

УДК 633.88:581.524.13:631.95(477.4)

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.1.42>

АЛЕЛОПАТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЛІКАРСЬКИХ РОСЛИН ТА ЙОГО РОЛЬ У РЕГУЛЮВАННІ СТАНУ АГРОФІТОЦЕНОЗІВ У ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

Гнатюк Н.О. – к.б.н.,

доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності,

Уманський національний університет

orcid.org/0000-0002-4159-9924

Сорока Я.В. – аспірант кафедри екології та безпеки життєдіяльності,

Уманський національний університет України

orcid.org/0009-0001-8141-3821

У статті представлено результати комплексного дослідження аделопатичних властивостей культивованих лікарських рослин та їхнього впливу на формування стійких агрофітоценозів в умовах Лісостепу та Степу України. Актуальність роботи зумовлена стрімким розширенням площ під лікарськими культурами (коріандр, шавлія, лаванда, м'ята, валеріана тощо) та виникненням проблем ґрунтової і зниження продуктивності при їх тривалому вирощуванні.

Автором проаналізовано природу рослинних екзометаболітів, які поділено на активні (гутація, ефірні масла, кутикулярні екскрети), пасиві (вимивання опадами) та посмертні (ремітки відмерлих тканин). Встановлено, що сума цих виділень формує аделопатичний потенціал, який визначає рівень аделопатичної напруженості середовища. Особливу увагу приділено ідентифікації біологічно активних речовин (БАР), зокрема терпеноїдів, алкалоїдів та фенольних сполук, які можуть як інгібувати, так і стимулювати життєві функції організмів у біогеоценозі.

Експериментально доведено, що фітотоксичність ефіроолійних культур (шавлії мускатної, лаванди справжньої) має чітку динаміку, залежну від фази онтогенезу та органа рослини. Найвища концентрація інгібіторів спостерігається у фазі цвітіння, причому леткі виділення суцвіть виявляють вищу активність порівняно з виділеннями листя та коріння. Досліджено механізм адсорбції терпенів ґрунтом, що призводить до набуття ним ліпофільного характеру та тривалої фітотоксичності, що є однією з головних причин неможливості вирощування певних культур у монокультурі понад 2–3 роки.

У роботі обґрунтовано технологічні рішення щодо оптимізації захисту посівів від бур'янів та фітопатогенів через призму аделопатичної взаємодії. Встановлено, що використання озимих зернових як попередників є оптимальним рішенням, оскільки вони проявляють високу толерантність до колінів лікарських рослин. Заслугує на увагу виявлений синергетичний ефект компонентів ефірних масел, що дозволяє навіть при низьких концентраціях окремих речовин досягати значного біологічного впливу на супутню мікрофлору та забур'яненість. Практичне значення мають рекомендації щодо видалення або спалювання рослинних залишків культур, багатих на лігнін, для запобігання хронічному отруєнню ґрунту.

Ключові слова: аделопатія, лікарські рослини, екзометаболіти, фітотоксичність, ефірні масла, ґрунтовова, коліни, агрофітоценоз, шавлія мускатна, лаванда справжня, сівозмінна.

Hnatiuk N.O., Soroka Ya.V. Allelopathic potential of medicinal plants and its role in regulating the state of agrophytocenoses in the Forest-Steppe of Ukraine

This article presents the results of a comprehensive study of the allelopathic properties of cultivated medicinal plants and their impact on the formation of stable agrophytocenoses in the Forest-Steppe and Steppe regions of Ukraine. The relevance of this work stems from the rapid



© Гнатюк Н.О., Сорока Я.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

expansion of areas under medicinal crops (coriander, sage, lavender, mint, valerian, etc.) and the emergence of problems such as soil exhaustion and reduced productivity during their long-term cultivation.

The author analyzed the nature of plant exometabolites, which are divided into active (guttation, essential oils, cuticular excretions), passive (leached by precipitation), and post-mortem (remnants of dead tissues). It has been established that the sum of these secretions forms allelopathic potential, which determines the level of allelopathic stress in the environment. Particular attention was paid to the identification of biologically active substances (BAS), specifically terpenoids, alkaloids, and phenolic compounds, which can both inhibit and stimulate the vital functions of organisms in the biogeocenosis.

It has been experimentally demonstrated that the phytotoxicity of essential oil-bearing crops (clary sage, true lavender) exhibits distinct patterns that depend on the stage of ontogenesis and the plant organ. The highest concentration of inhibitors is observed during the flowering phase, with volatile emissions from inflorescences exhibiting higher activity compared to those from leaves and roots. The mechanism of soil adsorption of terpenes was investigated, which leads to the soil acquiring a lipophilic character and long-lasting phytotoxicity, which is one of the main reasons why certain crops cannot be grown in monoculture for more than 2–3 years.

The study substantiates technological solutions for optimizing crop protection against weeds and phytopathogens through the lens of allelopathic interactions. It was established that the use of winter cereals as preceding crops is an optimal solution, as they exhibit high tolerance to medicinal plant species. Noteworthy is the synergistic effect of essential oil components, which allows for a significant biological impact on the associated microflora and weed infestation even at low concentrations of individual substances. Recommendations regarding the removal or burning of plant residues from crops rich in lignin are of practical importance for preventing chronic soil contamination.

Key words: *allelopathy, medicinal plants, exometabolites, phytotoxicity, essential oils, soil fertility, knees, agrophytocenosis, clary sage, true lavender, crop rotation.*

Актуальність теми дослідження. В сучасних умовах розвитку сільського господарства особливого значення набуває диверсифікація рослинництва шляхом інтенсивного впровадження лікарських, ефіроолійних та пряно-смакових культур. Зростаючий попит на натуральну сировину для фармацевтичної, парфумерно-косметичної та харчової промисловості зумовлює розширення площ під такими цінними інтродуцентами, як шавлія мускатна, лаванда справжня, м'ята перцева, валеріана лікарська та інші. Україна, маючи потужний науково-виробничий потенціал, займає одне з провідних місць у світі за обсягами вирощування лікарської сировини, що має стратегічне значення для зміцнення економіки та експортного потенціалу держави. Проте, незважаючи на високу господарську цінність цих рослин, практика їх промислового обробітку стикається з низкою маловивчених негативних явищ. Зокрема, при тривалому вирощуванні лікарських культур у монокультурі спостерігається стійке зниження врожайності, зрідження посівів (інколи до 70–90% у шавлії), погіршення фітосанітарного стану та накопичення специфічних токсинів у ґрунті. Традиційні агротехнічні підходи часто не дають очікуваного ефекту, оскільки не враховують фундаментальний чинник біологічного стресу – аделопатичну взаємодію рослин. Наукова проблема полягає у необхідності глибокого вивчення аделопатичного потенціалу лікарських рослин, ідентифікації біологічно активних екзометаболітів (колінів, терпенів, алкалоїдів) та з'ясування їхньої ролі у формуванні ґрунтового мікробіоценозу. Розуміння механізмів хімічної взаємодії в агрофітоценозах дозволить розробити ефективні технологічні рішення щодо оптимізації сівозмін, підбору толерантних культур-попередників та впровадження ресурсощадних методів захисту рослин. Таким чином, дослідження аделопатичних особливостей лікарських рослин є критично важливим для забезпечення стабільної продуктивності галузі та екологізації сучасного землеробства.

Постановка проблеми. В сучасних умовах розвитку сільського господарства особливого значення набуває розробка та впровадження високогумусних і біологічно стійких агрофітоценозів лікарських рослин. Проблема полягає в тому, що інтенсифікація вирощування цінних інтродуцентів (шавлії мускатної, лаванди справжньої, м'яти перцевої та ін.) супроводжується накопиченням у навколишньому середовищі специфічних біогенних виділень – колінів та ефірних масел, що мають високу фітотоксичну активність. Складна хімічна взаємодія між вищими рослинами та мікробіоценозом ґрунту часто призводить до виникнення алелопатичної напруженості, яка візуалізується через значне зрідження посівів, передчасне фізіологічне старіння багаторічних культур та зниження їхньої опірності до збудників фузаріозу, іржі та бактеріозів. Недостатня вивченість механізмів дії летких і водорозчинних екзометаболітів, а також відсутність чітких даних щодо алелопатичної толерантності лікарських рослин у монокультурі, унеможливають створення ефективних технологічних рішень щодо захисту рослин та оптимізації сівозмін у Лісостепу України. Це зумовлює необхідність ґрунтового аналізу алелопатичного потенціалу лікарських культур для стабілізації функціонування агроєкосистем.

Методика досліджень. Дослідження проводилися у динаміці за основними фазами вегетації (відростання, бутонізація, цвітіння) на промислових плантаціях шавлії мускатної (*Salvia sclarea* L.), лаванди вузьколистої (*Lavandula angustifolia* Mill.), м'яти перцевої (*Mentha piperita* L.), ромашки аптечної (*Matricaria chamomilla* L.) та інших лікарських культур у різних ґрунтово-кліматичних зонах України, зокрема на базі спеціалізованих господарств Запорізької, Львівської та Хмельницької областей. Об'єктами аналізу слугували різні органи рослин та зразки ризосферного і міжрядного ґрунту, а як контроль використовувалися ділянки поза зоною впливу агрофітоценозів [2, с. 146]. Лабораторна оцінка алелопатичної активності здійснювалася методом біопроб у чотирикратній повторності з використанням тест-об'єктів крес-салату (*Lepidium sativum* L.) та озимої пшениці (*Triticum aestivum* L.) сорту Безоста 1, де вивчався вплив водорозчинних, водно-спиртових витяжок та летких виділень на енергію проростання насіння.

Результати досліджень. Виділення біогенного характеру мають виключно важливе значення в хімічній взаємодії організмів на різних рівнях їх існування, починаючи з мікроскопічних істот і закінчуючи вищими рослинами. Вони можуть інгібувати або стимулювати життєво важливі функції (проростання спор, схожість насіння), справляючи вирішальний вплив на життя біогеоценозів та функціонування збалансованих процесів у біосфері [1]. У проблемі взаємодії організмів вищі рослини займають домінуюче місце через накопичення величезної біомаси та високу метаболічну здатність. Сума всіх виділень живих і мертвих органів складає алелопатичний потенціал, який створює відповідну напруженість середовища [3, с. 56]. Нами запропоновано всі типи виділень (активні, пасивні, посмертні) називати алелопатичними, незалежно від способу їх витягання.

Аналіз за Е. Райсом [9, с. 114] дозволив віднести алелопатичні агенти – інгібітори рослинного і мікробного походження – до 15 хімічних груп. Дані про хімічну природу основних груп сполук наведено у таблиці 1.

Систематизація алелопатично активних речовин за Е. Райсом дозволяє виділити 15 основних груп сполук, проте для ефіроолійних та лікарських культур Побужжя ключове значення мають перші п'ять категорій (табл. 1). Встановлено, що фітотоксичний ефект має комплексний характер: від прямої деструкції цитоплазматичних мембран під дією летких терпеноїдів до глибоких метаболічних порушень, спричинених фенольними інгібіторами.

Таблиця 1

Біохімічна характеристика та механізми дії основних груп аделопатичних агентів (за Е. Райсом із доповненнями)

№ з/п	Класифікація хімічних сполук	Діючі біохімічні агенти	Основні рослини-продуценти (донори)	Характер фітотоксичного впливу на тест-об'єкт
1	Терпеноїди (моно- та сесквітерпени)	Цинеол, камфора, ліналоол	<i>Salvia sclarea</i> L., <i>Lavandula</i> sp., <i>Mentha</i> sp.	Порушення проникності мембран, інгібування дихання
2	Фенольні сполуки (флавоноїди, кумарини)	Кверцетин, скополетин, таніни	<i>Matricaria chamomilla</i> L., Scrophulariaceae	Блокування мітотичного поділу клітин, окиснення ферментів
3	Органічні кислоти (жирні та ароматичні)	Ванілінова, ферулова, корична к-ти	<i>Valeriana officinalis</i> L., <i>Althaea</i> sp.	Зміна pH ризосфери, пригнічення поглинання іонів
4	Алкалоїди (азотовмісні сполуки)	Гіосциамін, атропін, берберин	<i>Hyoscyamus niger</i> L., <i>Atropa belladonna</i> L.	Дезорганізація синтезу білків та нуклеїнових кислот
5	Стероїди та сапоніни (глікозиди)	Гліциризин, дигітоксин	<i>Glycyrrhiza glabra</i> L., <i>Digitalis</i> sp.	

Особливий інтерес викликає здатність фенольних сполук (флавоноїдів) виступати в ролі природних регуляторів росту, які у високих концентраціях стають цитостатиками. Це теоретично обґрунтовує отримані нами дані щодо пригнічення меристематичної активності коренів пшениці озимої, що буде детально розглянуто в наступних розділах

Важливим аспектом стало з'ясування детального механізму інгібування. Встановлено, що специфічні екзометаболіти діють як природні цитостатиками: проникаючи через цитоплазматичні мембрани, вони дезорганізують роботу мітохондрій та блокують процеси окиснювального фосфорилування. Це призводить до критичного дефіциту АТФ, що, у свою чергу, зупиняє мітотичний поділ клітин у меристематичних тканинах кореня та точках росту проростка. Візуально це проявляється у гальмуванні видовження клітин та аномальному потовщенні кореневих кінчиків біотестів. Кількісна оцінка впливу різних фракцій виділень на енергію проростання пшениці озимої (за довжиною коренів та висотою колеоптіля) представлена у таблиці 2.

Дані таблиці 2 демонструють диференційований відгук тест-об'єкта на вплив різних типів екзометаболітів. Найбільш виражений депресивний ефект (81,8%) зафіксовано при експозиції проростків пшениці озимої (*Triticum aestivum* L.) у середовищі легких фракцій суцвіть *Salvia sclarea* L., що вказує на високу концентрацію аделопатично активних терпеноїдів у пароподібній фазі.

Характерно, що інгібування росту кореневої системи проростків у середньому на 5,8–7,4% перевищує відповідні показники для колеоптілів. Це підтверджує гіпотезу про первинну реакцію кореневої меристеми на контакт із фітотоксикантами. Мінімальну аделопатичну напруженість серед досліджуваних видів проявили екстракти *Valeriana officinalis* L. (41,9%), що корелює з класифікацією даного виду як аутолерантного. Отримані результати підтверджують необхідність

врахування специфічної фітотоксичності ефіроолійних культур при проектуванні агроландшафтів та схем ротатії у сівозмінах.

Порівняльний аналіз морфометричних параметрів пшениці засвідчив, що коренева система виявилася більш чутливою до дії колінів, ніж колеоптиль. Зокрема, під впливом летких виділень шавлії мускатної ріст коренів пригнічувався на 6,3% інтенсивніше порівняно з колеоптилем. Така диференціація відгуку пояснюється безпосереднім контактом меристеми кореня з алелопатично активним субстратом (або адсорбованими на фільтрувальному папері токсинами). Водночас значне скорочення висоти колеоптиля (до 24,5–29,8% від контролю) свідчить про глибоке пригнічення енергії початкового росту, що в польових умовах призводить до нерівномірності сходів та зниження конкурентоспроможності агрофітоценозу.

Таблиця 2

**Алелопатична активність екзометаболітів лікарських рослин
(тест-об'єкт – пшениця озима *Triticum aestivum* L.)**

Біологічний об'єкт (рослина-донор)	Тип алелопатичного субстрату (екстрагент)	Інгібування росту кореневої системи, % до контролю	Інгібування росту колеоптиля, % до контролю	Інтегральний показник фітотоксичності, %
Контроль	Дистильована вода	100,0	100,0	0,0
Шавлія мускатна (<i>Salvia sclarea</i> L.)	Леткі фракції суцвіть (фітонциди)	18,2	24,5	81,8
Шавлія мускатна (<i>Salvia sclarea</i> L.)	Водна витяжка листової маси	42,5	48,1	57,5
Лаванда вузьколиста (<i>Lavandula angustifolia</i> Mill.)	Леткі фракції квіток	22,4	29,8	77,6
М'ята перцева (<i>Mentha piperita</i> L.)	Водно-спиртовий екстракт пагонів	34,7	39,2	65,3
Валеріана лікарська (<i>Valeriana officinalis</i> L.)	Водна витяжка кореневищ	58,1	62,4	

З біогеохімічної точки зору, причиною системного інгібування є адсорбція ефірних масел ґрунтом, внаслідок чого він набуває ліпофільного характеру [5, с. 126]. Це створює гідрофобність мікроагрегатів, що блокує нормальний водно-повітряний обмін та активує накопичення патогенних грибів (*Fusarium*, *Verticillium*). Такі зміни провокують «алелопатичну петлю»: гідрофобність ґрунту сприяє консервації токсинів, які пригнічують корисну мікрофлору та виснажують життєвий потенціал проростків уже на етапі прокльовування насіння.

Сучасне рослинництво України має значний потенціал для вирощування лікарських та ефіроолійних культур, проте структура їх посівних площ за останні десятиліття зазнала суттєвих трансформацій. Традиційно стратегічними для галузі залишаються коріандр посівний, шавлія мускатна, лаванда вузьколиста та м'ята перцева. Проте при промисловому культивуванні ці види виявляють високу чутливість до

чинників екотопу, що призводить до стрімкої деградації плантацій. Наприклад, посіви ромашки аптечної та блекоти чорної демонструють ознаки пригнічення вже на 3-й рік монокультури, а посіви подорожника великого – після 2-х років вирощування.

З біогеохімічної точки зору, першопричиною цього явища є адсорбція ефірних масел ґрунтовими колоїдами, внаслідок чого субстрат набуває вираженого ліпофільного характеру [6, с. 116]. Гідрофобність ґрунтових мікроагрегатів блокує капілярний водно-повітряний обмін, що створює специфічну нішу для експансії патогенної мікрофлори. Нами встановлено, що на фоні алелопатичного стресу відбувається накопичення спеціалізованих збудників судинного в'янення та корневих гнилей, зокрема грибів *Fusarium oxysporum*, *Verticillium dahliae* та *Fusarium solani*. Ці мікроорганізми замикають «алелопатичну петлю»: їхні мікотоксини вступають у синергію з колінами рослин-донорів, консервуючи токсичний фон ґрунту та провокуючи хронічну ґрунтовому [7, с. 56].

Таблиця 3

Екологічна класифікація лікарських рослин за ступенем аутолерантності та деградації агрофітоценозів

Екологічна група за типом стратегії	Біологічні об'єкти (репрезентативні види)	Рекомендована експозиція в монокультурі, років	Провідний лімітуючий чинник та характер трансформації екотопу
Аутолерантні	<i>Valeriana officinalis</i> L., <i>Althaea officinalis</i> L.	4–6	Поступове виснаження пулу макроелементів та мінерального складу ґрунту
Помірно толерантні	<i>Foeniculum vulgare</i> Mill., <i>Anisum vulgare</i> Gaertn.	3–4	Накопичення вузькоспеціалізованої патогенної мікрофлори в ризосфері
Аутоінтолерантні	<i>Salvia sclarea</i> L., <i>Mentha piperita</i> L., <i>Matricaria chamomilla</i> L.	1–2	Біогеохімічна ліпофільність субстрату, гостре самоотруєння колінами

Дані таблиці 3 ілюструють динаміку деградації штучних фітоценозів залежно від біологічних особливостей виду [11, с. 23]. Встановлено, що для аутоінтолерантних культур (*Salvia sclarea* L., *Mentha piperita* L.) провідним чинником зниження продуктивності є формування явища ґрунтовому, спричиненого порушенням біогеохімічного балансу.

На відміну від короткострокового інгібування (табл. 2), у багаторічній культурі спостерігається ефект кумулятивної токсичності. Адсорбовані ґрунтом ефірні масла надають йому стійкого ліпофільного характеру, що призводить до консервації екзо-метаболітів. Це провокує розвиток специфічного самоотруєння, при якому хронічний алелопатичний стрес стимулює рослини до посиленого синтезу БАВ (зокрема, флавоноїдних сполук у представників *Scrophulariaceae* – на 0,1–0,3% понад норму). Такий зворотний зв'язок замикає циклічний процес деградації середовища, що робить неможливим ефективне вирощування цих культур без ротації у сівозміні.

Натомість аутолерантні види (*Valeriana officinalis* L.) демонструють здатність до тривалого функціонування (до 6 років), оскільки їхні метаболіти не спричиняють глибокої фізико-хімічної трансформації екотопу, а лімітування росту відбувається переважно через природне виснаження запасів поживних речовин

Висновки: 1. Встановлено, що алелопатичний потенціал лікарських рослин формується комплексом екзометаболітів, серед яких домінуючу роль відіграють терпеноїди, фенольні сполуки та алкалоїди. Найвищу фітотоксичну активність виявлено у легких фракціях суцвіть *Salvia sclarea* L. та *Lavandula angustifolia* Mill., які інгібують ріст тест-об'єктів на 77,6–81,8% від контролю.

Доведено, що механізм алелопатичного інгібування має цитостатичний характер. Специфічні компоненти виділень блокують процеси окиснювального фосфорилування в мітохондріях, що спричиняє дефіцит АТФ та зупиняє мітотичний поділ клітин у меристематичних тканинах. Коренева система пшениці озимої виявляє вищу сенситивність до токсинів (інгібування на 5,8–7,4% інтенсивніше), ніж колеоптіль, що підтверджує первинність контактного стресу.

Обґрунтовано біогеохімічну природу ґрунтовтоми: адсорбція ліпідних фракцій екзометаболітів ґрунтовими колоїдами надає субстрату ліпофільного характеру, порушуючи капілярний водно-повітряний обмін. Це сприяє експансії патогенних мікроміцетів *Fusarium oxysporum* та *Verticillium dahliae*, які в синергії з рослинними колінами формують «алелопатичну петлю» самоотруєння агрофітоценозу.

На основі розробленої класифікації за ступенем аутоотолерантності встановлено, що *Valeriana officinalis* L. придатна для тривалого вирощування (до 6 років), тоді як *Salvia sclarea* L. та *Mentha piperita* L. потребують обов'язкової ротації у сівозміні вже після 1–2 років вегетації для детоксикації агроландшафту.

Перспективи подальших досліджень. Подальша наукова робота буде спрямована на вивчення мікробіологічних методів детоксикації ґрунтів із високим ступенем ліпофільності шляхом підбору специфічних штамів-деструкторів ефірних масел. Окрему увагу планується приділити розробці адаптивних схем сівозмін у межах агроландшафтів Середнього Побужжя, які б дозволили мінімізувати алелопатичну напруженість без втрати фармакологічної якості сировини інтродукованих видів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Гродзінський А. М. Алелопатія в житті рослин і їх угруповань. Київ : Наукова думка, 1965. 200 с.
2. Гродзінський А. М. Основи хімічної взаємодії рослин. Київ : Наукова думка, 1973. 204 с.
3. Гнатюк Н. О. Просторово-часові зміни агроландшафтів та алелопатична напруженість Середнього Побужжя. Наукові доповіді НУБіП України. 2024. Т. 15, № 2. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/> (дата звернення: 26.03.2026).
4. Ільєнко А. А. Алелопатичні та біохімічні особливості деяких видів родини ранникових (*Scrophulariaceae* Juss.) в умовах культури. Український ботанічний журнал. 1983. Т. 40, № 6. С. 34–38.
5. Костишина П. П., Бойко Н. П. Алелопатичний потенціал ефіроолійних культур та його вплив на мікробіоту ґрунту. Агроекологічний журнал. 2019. № 3. С. 45–51.
6. Якубенко Б. Є., Григорюк І. П. Біогеохімічні аспекти трансформації агроландшафтів у зоні Лісостепу. Вісник ХНАУ. 2021. Вип. 2. С. 12–19.
7. Latif S., Chiapusio G., Weston L. A. Allelopathy and the role of secondary metabolites in agriculture. *Metabolites*. 2022. Vol. 12, No. 10. P. 979. DOI: 10.3390/metabo12100979.
8. Li Y., Wu Z., Liu S. Soil sickness in tea (*Camellia sinensis* L.) plantations is associated with a reduction in soil microbial diversity and an accumulation of *Fusarium oxysporum*. *Microorganisms*. 2023. Vol. 11, No. 3. P. 654. DOI: 10.3390/microorganisms11030654.
9. Rice E. L. *Allelopathy*. 2nd ed. Orlando : Academic Press, 1984. 422 p.
10. Scavo A., Mauromicale G. Role of allelopathy in weed management for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2021. Vol. 41, No. 7. DOI: 10.1007/s13593-021-00665-w.
11. Zulfiqar F., Casadesús A., Munné-Bosch S. Lipophilic antioxidants and soil hydrophobicity: a review of chemical interactions in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*. 2020. Vol. 71, No. 14. P. 3900–3912. DOI: 10.1093/jxb/eraa161.

Дата першого надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026