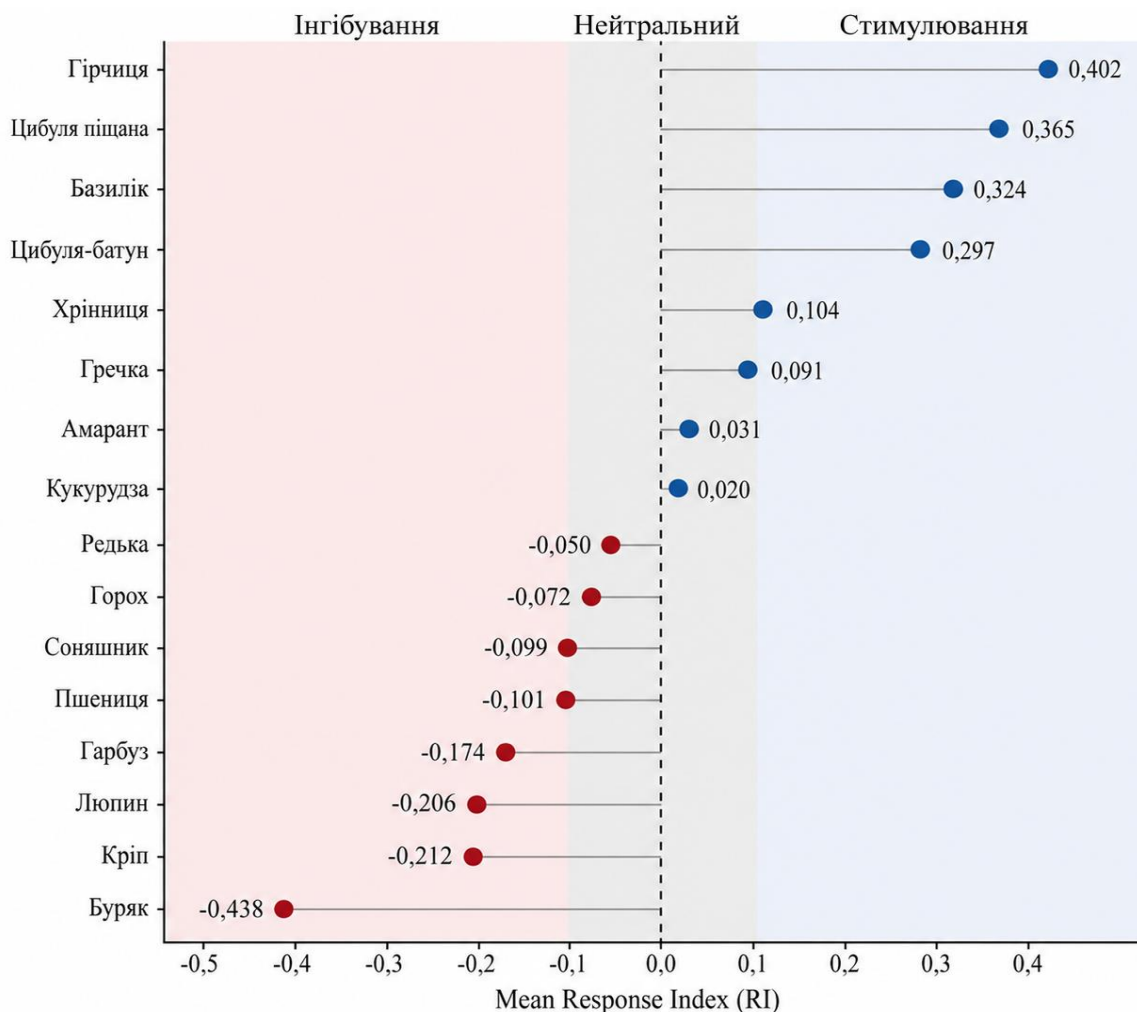


Рис. 1. Спектр чутливості тест-культур до алелопатичного впливу ґрунтів різних агроекосистем за середнім значенням NRI

Примітка: Mean RI – середнє значення для тест-культур. Додатні значення RI відповідають стимуляції росту проростків, від'ємні – пригніченню.

Отримані результати підтверджують доцільність використання широкого набору тест-культур із різними морфофункціональними характеристиками для оцінки алелопатичної активності ґрунтів. Високий внесок фактора «тест-культура» у загальну варіацію показника ($\eta^2 = 0,593$), а також значуща взаємодія «тест-культура $\times$ агроєкосистема» ($\eta^2 = 0,214$) свідчать про виражену видоспецифічність і селективність алелопатичних ефектів. За таких умов використання окремої тест-культури не дозволяє адекватно відобразити повний спектр реакцій рослин на алелохімічне середовище, що узгоджується з даними попередніх досліджень [12, 15, 16].

Аналіз середніх значень NRI дозволив визначити спектр реакцій тест-культур на алелопатичний вплив ґрунтів (рис. 2). Досліджувані види формують градієнт реакцій від вираженого пригнічення росту проростків до стимуляції, що свідчить про суттєву міжвидову диференціацію їхньої сприйнятливості до алелопатичних факторів.

Загалом отримані результати підтверджують селективний характер алелопатичної дії ґрунтів різних агроєкосистем і свідчать про виражену видоспецифічність реакції тест-культур, що узгоджується з даними інших досліджень [30, 31].

Висновки. Морфометричні показники проростків тест-культур характеризуються значною міжвидовою варіабельністю (TSL від 1,76 до 25,98 см), що відображає різні стратегії раннього росту рослин і формує широкий функціональний градієнт їхньої потенційної чутливості до алелопатичних факторів ґрунтового середовища.

Двофакторний дисперсійний аналіз підтвердив достовірний вплив агроєкосистеми ($F_{3,192} = 41,71$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,076$), тест-культури ($F_{15,192} = 64,87$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,593$) та їх взаємодії ($F_{45,192} = 7,79$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,214$) на значення NRI. Домінуючим фактором варіації є тест-культура, що підтверджує виражений видоспецифічний характер алелопатичних реакцій. Початкова гіпотеза про більш виражений інгібувальний ефект деревних насаджень порівняно з трав'янистими угрупованнями підтвердилася лише частково, що свідчить про необхідність урахування специфічного складу алелохімікатів кожної агроєкосистеми.

Серед досліджуваних агроєкосистем найбільш виражений інгібувальний ефект виявлено у ґрунті під ехінацеєю пурпуровою (NRI = -0,086, група d), тоді як ґрунти перелогу проявляли переважно стимулювальний вплив (NRI = 0,130, група a). За результатами тесту HP_{05} всі чотири агроєкосистеми достовірно відрізнялися одна від одної.

Найбільша варіабельність реакцій тест-культур зафіксована у ґрунті під горіхом волоським (SD = 0,328, діапазон NRI = 1,210), що свідчить про контрастний і селективний характер алелопатичного впливу цієї

агроекосистеми.

Використання комплексу тест-культур із різними морфофункціональними характеристиками підвищує інформативність алелопатичного біотесту та дозволяє повніше оцінювати алелопатичну активність ґрунтів різних агроекосистем. Перспективою подальших досліджень є ідентифікація конкретних алелохімічних сполук у ґрунтах досліджуваних агроекосистем та встановлення їх зв'язку з виявленими ефектами.

Автори підтверджують відсутність потенційного чи наявного конфлікту інтересів, який міг би вплинути на результати дослідження та публікації

Список використаної літератури

1. Finch-Savage W. E., Bassel G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*. 2016. Vol. 67, № 3. P. 567–591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>.
2. Reed R. C., Bradford K.J., Khanday I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity (Edinb)*. 2022. Vol. 128, Is. 6. P. 450–459. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>.
3. Gu J., Chao H., Gan L., Guo L., Zhang K., Li Y., Wang H., Raboanatahiry N., Li M. Proteomic dissection of seed germination and seedling establishment in *Brassica napus*. *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. Article 1482. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01482>.
4. Van der Heijden M. G. A., Bardgett R. D., van Straalen N. M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*. 2008. Vol. 11, Is. 3. P. 296–310. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>.
5. C. Wagg S. F. Bender F. Widmer, van der Heijden M. G. A. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2014. Vol. 111, Is. 14. P. 5266–5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>.
6. Chou C. H. Roles of allelopathy in plant biodiversity and sustainable agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 1999. Vol. 18, Is. 5. P. 609–636. <https://doi.org/10.1080/07352689991309414>.
7. Bertholdsson N.-O. Allelopathy – A Tool to Improve the Weed Competitive Ability of Wheat with Herbicide-Resistant Black-Grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Agronomy*. 2012. Vol. 2, Is. 4. P. 284–294. <https://doi.org/10.3390/agronomy2040284>.
8. Inderjit S., Duke S. O. Ecophysiological aspects of allelopathy. *Planta*. 2003. Vol. 217, Is. 4. P. 529–539. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1054-z>.
9. Willis R. J. *The history of allelopathy*. Dordrecht: Springer, 2007. 316 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4093-1>.
10. Jose S., Gillespie A. R. Allelopathy in black walnut (*Juglans nigra* L.) alley cropping. I. Spatio-temporal variation in soil juglone in a black walnut–corn (*Zea mays* L.) alley cropping system in the midwestern USA. *Plant and Soil*. 1998. Vol. 203. P. 191–197. <https://doi.org/10.1023/A:1004301309997>.
11. Wang C., Liu Z., Wang Z., Pang W., Zhang L., Wen Z., Zhao Y., Sun J., Wang Z.-Y., Yang C. Effects of autotoxicity and allelopathy on seed germination and seedling growth in *Medicago truncatula*. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 908426. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.908426>.
12. Kruse M., Strandberg M., Strandberg B. *Ecological Effects of Allelopathic Plants: A Review*. NERI Technical Report No. 315. Silkeborg: National Environmental Research Institute, 2000. 66 p. https://www2.dmu.dk/1_viden/2_publicationer/3_fagrappporter/rapporter/fr315.pdf.
13. Macias F. A., Marin D., Oliveros-Bastidas A., Varela R. M., Simonet A. M., Carrera C.,

- Molinillo J. M. G. Allelopathy as a new strategy for sustainable ecosystems development. *Biological Sciences in Space*. 2003. Vol. 17, Is. 1. P. 18–23. <https://doi.org/10.2187/bss.17.18>.
14. Scavo A., Abbate C., Mauromicale G. Plant allelochemicals: agronomic, nutritional and ecological relevance in the soil system. *Plant and Soil*. 2019. Vol. 442. P. 23–48. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04190-y>.
15. Williamson G. B., Richardson D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls. *Journal of Chemical Ecology*. 1988. Vol. 14, Is. 1. P. 181–187. <https://doi.org/10.1007/BF01022540>.
16. Ahmed Hiwa M., Amiri-Ardekani E., Ebadi S. Phytotoxicity of Natural Molecules Derived from Cereal Crops as a Means to Increase Yield Productivity. *International Journal of Agronomy*. 2022, Vol. 2022, Is. 1. Article 4223853. <https://doi.org/10.1155/2022/4223853>.
17. VanVolkenburg H., Guinel F. C., Vasseur L. Impacts of Smooth Pigweed (*Amaranthus hybridus*) on Cover Crops in Southern Ontario. *Agronomy*. 2020. Vol. 10, Is. 4. Article 529. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040529>.
18. Al-Andal A., Radwan A. M., Donia A. E., Balah M. A. Allelopathic pathways and impacts of *Chenopodium* species via leachates, decaying residues, and essential oils. *PLOS One*. 2025. Vol. 20. Article e0321782. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321782>.
19. Singh H. P., Batish D. R., Kohli R. K. Allelopathy in Agroecosystems. *Journal of Crop Production*. 2001. Vol. 4, Is. 2. P. 1–41. <https://doi.org/10.1201/9781003578253>.
20. Uddin M. N., Asaeda T., Shampa S. H., Robinson R. W. Allelopathy and its coevolutionary implications between native and non-native neighbors of invasive *Cynara cardunculus* L. *Ecology and Evolution*. 2020. Vol. 10. P. 7463–7475. <https://doi.org/10.1002/ece3.6472>.
21. Lebedev V. G., Krutovsky K. V., Shestibratov K. A. ... Fell Upas Sits, the Hydra-Tree of Death †, or the Phytotoxicity of Trees. *Molecules*. 2019. Vol. 24, Is. 8. Article 1636. <https://doi.org/10.3390/molecules24081636>.
22. Wang X., Cao Y., Jin Y., Sun L., Tang F., & Dong L. Ecophysiological Trade-Off Strategies of Three Gramineous Crops in Response to Root Extracts of *Phytolacca americana*. *Plants*. 2024. Vol. 13, Is. 21. Article 3026. <https://doi.org/10.3390/plants13213026>.
23. Zubay P., Kunzelmann J., Itzès A., Németh Zámboiné É., Szabó K. Allelopathic effects of leachates of *Juglans regia* L., *Populus tremula* L. and juglone on germination of temperate zone cultivated medicinal and aromatic plants. *Agroforestry Systems*. 2021. Vol. 95. P. 431–442. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00572-9>.
24. Menalled U. D., Seipel T. F., Menalled F. D. Farming system effects on biologically mediated plant-soil feedbacks. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2020. Vol. 36, Is. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1017/S1742170519000528>.
25. Zhang X., Liu Z., Tian N., Chen K., Luc N. T. Allelopathic impacts of leaf litters decomposition from intercrop tree species on soybean. *Advance Journal of Food Science and Technology*. 2015. Vol. 7. Is. 12. P. 971–976. <https://doi.org/10.19026/ajfst.7.2545>.
26. Koyama A., Dias T., Antunes P. M. Application of plant–soil feedbacks in the selection of crop rotation sequences. *Ecological Applications*. 2021. Vol. 32, Is. 2. Article e2501. <https://doi.org/10.1002/eap.2501>.
27. Achatz M., Morris E. K., Müller F., Hilker M., Rillig M. C. Soil hypha-mediated movement of allelochemicals: arbuscular mycorrhizae extend the bioactive zone of juglone. *Functional Ecology*. 2014. Vol. 28, Is. 4. P. 1020–1029. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12208>.
29. Mahé I., Chauvel B., Colbach N., Cordeau S., Gfeller A. É., Reiss A., Moreau D. Deciphering field-based evidences for crop allelopathy in weed regulation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2022. Vol. 42. Article 50. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00749-1>.
29. Li Y., Allen V. G., Chen J., Wester D. B. Allelopathic Trade-Offs of Rye and Wheat Residues Versus 2-Benzoxazolinone: Impacts on Cotton Growth. *Biology*. 2025. Vol. 14, Is. 10. Article 1321. <https://doi.org/10.3390/biology14101321>.

30. Aguiar M., Conway A. J., Bell J. K., Stewart K. J. Agroecosystem edge effects on vegetation, soil properties, and the soil microbial community in the Canadian prairie. *PLoS One*. 2023. Vol. 18, Is. 4. Article e0283832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283832>.
31. Țopa D.-C., Căpșună S., Calistru A.-E., Ailincăi C. Sustainable practices for enhancing soil health and crop quality in modern agriculture: a review. *Agriculture*. 2025. Vol. 15, Is. 9. Article 998. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090998>.

Yuriy Sotnykov,

PhD, assoc. prof., assoc. prof. of the Department of Information Technologies, Cybernetics and Information Protection

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID 0000-0003-1032-9283

email: yesaul.halt@knau.kharkov.ua

Serhii Rieznik,

PhD, lecturer of the Department of Soil Science

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID 0000-0002-2703-1021

email: serhey021@gmail.com

Dmytro Havva,

PhD, assoc. prof., assoc. prof. of the Department of Soil Science

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID 0000-0001-6516-7846

email: pochvoved@ukr.net

Yurii Dehtiarov,

PhD, assoc. prof., assoc. prof. of the Department of Soil Science

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID 0000-0003-1200-2364

email: degt7@ukr.net

COMPARATIVE EVALUATION OF SOIL ALLELOPATHIC ACTIVITY IN DIFFERENT AGROECOSYSTEMS USING SEEDLING MORPHOMETRIC TRAITS OF 16 TEST SPECIES

The results of a comparative assessment of the allelopathic activity of soils from different agroecosystems based on morphometric characteristics of seedlings of 16 test plant species are presented. The relevance of the study is determined by the crucial role of early ontogenetic stages in the development of plant competitiveness, as well as by the importance of soil as a complex biogeochemical environment capable of accumulating and transforming allelochemical compounds.

*The study was conducted using laboratory bioassays on a typical medium-humus, medium-loamy Chernozem from the Poltava region of Ukraine. Soil samples were collected from four agroecosystems: apricot (*Prunus armeniaca*) plantations, walnut (*Juglans regia* L.) plantations, a purple coneflower (*Echinacea purpurea*) plantation, and a fallow area dominated by mixed herbaceous vegetation. Quartz sand served as the control substrate. Plant responses were evaluated using seed germination, root length, shoot length, and total seedling length. In total, 16 000 morphometric measurements were analyzed. Allelopathic effects were quantified using the normalized Response Index (NRI) according to the method proposed by Williamson and Richardson.*

Considerable interspecific variability in the initial morphometric characteristics of seedlings was observed. The allelopathic responses of the test species were highly species-specific and selective. The most sensitive species to inhibitory effects were beetroot (mean NRI = -0.438), dill (-0.212), lupine (-0.206), and pumpkin (-0.174). Consistent growth stimulation across all substrate treatments was recorded for white mustard (+0.402), sand onion (+0.365), basil (+0.324), and Welsh onion (+0.297).

Among the investigated agroecosystems, the strongest inhibitory effect was detected in soil collected from the purple coneflower plantation (mean NRI = -0.086), which suppressed 10 of the 16 test species. In contrast, soil from the fallow ecosystem exhibited predominantly stimulatory effects (mean NRI = +0.130), with positive NRI values recorded for 11 species. Soil under walnut plantations showed the highest variability and contrast in plant responses (SD = 0.328; NRI range = 1.210). The obtained results indicate the selective nature of the allelopathic effects exerted by soils of different agroecosystems and confirm the effectiveness of using a set of test species for assessing the allelopathic activity of the soil environment.

Keywords: allelopathy, agroecosystems, bioassay, seedling morphometry, Response Index, test plant species.

References

1. Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 567-591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>.
2. Reed, R. C., Bradford, K.J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity (Edinb)*, 128(6), 450-459. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>.
3. Gu, J., Chao, H., Gan, L., Guo, L., Zhang, K., Li, Y., Wang, H., Raboanatahiry, N., & Li, M. (2016). Proteomic dissection of seed germination and seedling establishment in *Brassica napus*. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1482. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01482>.
4. Van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11(3), 296-310. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>.
5. C. Wagg, S. F. Bende, r F. Widmer, & van der Heijden, M. G. A. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A*, 111(14), 5266-5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>.
6. Chou, C. H. (1999). Roles of allelopathy in plant biodiversity and sustainable agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 18(5), 609-636. <https://doi.org/10.1080/07352689991309414>.
7. Bertholdsson, N.-O. (2012). Allelopathy – A Tool to Improve the Weed Competitive Ability of Wheat with Herbicide-Resistant Black-Grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Agronomy*, 2(4), 284-294. <https://doi.org/10.3390/agronomy2040284>.
8. Inderjit, S., & Duke, S. O. (2003). Ecophysiological aspects of allelopathy. *Planta*, 217(4), 529-539. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1054-z>.
9. Willis, R. J. (2007). *The history of allelopathy*. Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4093-1>.
10. Jose, S., & Gillespie, A. R. (1998). Allelopathy in black walnut (*Juglans nigra* L.) alley cropping. I. Spatio-temporal variation in soil juglone in a black walnut-corn (*Zea mays* L.) alley cropping system in the midwestern USA. *Plant and Soil*, 203, 191-197. <https://doi.org/10.1023/A:1004301309997>.
11. Wang, C., Liu, Z., Wang, Z., Pang, W., Zhang, L., Wen, Z., Zhao, Y., Sun, J., Wang, Z.-Y., & Yang, C. (2022). Effects of autotoxicity and allelopathy on seed germination and seedling growth in *Medicago truncatula*. *Frontiers in Plant Science*, 13, 908426. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.908426>.
12. Kruse, M., Strandberg, M., & Strandberg, B. (2000). *Ecological Effects of Allelopathic Plants: A*

- Review. NERI Technical Report No. 315. Silkeborg: National Environmental Research Institute. https://www2.dmu.dk/1_viden/2_publicationer/3_fagrappporter/rapporter/fr315.pdf.
13. Macias, F. A., Marin, D., Oliveros-Bastidas, A., Varela, R. M., Simonet, A. M., Carrera, C., & Molinillo, J. M. G. Allelopathy as a new strategy for sustainable ecosystems development. *Biological Sciences in Space*, 17(1), 18-23. <https://doi.org/10.2187/bss.17.18>.
14. Scavo, A., Abbate, C., & Mauromicale, G. (2019). Plant allelochemicals: agronomic, nutritional and ecological relevance in the soil system. *Plant and Soil*, 442, 23-48. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04190-y>.
15. Williamson, G. B., & Richardson, D. (1988). Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls. *Journal of Chemical Ecology*, 14(1), 181-187. <https://doi.org/10.1007/BF01022540>.
16. Ahmed Hiwa, M., Amiri-Ardekani, E., & Ebadi, S. (2022). Phytotoxicity of Natural Molecules Derived from Cereal Crops as a Means to Increase Yield Productivity. *International Journal of Agronomy*, 2022(1), 4223853. <https://doi.org/10.1155/2022/4223853>.
17. VanVolkenburg, H., Guinel, F. C., & Vasseur, L. (2020). Impacts of Smooth Pigweed (*Amaranthus hybridus*) on Cover Crops in Southern Ontario. *Agronomy*, 10(4), 529. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040529>.
18. Al-Andal, A., Radwan, A. M., Donia, A. E., & Balah, M. A. (2025). Allelopathic pathways and impacts of *Chenopodium* species via leachates, decaying residues, and essential oils. *PLOS One*, 20, e0321782. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321782>.
19. Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2001). Allelopathy in Agroecosystems. *Journal of Crop Production*, 4(2), 1-41. <https://doi.org/10.1201/9781003578253>.
20. Uddin, M. N., Asaeda, T., Shampa, S. H., & Robinson, R. W. (2020). Allelopathy and its coevolutionary implications between native and non-native neighbors of invasive *Cynara cardunculus* L. *Ecology and Evolution*, 10, 7463-7475. <https://doi.org/10.1002/ece3.6472>.
21. Lebedev, V. G., Krutovsky, K. V., & Shestibratov, K. A. (2019). ... Fell Upas Sits, the Hydra-Tree of Death †, or the Phytotoxicity of Trees. *Molecules*, 24(8), 1636. <https://doi.org/10.3390/molecules24081636>.
22. Wang, X., Cao, Y., Jin, Y., Sun, L., Tang, F., & Dong, L. (2024). Ecophysiological Trade-Off Strategies of Three Gramineous Crops in Response to Root Extracts of *Phytolacca americana*. *Plants*, 13(21), 3026. <https://doi.org/10.3390/plants13213026>.
23. Zubay, P., Kunzelmann, J., Itzès, A., Németh Zámboiné, É., & Szabó, K. (2021). Allelopathic effects of leachates of *Juglans regia* L., *Populus tremula* L. and juglone on germination of temperate zone cultivated medicinal and aromatic plants. *Agroforestry Systems*, 95, 431-442. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00572-9>.
24. Menalled, U. D., Seipel, T. F., & Menalled, F. D. (2020). Farming system effects on biologically mediated plant-soil feedbacks. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(1), 1-7. <https://doi.org/10.1017/S1742170519000528>.
25. Zhang, X., Liu, Z., Tian, N., Chen, K., & Luc, N. T. (2015). Allelopathic impacts of leaf litters decomposition from intercrop tree species on soybean. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 7(12), 971-976. <https://doi.org/10.19026/ajfst.7.2545>.
26. Koyama, A., Dias, T., & Antunes, P. M. (2021). Application of plant-soil feedbacks in the selection of crop rotation sequences. *Ecological Applications*, 32(2), e2501. <https://doi.org/10.1002/eap.2501>.
27. Achatz, M., Morris, E. K., Müller, F., Hilker, M., & Rillig, M. C. (2014). Soil hypha-mediated movement of allelochemicals: arbuscular mycorrhizae extend the bioactive zone of juglone. *Functional Ecology*, 28(4), 1020-1029. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12208>.
29. Mahé, I., Chauvel, B., Colbach N., Cordeau, S., Gfeller, A. É., Reiss, A., & Moreau, D. (2022). Deciphering field-based evidences for crop allelopathy in weed regulation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 50. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00749-1>.

29. Li, Y., Allen, V. G., Chen, J., & Wester, D. B. (2025). Allelopathic Trade-Offs of Rye and Wheat Residues Versus 2-Benzoxazolinone: Impacts on Cotton Growth. *Biology*, 14(10), 1321. <https://doi.org/10.3390/biology14101321>.
30. Aguiar, M., Conway, A. J., Bell, J. K., & Stewart, K. J. (2023). Agroecosystem edge effects on vegetation, soil properties, and the soil microbial community in the Canadian prairie. *PLoS One*, 18(4), e0283832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283832>.
31. Țopa, D.-C., Căpșună, S., Calistru, A.-E., & Ailincăi, C. (2025). Sustainable practices for enhancing soil health and crop quality in modern agriculture: a review. *Agriculture*, 15(9), 998. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090998>.

Стаття надійшла до редакції 17.07.2026

Стаття пройшла рецензування 19.07.2026

Стаття опублікована 30.09.2026