https://doi.org/10.15407/frg2025.05.371
УДК 631.95:57.085.2

БІОЛОГІЧНІ ГЕРБІЦИДИ: ЕКОЛОГІЧНА АЛЬТЕРНАТИВА СИНТЕТИЧНИМ ГЕРБІЦИДАМ

В.О. СТОРОЖЕНКО, В.В. ЮХИМУК

Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17
e-mail: vstoro@ukr.net

Огляд присвячено ролі біогербіцидів у контролюванні бур'янів, залученні їх як альтернативи синтетичним гербіцидам, в тому числі для подолання резистентності до дії синтетичних гербіцидів. Розглядаються можливості їх сумісного застосування із синтетичними гербіцидами для захисту посівів від бур'янів. Наводиться короткий історичний нарис розвитку біогербіцидних технологій, розглядається сучасне поширення біогербіцидів у світі та проблеми їх застосування. Показано, що біогербіциди мають різноманітне природне походження. Джерелами отримання біогербіцидів можуть бути алелопатичні бактерії і рослини, гриби й мікотоксини, виділені з них. Окрема увага приділяється ефірним оліям, як речовинам з потенційною гербіцидною активністю. Розглядаються фізіологічні особливості впливу специфічних і неспецифічних біогербіцидів на бур'яни, їх селективність щодо окремих їх видів, так і культурних рослин, а також проблеми, пов'язані з цим. Обговорюються особливості пошуку рослинних видів-мішеней для різних типів і форм біогербіцидів. Описуються деякі ідентифіковані сполуки природного походження з гербіцидною активністю та зв'язок між їх хімічною структурою й фітотоксичністю. Розглянуто проблеми, пов'язані з виробництвом, економічною ефективністю застосування біогербіцидів в агропромисловому секторі та можливі шляхи їх вирішення. Окремий розділ присвячено найсучаснішим технологіям розробок нових біогербіцидів і синтетичних гербіцидів за допомогою біотехнологічних методів, а також залучення штучного інтелекту в ці процеси. Аналізуються їх потенційні переваги, пов'язані насамперед з істотним зменшенням строків ідентифікації гербіцидів природного походження, їх скринінгу та, в підсумку, часу розробки нових гербіцидів природного походження.

Ключові слова: бур'яни, резистентність, біогербіциди, синтетичні гербіциди, скринінг, мікогербіциди, алелопатія, бактеріальні гербіциди, ефіроолійні гербіциди.

Одним із важливих чинників забезпечення світового виробництва продовольства за постійного зростання населення планети є захист агрокультур від бур'янів [1]. За багатьма оцінками, щорічні економічні збитки у сільськогосподарській галузі, пов'язані з бур'янами, становлять значні суми. Зокрема, в Австралії — це понад 3,3 млрд авст-

Цитування: Стороженко В.О., Юхимук В.В. Біологічні гербіциди: екологічна альтернатива синтетичним гербіцидам. *Фізіологія рослин і генетика.* 2025. **57**, № 5. С. 371—404. https://doi.org/10.15407/frg2025.05.371

ралійських доларів [2], в Індії — 11 млрд доларів США [3], а в Сполучених Штатах Америки — 26 млрд доларів США [1]. Сільське господарство в розвинених країнах здебільшого покладається на синтетичні гербіциди для боротьби із засміченістю посівів.

На частку синтетичних гербіцидів припадає понад 44 % усіх пестицидів, які продаються у світі [4]. Але значна залежність від них призвела до появи бур'янів, стійких до гербіцидів. Серед 273 видів найпоширеніших у світі бур'янів зараз відомо про 539 унікальних випадків їхньої резистентності до синтетичних гербіцидів [5]. Серед них п'ять резистентних біотипів зареєстровано в Україні [5, 6]. Крім поширення резистентних біотипів бур'янів, є й інші значні недоліки використання синтетичних гербіцидів. Через їх тотальне поширення вони накопичуються в ґрунтах, їхні залишки або продукти розпаду забруднюють стічні й ґрунтові води [7—9]. Також дорожнеча розробки синтетичних гербіцидів значно обмежує появу нових препаратів. Тому необхідно розробити нові методи захисту агроценозів від бур'янів.

Іншим важливим стимулом для пошуку альтернативних способів боротьби з бур'янами є екологізація сільського господарства як для мінімізації негативного впливу гербіцидів на агроценози, так і для вирощування безпечної рослинної сировини для харчової промисловості. У зв'язку з цим вчені, пов'язані із сільським господарством, ведуть активні пошуки нових альтернативних методів боротьби з бур'янами або вдосконалюють вже існуючі. Контроль небажаної рослинності може здійснюватися також за допомогою різних механічних методів, які, однак, часто мають низьку продуктивність, а на деяких культурах їх використання практично неможливе.

Альтернативою синтетичним гербіцидам можуть бути деякі біологічно активні сполуки, що об'єднуються в групу біогербіцидів. Вони мають цілу низку екологічних переваг, таких як високий рівень специфічності до цільового бур'яну, екологічна безпека для екосистем через відсутність накопичення їх залишків у навколишньому середовищі. Найбільшими ж перевагами є висока ефективність стосовно резистентних бур'янів та їхня істотно нижча вартість [10—11].

Джерелом високої біогербіцидної активності можуть бути як метаболіти живих організмів, так і самі ці організми. Формально біогербіциди можна розділити на алелопатичні (рослинного та бактеріального походження), грибні й вірусні. Найбільший інтерес становлять суспензії живих мікроорганізмів і грибів (ізоляти), токсини (виділені з цих ізолятів), а також екстракти алелопатичних рослин.

Біогербіциди, як і синтетичні гербіциди, можуть мати високу видоспецифічність, проте слід наголосити, що саме для біогербіцидів вона часто вираженіша. Успішним може виявитися використання біогербіцидів як альтернативних джерел для боротьби з резистентністю бур'янів до синтетичних гербіцидів, проте ще недостатньо розроблено методологічну базу для формування єдиної концепції захисту посівів на основі нових екологічно безпечних агротехнологій [12—14].

Розквіт наукових розробок у напрямі створення біогербіцидів відбувався з початку 1980-х років, тоді було зареєстровано багато па-

тентів [15]. Водночас частка сучасного ринку біогербіцидів наразі становить менше 10 % усіх біопестицидів [16, 17]. За даними Bailey [18], до 2012 р. у США зареєстровано лише сім біогербіцидів, Канаді — шість, а в Україні та Японії — по одному. Пізніше Cordeau et al. [19] повідомили, що до 2016 р. на світовому ринку було зареєстровано лише 13 біогербіцидів, а в США до 2020 р. — лише шість комерційних біогербіцидів, отриманих з ефірних олій та/або їхніх сполук [20]. Всесвітній каталог біологічних засобів боротьби з бур'янами з використанням комах і патогенів містить список із 74 видів бур'янів, які стали об'єктами спроб боротьби з ними з використанням загалом 138 грибних, бактеріальних і вірусних патогенів [21].

Для біологічного контролю бур'янів необхідне цілеспрямоване використання природних ворогів бур'яну для скорочення його популяції до рівня бажаного порогового значення [22, 23]. Водночас існують серйозні чинники, які обмежують можливості переходу біогербіцидів до рангу комерційно успішних продуктів, а саме: біологічна мінливість хазяїна [24], обмеження за навколишнім середовищем (дія біогербіцидів залежить від зовнішніх умов) [25—27], технічні (на шляху від його розробки до оптового виробництва) [24] та комерційні (ємність ринку, патентний захист, формування довіри до нового продукту) обмеження [28]. Найбільшою проблемою щодо використання біогербіцидів є те, що вони можуть бути задіяні як варіант для контролю по суті лише одного-двох цільових бур'янів, тобто як незначне доповнення до звичайних синтетичних гербіцидів [29]. Водночас сучасні дослідження, які часто є біотехнологічними проєктами, найчастіше з використанням штучного інтелекту, прискорюють процес скринінгу нових речовин з високою гербіцидною активністю, що істотно пришвидшує пошук нових ефективних біогербіцидів [30].

Біогербіциди на основі бактерій. Пригнічення росту рослин бактеріями може відбуватися декількома шляхами: це може бути його пряме пригнічення самими бактеріями, які колонізують рослину, а також опосередковане завдяки метаболітам, виділеним у процесі їх життєдіяльності. Важливим побічним результатом цього впливу є зниження репродуктивної здатності бур'янів і чисельності їхньої популяції [31]. Ризобактерії, здатні синтезувати вторинні метаболіти в ризосфері бур'янів і пригнічувати їх ріст, називаються «алелопатичними бактеріями» (АБ) або «шкідливими ризобактеріями» [32, 33]. АБ використовують безліч стратегій для пригнічення росту бур'янів [34].

Слід наголосити, що найважливішими чинниками успішності мікробного біологічного контролю бур'янів є їх розподіл у ґрунті, наявність біодоступної концентрації та достатньої фітотоксичності мікробних метаболітів щодо цільових бур'янів [35]. Водночас біоконтроль бур'янів за допомогою АБ має досить багато переваг порівняно, наприклад, з грибними агентами: швидкий ріст, простота розмноження, реалізація можливостей генетичних модифікацій, а також тривалий період їхньої алелопатичної активності, іноді фактично до збору врожаю [36].

Поширеною функцією бактерій з гербіцидною активністю є створення фітогормонального дисбалансу в організмі бур'яну внас-

лідок вищої продукції фітогормонів у їх клітинах. Фітогормони в низьких концентраціях беруть участь у життєво важливих фізіологічних процесах рослин і діють як гормони росту, тоді як високі концентрації екзогенних фітогормонів перетворюють активність останніх на гербіцидну, індукуючи в результаті аутотоксичність у бур'янів. Відомо, що здатність синтезувати індоліл-3-оцтову кислоту (ІОК) мають 80 % ризобактерій, включно вільноіснуючі бактерії *Azospirillum spp.*, ентеробактер клоаки (*Enterobacter cloacae*), алкалігенес фекаліс (*Alkaligenes faecalis*), *Acetobacter dizotrophicous, Xanthomonas* [37, 38].

Також підтверджено, що обробка бур'янів екзогенними фітогормонами може індукувати їхню загибель. Зокрема, екзогенний триптофан може спричинювати зниження швидкості росту берізки польової (*Convolvulus arvensis* L.) внаслідок надлишкового синтезу ауксину. Це викликало пригнічення росту коренів і пагонів, подовження міжвузлів, а також хлороз листків, закриття продихів і вторинний окиснювальний стрес [39, 40]. Разом з тим, негативні ефекти впливу екзогенних ауксинів можуть залежати від багатьох чинників, таких як вік, фаза розвитку, вид рослини. Надлишковий синтез гормонів інших класів також часто є шкідливим для рослин, оскільки бактеріальний синтез гіберелінів і цитокінінів має інгібувальний вплив на їхній ріст [41].

Біогербіциди можуть впливати на процес ціаногенезу у бур'янів, індукуючи їх загибель. Відомо, що гліцин і метіонін є головними попередниками в процесі біосинтезу ціаніду [42], а процес ціаногенезу посилюється обробкою рослини екзогенним гліцином [43, 44]. Основним каталізатором ціаногенезу є фермент HCN-синтаза, який каталізує декарбоксилювання головного проміжного продукту цього процесу — гліцину [45]. Пов'язаний з мембраною фермент HCN-синтаза, є рушійною силою ціаногенезу. Він каталізує окиснювальне декарбоксилювання гліцину, попередника ціаніду. Наприклад, бактерії роду *Pseudomonas* пригнічували ріст рослин томатів (*Solanum lycopersicum* L.) і пшениці (*Triticum aestivum* L.) внаслідок дії екзогенного гліцину на 30—50 % як активатора синтезу HCN, що залежить не тільки від вмісту амінокислот-попередників його синтезу (гліцин, метіонін), а й від pH, концентрації заліза та неорганічного фосфату в середовищі. HCN пригнічує різні фізіологічні процеси в рослинах, зокрема дихання, метаболізм вуглеводів, нітратів, асиміляцію CO_2, детоксикацію активних форм кисню (АФК) внаслідок інгібування ключових ферментів, які беруть участь у цих процесах. Доведено, зокрема, що він інгібує нітрогеназу, нітрат/нітритредуктазу, пероксидазу, Cu/Zn-супероксиддисмутазу, цитохром-С-оксидази та рибулозобісфосфаткарбоксилазу [46].

Фітотоксин, отриманий з *Xanthomonas campestris* pv. *retroflexus*, містить органічні кислоти, які мають інгібувальну активність проти щириці звичайної (*Amaranthus retroflexus* L.), грициків звичайних (*Capsella bursa-pastoris* L.) і портулака городнього (*Portulaca oleracea* L.). Його активність проявляється в інгібуванні росту коренів рослин представлених видів [47].

Динаміка і обсяг популяції АБ може регулюватися змінами середовища ризосфери. Кількість АБ у ґрунті залежить як від едафічних

чинників, у тому числі температури, вологості, pH ґрунтового розчину [48, 49], так і безпосередньо від технології обробітку ґрунту. За звичайної або скороченої технології збільшення інгібувальної дії АБ спостерігали, зокрема, на рослинах стоколоса покрівельного (*Bromus tectorum* L.) та егілопса циліндричного (*Aegilops cylindrica* Host.) [50].

Відомо, що рід бактерій *Pseudomonas* домінує у технологіях розробки бактеріальних біогербіцидів, а також є найпоширенішим засобом боротьби зі збудниками хвороб агрокультур. Гербіцидна активність притаманна багатьом представникам цього роду бактерій, найперспективнішими з них є псевдомонада напухла (*P. putida*), псевдомонада флуоресцентна *(P. fluorescence)*, псевдомонада тривіальна (*P. trivialis*) і синьогнійна паличка (*P. aeruginosa*) [35, 44].

Меншою мірою як біогербіциди потенційно можуть використовуватися види інших родів, таких як *Xanthomonas*, *Vibrio*, *Agrobacterium*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Chryseomonas*, *Aeromonas* [46, 51]. Незважаючи на значні наукові розробки та пошуки штамів бактерій з гербіцидною активністю, стадії комерційного виробництва досягли небагато проєктів [11]. Одним із успішних комерційних продуктів є гербіцид «Camparico», зареєстрований у 1997 р., інший гербіцид під назвою D7, був зареєстрований Агентством з охорони навколишнього середовища США у 2014 р. на основі *P. fluorescence* проти стоколоса покрівельного (*Bromus tectorum* L.) [50].

Для успішного біологічного контролю за допомогою екзогенних АБ важливою є наявність часового збігу найвірулентнішої стадії агента біологічного контролю з найсприйнятливішою стадією розвитку бур'янів у період їх активного росту [52]. Скринінг як окремих видів і штамів АБ на фітотоксичність, так і окремих видів та сортів рослин на сприйнятливість до них проводився у багатьох дослідженнях. Ще у 2007 р. Kennedy і Stubbs [53] провели масштабний скринінг 2450 штамів АБ, виділених із рослин пшениці, проти *Aegilops cylindrica* Host. та мишію зеленого (*Setaria viridis* L.) і виявили 76 штамів, які пригнічували ріст цих бур'янів, але не пшениці, що ще більше посилило ідею селективного пригнічення АБ бур'янів. У пізнішому, також масштабному дослідженні вчених із Південної Кореї 1300 штамів бактерій було виділено та протестовано на гербіцидну активність проти широколистих і злакових бур'янів. Серед відібраних 102 активних штамів найбільшу гербіцидну активність спостерігали для ізолятів трьох з них. Штами 101, 128 та 329 знижували швидкість росту бур'янів пальчатки кров'яної (*Digitaria sanguinalis* (L.) Scop.) на 67, 78 та 100 %, відповідно. Філогенетичний аналіз секвенування гена 16S рРНК визначив, що штам 329 має 99 % подібності до *Streptomyces anulatus* (HBUM 174206). Після вилучення та очищення біогербіцидних метаболітів штаму 329 методами колонкової хроматографії та високоефективної рідинної хроматографії було зроблено висновок, що його біогербіцидні метаболіти можуть сформувати основу для виробництва ефективних біогербіцидів у майбутньому [54].

У спільній роботі литовських та пакистанських дослідників вивчалася ризосфера курячого проса (*Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv.) та кукурудзи (*Zea mays* L.) з метою виявлення АБ із високим біогербіцидним потенціалом. Велика колекція штамів ризобактерій з ку-

курудзи та курячого проса була охарактеризована щодо підвищеного рівня синтезу ціаніду, інгібування росту *Escherichia coli*, вивільнення індоліл-3-оцтової кислоти, активності хітинази, каталази та оксидази, а також впливу досліджених штамів на ріст цих видів. Виявлено, що три з шести досліджених штамів пригнічували ріст пагонів (на 59 %) і коренів (на 63 %), загальну біомасу (на 64 %) та накопичення сухої речовини (на 63 %) порівняно з контролем. Автори рекомендували використовувати активні штами АБ як біогербіциди для селективного пригнічення росту бур'янів у посівах кукурудзи [55].

Стійкий до гліфосату «супербур'ян» амарант Палмера (*Amaranthus palmeri* S. Wats.) вважається найпроблемнішим бур'яном у сільському господарстві країн Північної Америки. Мексиканські вчені оцінили потенційний біогербіцидний ефект 15 ізолятів АБ з ризосфери амаранта Палмера як in vitro, так і в умовах вегетаційного досліду. Ізоляти штамів *Enterobacter* sp. (TR10 і TR18) пригнічували проростання насіння in vitro, тоді як два інших — *Bacillus* sp (TR25) і *Pseudomonas* sp. (TR36) продемонстрували здатність пригнічувати ріст рослин *Amaranthus palmeri* у вегетаційній камері, не впливаючи на проростання та ріст кукурудзи. Ці чотири ізоляти ідентифіковані як *Pseudomonas* sp. (TR10 та TR36), *Enterobacter sp.* (TR18) та *Bacillus sp.* (TR25). Крім того, біосинтез як летких речовин, так і дифузних метаболітів цих штамів розглянутий як ланка механізму інгібування проростання та затримки розвитку рослин бур'яну [56].

Проведено оцінку біологічної активності ферментаційного бульйону домінуючих бактеріальних штамів з ризосфери пшениці на ріст вівсюга (*Avena fatua* L.) [57]. Скринінгові дослідження проводились на 20 сортах пшениці. Їхні результати показали, що бактеріальний ферментаційний бульйон пригнічує ріст проростків і рослин вівсюга різною мірою, тоді як бактеріальні штами X3, X4, X8, X12, X16 та X20 мають різний рівень інгібувальної активності, а X20 — найвищу гербіцидну ефективність. Згідно з молекулярно-біологічною ідентифікацією отримані бактеріальні штами X20 виявилися найкориснішими для розробки біогербіцидів на бактеріальній основі для боротьби з бур'янами вівсюга на пшеничних полях.

В окремих дослідженнях проводилася ідентифікація речовин, які відіграють важливу роль у формуванні гербіцидної активності бактерій. Синтез фітотоксинів характерний для видів роду *Pseudomonas* [58, 59]. *Pseudomonas fluorescence* синтезує фітотоксин, який порушує проникність мембран клітин коренів. Штам D7 виявив активність у пригніченні росту *B. tectorum* за рахунок фітотоксинів. Водночас зниження росту коренів бур'янів цього виду було пов'язане з комплексом метаболітів, який включає жирні кислоти, ефіри, пептиди та хромопептиди [60].

В дослідженні Omer et al. [61] екстрагували та ідентифікували сполуки коронатин, ферулові кислоти, сирингопептин, похідні колетотрихінів та кетопіперазин у профілі фітотоксинів двох штамів синьозеленої палички *P. syringae* та одного *Colletotrichum sp.*, відповідальних за зниження росту бур'янів остистої канаркової трави

(*Phalaris paradoxa* L.) і багатоборідника провансальського (*Polypogon monspeliensis* L.).

Фітотоксини (2-амінофеноксазон, феназин-1-карбонова кислота і 2-амінофенол), екстраговані зі штаму 3366 бактерії *Pseudomonas syringae*, пригнічували ріст декількох видів рослин [62]. Аналогічні сполуки були також ефективними для контролю стоколоса покрівельного. Пізніше зі штаму CHA0 *P. fluorescence* було виділено активну сполуку широкого спектра дії 2,4-діацетилфлороглюцин, який виявився токсичним для багатьох сільськогосподарських культур [63].

Ще одна група дослідників виділила зі штаму C1501 синьогнійної палички (*P. aeruginosa* L.) метаболіт 2-(гідроксиметил)фенол, фітотоксичний щодо щириці гібридної (*Amaranthus hybridus* L.) [64]. Robeson et al. [65] екстрагували з *Alternaria eichorniae* альтейхін, який демонстрував високий рівень фітотоксичності проти поширеного у південних широтах бур'яну — водного гіацинта (*Eichornia crassipes* (Mart.) Solms—Laub.). Kong et al. [66] ідентифікували тагетитоксин у клітинах бактерії *P. syringae* pv. *tagetis*, яка була збудником хвороб у родини айстрових. Дія цієї біоактивної сполуки призводила до хлорозу в активно проліферувальних тканинах.

Існують приклади комплексного впливу окремих штамів бактерій на декілька видів рослин. Зокрема, група вчених з Індії та Саудівської Аравії виділили штам *P. aeruginosa* H6, який мав високу гербіцидну активність відразу проти кількох видів, а саме: слонової трави (*Pennisetum purpureum* Schumach.), рису (*Oryza sativa* L.*)*, гороху посівного (*Pisum sativum* L.) та щириці колючої (*Amaranthus spinosum* L.) [67]. Подібні розробки проводяться також і для бактеріальних біогербіцидів, призначених для застосування у польових умовах. Так, Aguila-Lopez et al. [68] протестували різні системи інкапсуляції метаболітів *Streptomyces* sp. для їх контрольованого виділення. Метаболіти *Streptomyces* sp. здатні інгібувати проростання насіння таких видів, як пажитниця багаторічна (*Lolium perenne* L.), щириця загнута (*Amaranthus retroflexus* L.) і череда волосиста (*Bidens pilosa* L.). Було виявлено, що за внесення в інкапсульованому вигляді вони мають вищий потенціал пригнічення проростання порівняно з прямим внесенням.

Boyette та Hoagland [69] у штаті Массачусетс США виявили декілька незареєстрованих ізолятів бактерій з хворих листків нетреби звичайної (*Xanthium strumarium* L.), які потім ідентифікували як *Xanthomonas* spp. Для подальших досліджень вони використовували найвірулентніший ізолят (LVA987) на *X. strumarium*, злинці канадській (*Conyza canadensis* (L.) Cronquist.*)*, амброзії тридільній (*Ambrosia trifida* L.), амброзії полинолистій (*Ambrosia artemisiifolia* L.), отримавши на них істотні результати його впливу. Отримані дані особливо актуальні, з огляду на широке розповсюдження згаданих бур'янів, а також їхню потенційну стійкість до дії синтетичних гербіцидів.

Ще одним прикладом резистентного до синтетичних гербіцидів виду бур'янів є портулак городній (*Portulaca oleracea* L.). Групою вчених [70] було ідентифіковано штам бактерії *Enterobacter* sp., здатний досить ефективно знижувати схожість насіння *Echinochloa crus-galli* (L.)

P.Beauv. і *P. oleracea* порівняно з контролем, не обробленим цією бактерією.

Іноді спостерігається дуже низька ефективність окремих штамів проти нецільових рослинних об'єктів. Kennedy et al. [71] випробовували штам D7 бактерії псевдомонади флуоресціюючої (*Pseudomonas fluorescens*). Вони підтвердили високий рівень пригнічення росту рослини *Bromus tectorum* і низьку ефективність його використання проти нецільових рослин, що вказує на потенційну перспективність застосування цього штаму в якості біогербіциду.

Розробка біогербіцидів на основі бактерій стикається з низкою перешкод. Однією з них є обмежений доступ до ширшого пулу потенційних мікробних агентів, а в дослідженнях використовуються переважно традиційні методи їх культивування. Водночас ідентифікація та ізоляція мікроорганізмів, які необхідно культивувати з використанням нестандартних лабораторних методів, ускладнена, тому такі мікроорганізми-кандидати в біогербіциди залишаються недослідженими. Також розробка окремих біогербіцидів здебільшого видоспецифічна, тобто потенційний біогербіцид діє лише на одну рослину-хазяїна, або обмежену їх кількість. До того ж процес скринінгу та тестування мікробних ізолятів може бути технологічно дуже трудо- та ресурсомістким, що може потребувати чималих зусиль. Також дуже важливо підвищити «економічну життєздатність» біогербіцидів внаслідок оптимізації процесу виробництва, зниження витрат, пов'язаних із їх просуванням, зокрема на рекламу та маркетинг.

Мікогербіциди. Мікогербіциди є гербіцидами, створеними на основі грибів і мікотоксинів з різноманітною функцією. Вони часто можуть бути використані як інсектициди або фунгіциди [72]. Натепер мікогербіциди вважаються найперспективнішою групою препаратів для класичного біологічного контролю [73]. Як мікогербіциди можуть використовуватися сам гриб і його спори, а також речовини, виділені з них (мікотоксини). Мікогербіциди можуть бути представлені у двох препаративних формах: рідкій та твердій. Рідка форма складається з фракції спор гриба або мікотоксину, води, поверхнево-активної речовини, а тверда — з контамінованих грибом гранул альгінату натрію, вермікуліту або іншого носія [74].

Використання спор патогенних грибів спрямоване на виникнення в популяціях небажаних бур'янів епіфітотій. Водночас використання продуктів життєдіяльності грибів знищує бур'яни лише на оброблених ділянках і, відповідно, ураження не поширюється за межі полів. Мікогербіциди вважаються селективними біогербіцидами, які впливають на один або кілька видів бур'янів, однак у деяких випадках вони можуть пошкоджувати також культурні рослини.

Мікотоксини можуть впливати на вміст хлорофілу та білка, ріст гіпокотилю та коренів, а також інгібувати накопичення сирої маси, що чинить комплексну дію на рослину. Загалом вплив мікотоксинів може поширюватись на різних рівнях організації рослинного організму [75]. Натепер ідентифіковано понад 500 фітотоксинів грибного походження, які належать до полікетонів, фенолів і фенольних кислот, терпеноїдів, азотовмісних метаболітів та інших сполук. Після

поглибленішого вивчення виявлено, що гербіцидний ефект також можуть мати фітотоксини з нефітопатогенних грибів [76].

Патогенні гриби, які можна використовувати як біогербіциди, розподіляють на три групи: некротрофи/пертотрофи (живляться з мертвих клітин рослин); біотрофи (живлення та ріст залежать від живих клітин) і хемібіотрофи (організми, що мають початкову біотрофну фазу та які переходять у некротрофну фазу). Найраціональнішим є введення великої кількості грибного матеріалу в середовище, де гриби будуть використовувати бур'яни як субстрат для живлення, пригнічуючи їхній ріст і життєдіяльність [77].

На деревних формах, зокрема на рослинах тремтячої осики (*Populus tremuloides* Michx.) і тополі великозубчастої (*Populus grandidentata* Michx.), застосування гриба хондростереуму пурпурного (*Chondrostereum purpureum* (Pers.) Pouzar) підвищувало ступінь відмирання нових пагонів [78]. Для полегшення потрапляння біогербіцидів у рослинний організм в Австралії розроблено та комерціалізовано гербіцид «Di-Bak Parkinsonia™», який вироблявся у формі капсул для імплантації в стовбур дерева [79]. На рослинах якобеї звичайної (*Senecio jacobaea* L.) показано, що інфікування грибом може спричинювати такі симптоми, як загнивання кореневої системи та в подальшому нижньої частини стебла [80].

Питання про створення біогербіцидів з високою селективністю до культурних рослин дуже актуальне і досі залишається відкритим. Пошуку його рішення присвячено чимало досліджень. Так, у дослідах щодо впливу комплексу грибів на бур'яни *Ipomoea nil* (L.) Roth., *I. hederifolia* L. і *Merremia aegyptia* (L.) Urb. показано, що за істотного пригнічення росту та розвитку бур'янів він незначно впливав на культурні рослини, зокрема сою (*Glycine max* L.), евкаліпт (*Eucalyptus* sp.) та кукурудзу (*Zea mays* L.) [81].

В іншому дослідженні під час випробування штаму альтернарії *Alternaria gaisen* GD-011 на фітотоксичність на мальві кільчастій (*Malva verticillata* L.), ельшольції густоцвітковій (*Elsholtzia densa* Benth.) і вівсюгу звичайному (*Avena fatua* L.) рівень захворюваності для *M. verticillata* досягав 95 % [82]. Разом з тим, досліджений штам був безпечним для таких культурних рослин, як пшениця (*Triticum aestivum* L.), горох (*Pisum sativum* L.) і боби кормові (*Vicia faba* L.), хоча ріпак (*Brassica napus* L.) та ячмінь (*Hordeum vulgare* L.) відзначалися помірною чутливістю до нього.

В одному з модельних досліджень було продемонстровано 100 % ефективність гриба *Plectosporium tabacinum* через 7 діб після інокуляції рослин стрілиці трилистої (*Sagittaria trifolia* L.) у ростовій камері. Аналогічна чутливість проявлялася також і у рослин стрілиці карликової (*Sagittaria pygmaea* L.). Водночас такі агрокультури, як *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L. та *Oryza sativa* L., а також 34 інших видів бур'янів були стійкими до нього [83].

Ще одне дослідження було присвячене біологічному контролю берізки польової (*Convolvulus arvensis* L.), яка є одним із найшкідливіших бур'янів. Контроль цього бур'яну хімічними пестицидами не завжди можна забезпечити на високому рівні у зв'язку з його біологічними особливостями. З листків рослин *C. arvensis*, які прояв-

ляли симптоми грибних захворювань, виділили 68 штамів грибів, з них 7 ізолятів були підтверджені як патогенні [84]. В результаті оцінки їхньої гербіцидної активності було відібрано два найперспективніші ізоляти TV1 і ET4. Вони пригнічували накопичення сухої маси коренів більшості бур'янів до 80 %, не впливаючи одночасно на культурні рослини, зокрема нуту звичайного (*Cicer arietinum* L.), квасолі (*Phaseolus vulgaris* L.), сорго двокольорового (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), кукурудзи (*Zea mays* L.) і томата (*Solanum lycopersicum* L.).

Проведене у Бразилії дослідження [85], спрямоване на перевірку ефективності застосування суміші вторинних метаболітів гриба *Diaporthe* sp., продемонструвало його 100 % ефективність на бур'янах пажитниці рясноцвітої (*Lolium multiflorum*), *Conyza* sp. та *Echinochloa* sp. Також було визначено його фітотоксичність на рослинах сої, пшениці та рису (*Oryza sativa* L.). Фітотоксичні симптоми після обробки біогербіцидом спостерігалися на листках сої.

Вид *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., який вже згадувався раніше, є одним з найпоширеніших бур'яном в агроценозах. Виявлення біологічних агентів контролю його популяцій може вплинути на екологію. Gu et al. [86] досліджували штам *Colletotrichum echinochloae* B-48, патогенний для *E. crus-galli*. При зараженні популяції цього бур'яна рівень його захворюваності досягав 60—80 %, а накопичення сирої маси знижувалося до 80 %. Водночас штам протестували на 25 інших видах бур'янів, де він мав найвищу ефективність щодо бур'яну ситі круглої (*Cyperus rotundus* L.). Для визначення селективності штам був протестований на рослинах *Oryza sativa* L. У двох сортів рису виявлена реакція гіперчутливості до нього, що симптоматично проявилося через 4—5 діб після інокуляції у вигляді некротичних плям на поверхні рослин.

Використання мікогербіцидів на основі живих грибів може виявитися позитивним та безпечним для агрокультури. Зокрема, рослини вовчка єгипетського (*Phelipanche aegyptiaca* Pers.) були оброблені трьома штамами гриба фузаріуму (*Fusarium fujikuroi* (Sawada) Wollenw.) [87]. Один із штамів підвищував загибель бур'яну на 64 % через 9 діб після інокуляції, пошкоджуючи рослини томата лише на рівні 7 %. Oloyede et al. [88] оцінили ефективність та безпеку метаболітів із ідентифікованих штамів грибів родів *Aspergillus*, *Trichopyton*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Mucor*, *Alternaria*, *Poecilomyces*, *Rhizoctonia* та *Rhizopus*. Метаболіти фузаріуму гостроспорового (*Fusarium oxysporum,* штам RF2), альтернарії (*Alternaria alternata*, штам RF3) і *F. incarnatum-equiseti*, штам RF4 мали високу ефективність проти агератуму конізієвого (*Ageratum conyzoides* L.). Польова ефективність їх застосування була на рівні 86,5—100 %, хоча вони були безпечними для ґрунтової мікробіоти та культурних рослин. Gupta et al. [89] ідентифікували штам гриба трав'яної фоми (*Phoma herbarum* R21), який виявляв гербіцидну активність на бур'янах, а також чинив стимулювальний ефект на ріст рослин пшениці.

Особливий інтерес становлять порівняльні дослідження дії синтетичних гербіцидів і біогербіцидів для контролю бур'янів на ідентичних посівах. У роботі Boyette et al. [90] вивчали фітотоксичну дію гриба міротецію бородавчастого (*Myrothecium verrucaria* (Alb. &

Schwein.) Ditmar) як біогербіциду на конопляний сезабанієвий бур'ян (*Sesbania exaltata* (Raf.) Rydb. ex A.W. Hill.) на посівах *Oryza sativa*. При використанні міцелію *M. verrucaria* на рослинах *Sesbania exaltata* заввишки 10—20 см рівень їх загибелі досягав 100 % через 7 діб після внесення міцелію. Слід зазначити, що в польових умовах за використання інокуляту *M. verrucaria* рівень контролю бур'янів і врожайність рослин були близькими до ділянок, де застосовували синтетичний гербіцид ацифлуорфен.

Як показали дослідження Larson et al. [91], використання мікогербіцидів також може істотно спрощувати агротехнічні прийоми. Показано, що використання гриба *Puccinia punctiformis* досить ефективне для зменшення популяції бур'яну осоту польового (*Cirsium arvense* var. *integrifolium*). Автори припустили, що застосування цього гриба в якості біогербіциду матиме більшу ефективність за використання в садах та ягідниках, де міжряддя не піддаються механічному розпушенню. Подібне дослідження на *C. arvensis* L. проведено Vogelgsang et al. [92] в умовах контрольованого середовища. За внесення гриба *Phomopsis convolvulus* у вегетаційні посудини з пророщеним насінням досягалося зниження біомаси цього бур'яну на 87 %.

Дослідження Srisuksam et al. [93] продемонструвало ефективність штаму *Phoma multirostrata* TBRC 12769 проти мексиканської ромашки (*Tridax procumbens* L.). Упродовж 2—3 тижнів після обробки рівень захворюваності бур'яну знаходився у межах 60—100 %. Виявилося, що трихоми є ключовими мішенями патогенезу.

У Китаї Tang et al. [94] досліджували штам Tapu14C02, який вирізнявся високою активністю проти *E. crus-galli*. Встановлено, що він може пригнічувати до 100 % ріст коренів і до 60 % ріст пагонів за концентрації грибних патогенів у робочому розчині 1000 мкг/мл і 500 мкг/мл. Іншою спільною китайсько-італійською групою дослідників досліджено біологічний вплив штаму HXDC-1-2 *Bipolaris yamadae* на бур'ян *E. crus-galli* [95]. Виявлено, що використання конідій інгібувало накопичення сирої біомаси бур'яну на 75 %, а конідіальне проростання та ріст міцелію гриба у листках відбувалося вже через 1—6 год після обробки.

Буролистка однорічна (*Perilla frutescens* (L.) Britton) є інвазивним видом у Сполучених Штатах. Fulcher та Little [96] займалися вивченням гриба *Colletotrichum shisoi* як засобу біологічного контролю цього виду. Вони продемонстрували, що ефективність його використання залежить від розміру рослини під час інокуляції. У польових експериментах під час зараження бур'янів у молодому віці рослини не відновлювалися до закінчення вегетації. Також спостерігалося зменшення кількості квіток на оброблених рослинах, що потенційно знижувало рівень потрапляння насіннєвого матеріалу бур'янів у ґрунт. Інша група провела перспективне дослідження можливості використання біотехнологічних методів для покращення ефективності грибів для контролю бур'яну вовчка єгипетського (*Phelipanche aegyptiaca* Pers.) [97]. Виявлено, що штам *F. oxysporum* KGh2-1 у тепличних і польових експериментах продемонстрував найкращі показники інгібування проростання насіння *P. aegyptiaca* ($p < 0{,}001$). Згодом було проведено злиття протопластів видів *F. oxysporum* і *F. equiseti*. В результаті

отримано покращений варіант гриба, який мав велику ефективність проти *P. aegyptiaca*, а також більшу специфічність щодо рослини-хазяїна.

Рейнутрія японська (*Reynoutria (Fallopia) japonica* (Houtt.) Ronse Decr.) є високоінвазивним видом, який поширюється на території Великої Британії та Північної Америки [98]. Для його контролю використовували гриб *Mycosphaerella polygoni-cuspidati*, який походить також з Японії та спричинює плямистість листків бур'янів [99]. Було підтверджено можливість комплексного використання мікогербіциду на бур'янах із різних таксономічних груп. Виявилося, що обробка рослин міцеліальним інокулятом може викликати пошкодження не тільки цільового бур'яну, а також трьох інших видів бур'янів — гірчака перцевого (*Persicaria hydropiper* L.), гірчака морського (*Polygonum maritimum* L.) і гірчака приморського (*Polygonum glaucum* Nutt.).

Є приклади вдалого використання комплексних біогербіцидів, які складаються з декількох видів грибів. Зокрема, препарат «Di-Bak Parkinsonia™» використовувався для боротьби з паркінсонією колючою (*Parkinsonia aculeata* L.) в Австралії [79]. До його складу входять три види грибів: *Lasiodiplodia pseudotheobromae*, *Macrophomina phaseolina* і *Neoscytalidium novaehollandiae*. Внесення цього препарату стало причиною зниження інтенсивності поширення бур'яну паркінсонії колючої.

Через токсичність синтетичних гербіцидів для водних організмів контроль водних бур'янів є доволі проблематичним. Тому використання біогербіцидів може бути основою їх контролю без порушення умов екологічної безпеки. Інвазивний вид ейхорнія гіацинтова (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) (синонім *Pontederia crassipes*) є одним із найпоширеніших і шкідливих водних бур'янів у регіонах із теплим кліматом. У Таїланді було відібрано штам гриба *Paramyrothecium eichhorniae* TBRC10637, який відрізняється дуже високою вірулентністю, вже через 72 год після зараження на рослинах цього бур'яну були помітні пошкодження. Примітно, що при тестуванні на 55 видах інших рослин цей патоген не інфікував їх, що може свідчити про високу видоспецифічність і перспективність подальших досліджень та розробок нових біогербіцидів на його основі [100].

Наразі описано понад 500 фітотоксичних метаболітів грибів (мікотоксинів), однак гербіцидна активність притаманна лише невеликій частині з них [76]. Фітотоксини грибів бувають специфічними та неспецифічними щодо рослини-хазяїна. Неспецифічні (неселективні) фітотоксини грибів становлять переважну більшість з усіх відомих ідентифікованих мікотоксинів.

Фітотоксини, специфічні (селективні) до хазяїна, діють лише на рослини, які є хазяями токсиноутворювальних грибів та необхідні для їх патогенності. Відомо, що токсини, специфічні до хазяїна, синтезуються переважно фітопатогенними грибами родів *Alternaria*, *Colletotrichum* і *Helminthosporium* [101—104]. Неспецифічні до хазяїна фітотоксини мають ширший спектр дії, викликаючи симптоми не лише у хазяїв патогенних грибів, а й у інших видів рослин [105].

З розширенням галузі досліджень біогербіцидів було виявлено дедалі більше грибних фітотоксинів з високим гербіцидним потенціалом, одержаних з нефітопатогенних грибів, таких як ендофітні гриби рослин [106, 107], ендофітні гриби тварин [108, 109], ґрунтові гриби [110] та гриби морського походження [111, 112].

Прикладом неселективних мікотоксинів з гербіцидною активністю є ботріоізокумарин та неоізокумарин, виділені з *Neufusicoccum batangarum*, збудника парші кактусової груші (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). Ці метаболіти спричинювали некротичні ураження як навколо точок інокуляції у рослини-хазяїна *O. ficus-indica*, так і у культурної рослини — томата [113]. Ще одним прикладом неселективного мікотоксину з гербіцидною активністю є 3,4-дигідро-8-гідрокси-3,5-диметилізокумарин (5-метилмелеїн), який виявляв більшу фітотоксичність на рослинах мітлиці (*Agrostis stolonifera* L.) і меншу — на рослинах салату посівного (*Lactuca sativa* L.). До специфічних мікотоксинів належать хлормоніліновi кислоти B, C і D з рідкісних культур гриба *Cochliobolus australiensi*s, що є патогеном листків бур'яну африканского лисохвосту (*Pennisetum ciliare* (L.) Link.). Вони затримували проростання насіння та різко знижували ріст коренів цього виду [114]. У роботі Cimmino et al. [115] було показано, що деякі штами *Phoma exigua* var. *exigua* можуть синтезувати специфічний для жовтого осоту польового (*Sonchus arvensis* L.) мікотоксин деоксафомін.

Дибензо-γ-пірони, зокрема стеригматоцистин і, меншою мірою, дигідростеригматоцистин проявляли гербіцидну активність на бур'янах родини амарантових, спричинюючи некроз та в'янення листків. Дигідростеригматоцистин був фітотоксичнішим щодо рослин щириці загнутої (*Amaranthus retroflexus* L.), аніж стеригматоцистин [116]. Водночас, дигідростеригматоцистин також виявляв високу гербіцидну активність щодо інших рослин цієї родини, зокрема альтернатери філоксероїдної (*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.), щириці колючої (*Amranthus spinosus* L.) і целозії сріблястої (*Celosia argentea*). Проаналізовано взаємозв'язок між структурою та гербіцидною активністю даних сполук. Було показано, що біфуранове кільце відіграє важливу роль у фітотоксичності дибензо-γ-пірону (ксантону), а наявність подвійного зв'язку в ньому може знижувати фітотоксичність цих сполук. Аскосонхін — енольний таутомер 4-піровиноградної кислоти, мікотоксин, який синтезується грибом *Ascohyta sonchi*, патогеном листків жовтого осоту польового (*Sonchus arvensis* L.) виявляв вибіркову фітотоксичність по відношенню до цього бур'яну [117].

Брасициколін — ще один приклад специфічного мікотоксину. Він є сумішшю діастереомерів, що епімеризуються, розташованих поруч з ізоціаногрупою. Цей фітотоксин викликав хлороз і некроз листків гірчиці сарептської (*Brassica juncea* (L.) Czern., сорт Cutlass, чутливий) у концентрації 0,5 мМ, але не чинив значного впливу на листки гірчиці білої (*Sinapis alba* L., сорт Ochre, стійкий) [118].

Перспективність інтенсивнішого впровадження мікотоксинів в аграрний сектор, а також нові біотехнологічні розробки, присвячені пошуку комплексних біогербіцидних препаратів на основі компо-

зицій біогербіцидів з ширшим спектром дії, допоможуть удосконалити технології екологічного землеробства.

Рослинні алелопатично активні сполуки як джерело біогербіцидів. Алелопатія — це поширена властивість рослин, бактерій, грибів виділяти в навколишнє середовище біологічно активні речовини, здатні пригнічувати ріст, розвиток і розмноження інших організмів. Алелопатичний вплив відбувається за рахунок накопичення алелопатичних речовин у навколишньому середовищі. Явище алелопатії належить до хімічного механізму саморегуляції фітоценозу і відіграє одну з ключових ролей у формуванні його видового складу та динамічних сукцесійних змін [119]. Алелопатія рослин є одним із способів взаємодії між рецепторними та донорськими рослинами і може мати як позитивні, так і негативні ефекти.

Зважаючи на поширеність алелопатії в природі та її ефективність, використання алелопатичних властивостей окремих рослин для боротьби з бур'янами може стати підґрунтям для розробки нових біогербіцидів на базі рослинної сировини. Біологічно активні речовини різної природи, що виділяються з алелопатичних рослин технологічними шляхами або внаслідок їх природного виділення в середовище існування бур'янів, часто є основою розробки нових та удосконалення існуючих технологій захисту агрокультур від їхнього впливу [120]. Алелохімікати можуть бути гарною заміною хімічним гербіцидам, оскільки не мають залишкових токсичних ефектів, проте не слід забувати, що ефективність і специфічність багатьох алелопатичних речовин істотно обмежена [121].

Алелопатія може бути використана для боротьби з бур'янами за допомогою технологічного поєднання агрокультур і сівозмін, використання покривних культур, алелопатичних водних екстрактів та мульчування. Накопичені дані вказують на те, що деякі види рослин синтезують сильні алелохімікати, які мають потенціал як сировини для створення екологічно чистих природних гербіцидів [120].

Сівозміни мають одну з головних переваг, яка складається із фактичного пригнічення бур'янів, збудників хвороб та комах-шкідників [122]. У сівозміні алелопатичні культури виділяють алелохімікати через корені або за допомогою розкладання рослинних залишків для пригнічення бур'янів та інших шкідників. Важливими чинниками також є наявність унікальних кореневих систем, час посіву та збору врожаю, різні методи агротехніки для управління врожаєм, які можуть відповідати за пригнічення росту бур'янів [123]. Різні дати посіву та збору врожаю серед культур, що чергуються, в умовах холодного і теплого сезонів можуть запобігти майбутній появі нових бур'янів у посівах або ж формуванню їх насіння у подальшому.

Поєднання культур є однією з практик вирощування різних видів одночасно на одному полі, причому нерідко у вигляді одного з успішних способів їх захисту від бур'янів. Поєднання агрокультур з алелопатичними видами є вдалим екологічно безпечним підходом у боротьбі з бур'янами. Такі чинники, як конкуренція між бур'янами та культурами, вивільнення алелохімічних речовин проміжними культурами можуть бути використані для боротьби з бур'янами [124].

Так, в одному з досліджень показано, що поєднання коров'ячого гороху (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) з кукурудзою викликало зменшення росту портулаку (*Portulaca oleracea* L.), джутової мальви (*Chorchorus olitorius* L.) і єгипетської воронячої лапи (*Dactyloctenium aegyptium* (L.) Willd.) [125]. У ще одному дослідженні з поєднання культур було виявлено, що вирощування пшениці з білою конюшиною (*Trifolium repens* L.) на фоні високого рівня доступного азоту призвело до зниження вмісту сухої біомаси пагонів бур'янів і її збільшення у покривної культури, а також до поліпшення рівня накопичення азоту за підвищення врожайності пшениці одночасно з високим вмістом білка у зерні [126].

Інтеграція алелопатичних культур, як таких, що можуть швидко рости зі щільним пологом, забезпечує додатковий контроль над бур'янами. Наприклад, такі культури, як суданська трава (*Sorghum sudanense* L.), гречка звичайна (*Fagopyrum esculentum* Moench), жито (*Secale cereale* L.), ячмінь (*Hordeum vulgare* L.), соняшник (*Helianthus annuus* L.), вігна (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) можуть ефективно пригнічувати різноманітні види бур'янів [127].

Мульчування також є досить ефективним засобом для пригнічення росту та розвитку бур'янів, оскільки багато рослинних залишків мають алелопатичну активність. Мульчування створює багатофункціональний бар'єр для бур'янів завдяки сильному зниженню інсоляції, створенню фізичного бар'єру для проростання і навіть зменшенню вологозабезпечення бур'янів. Алелопатичну активність мали пожнивні рештки пшениці, рису, сорго, люцерни, соняшника та кукурудзи [120]. Поєднання більш ніж однієї алелопатичної мульчі також продемонструвало свою ефективність у боротьбі з бур'янами. Зокрема доведено, що пожнивні рештки капусти, соняшника та сорго здатні контролювати ріст портулаку (*Trianthema portulacastrum*) набагато краще, ніж застосування цих пожнивних рештків окремо [128].

Водні рослинні екстракти з різних частин алелопатичних видів, таких як листки, стебла, корені та насіння, також часто мають великий алелопатичний потенціал у боротьбі з бур'янами. Відомо багато видів рослин, водні екстракти яких мають доведену алелопатичну активність. Вони є вторинними метаболітами рослин, і вода діє як носій та середовище для їхньої алелопатичної активності [122]. Так, екстракт сорго містить гідрофільні сполуки, фенольні кислоти та їх альдегідні похідні, а також гідрофобні речовини, наприклад, сорголеон [129]. Доведено наявність фітотоксичності екстрактів цього виду для декількох видів бур'янів, таких як щавель зубчастий (*Rumex dentatus* L.), очеретянка мала (*Phalaris minor* Retz.), горобинник горобинолистий (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A.Braun), і берізка багатостебельчаста (*Convolvulus arvensis* L.). Різні частини рослини айланту найвищого (*Ailanthus altissima* (Mill.)) містять комплекси алелопатично активних алкалоїдів, терпеноїдів, флавоноїдів і фенольних похідних [130].

Водний екстракт зі свіжих листків райського дерева продемонстрував здатність пригнічувати проростання та подальший ріст рослин люцерни [131]. Водний екстракт з листків евкаліпта пригнічував проростання насіння та інгібував ріст коренів і пагонів, а також на-

копичення біомаси у рослин кукурудзи. У дослідженні [132] було показано, що хоча водний екстракт однієї рослини може бути ефективним, іноді об'єднання алелопатичних водних рослинних екстрактів може підвищити їхню сумарну ефективність. Зокрема, застосування суміші водних екстрактів з евкаліпта, сорго та соняшника привело до 70 % знищення бур'янів порівняно із застосуванням лише водного екстракту сорго. А одночасне застосування водного екстракту сорго та соняшника знизило ріст тріантеми портулакоподібної (*Trianthema portulacastrum* L.) на 66 %.

Окремі дослідження також продемонстрували, що поєднання алелопатичного водного екстракту із синтетичним гербіцидом може істотно знизити оптимальну дозу його внесення. Так, суміш водних екстрактів з рису, сорго та соняшника з 0,5 норми внесення досходових синтетичних гербіцидів знизила ріст бур'янів на 60—70 %, а також оптимальну дозу внесення гербіциду на 20—67 % [133]. Для боротьби з бур'янами на бавовнику та кукурудзі внесення атразину у кількості 0,5 норми в поєднанні з водним екстрактом сорго пригнічувало бур'яни так само, як і повна доза атразину. Iqbal та Cheema [134] повідомили, що досходове застосування водного екстракту сорго у поєднанні з 0,5 та 0,33 дози S-метолахлору було успішнішим у боротьбі з ситтю круглою (*Cyperus rotundus* L.), ніж стандартна доза.

У роботі українських вчених було показано, що окремі деревні види, зокрема горіх чорний (*Juglans nigra* L.), мають сильні алелопатичні властивості [135]. Було виявлено, що водні витяжки з листків горіха чорного можуть мати не тільки біогербіцидні, а й фунгіцидні властивості, що посилює потенційний інтерес до повномасштабних досліджень алелопатичного потенціалу цього виду в умовах України.

Таким чином, використання рослинного алелохімічного водного екстракту окремо або ж у поєднанні з іншими гербіцидами може бути новим корисним заходом для боротьби з бур'янами у сільському господарстві. Водночас цей підхід потенційно має екологічні вигоди, оскільки зведе до мінімуму використання синтетичних гербіцидів, а також істотно зменшить проблеми резистентності до них у майбутньому.

Біогербіциди індукують сильний стрес у рослин та їх поступову загибель. Експерименти та пошуки у цій галузі виявили кілька джерел рослинного походження, потенційно придатних для біогербіцидних розробок [136—138]. Ці джерела включають алелопатичні хімікати з канавалії мечоподібної (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.) (50 г L—1) [139], бодяка щетинистого (*Cirsium setosum* (Willd.) Bess.), артишоку іспанського (*Cynara cardunculus*), чорного горіха (*Juglans nigra* L.), лантани склепінчастої (*Lantana camara*), базиліка запашного (*Ocimum basilicum* L.) та сорго двоколірного (*Sorghum bicolor* L. Moench) [140]. Хоча всі ці алелопатично активні культури були успішними у боротьбі з різними видами бур'янів, важливо зазначити, що необхідні глибші дослідження їх довгострокового та багаторазового використання в агроценозах. Зокрема, дослідження алелохімікатів мають зважати на їхню фітотоксичну активність, вплив на навколишні види, хімічну структуру, спосіб дії та можливість швидко комерціалізуватися.

У роботі японських вчених [141] був описаний алелопатичний потенціал рослини елеокарпусу пишноцвітого (*Elaeocarpus floribundus* Bl.) з уже відомими фармацевтичними властивостями та ідентифіковані окремі алелопатичні сполуки із цього виду. Водні екстракти *Elaeocarpus floribundus* пригнічували ріст плоскухи звичайної (*Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv.) і крес-салату (*Lepidium sativum* L.) в різних дозах. За допомогою хроматографічних методів виділені речовини з найбільшою алелопатичною активністю: (3Р)-3-гідрокси-β-іонон, цис-3-гідрокси-α-іонон і лоліолід. Перший мав найбільші алелопатичні ефекти на видах, які тестувалися. Цими ж дослідниками виявлена алелопатична активність екстрактів з альбіції процери (*Albizia procera* (Roxb.) Benth.), рослини, що широко застосовується як паливна і кормова сировина [142]. Екстракти з рослин цього виду пригнічували ріст проростків капусти (*Brassica oleracea* var. *capitata*), люцерни (*Medicago sativa* L.) і салату (*Lactuca sativa* L.)), а також трьох видів однодольних рослин — плоскухи звичайної (*Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv.), тимофіївки лучної (*Phleum pratense* L.) і пажитниці багатоквіткової (*Lolium multiflorum* Lam.). Їхній ріст сповільнювався зі збільшенням концентрації екстракту *A. procera*, який застосовувався для обробки рослин.

В роботі Lopes et al. [143] проведено скринінг гербіцидної активності видів горіха гургеї (*Dipteryx lacunifera* Ducke*)*, рицини (*Ricinus communis* L.), *Piper tuberculatum Jacq*. та ятрофи госсіпіфолії (*Jatropha gossypiifolia* L.) щодо бур'яну череди двоперистої (*Bidens bipinnata* L.). *R. communis* виявляла найбільшу алелопатичну активність порівняно з іншими досліджуваними видами. Вона спричинювала істотне зменшення довжини пагонів рослин *B. bipinnata* L., а також зниження вмісту хлорофілу в листках та їхній хлороз.

В одній із праць [144] досліджували вплив алелопатичного потенціалу борошна з насіння різних видів алелопатично активних рослин, а саме *Fagopyrum esculentum*, люпину жовтого (*Lupinus luteus* L.), сарадели посівної (*Ornithopus sativus* L.)*,* фацелії пижмолистної (*Phacelia tanacetifolia* L.), олійної редьки (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis*) і гірчиці білої (*Sinapis alba* L.) на гербіцидочутливих та гербіцидостійких генотипах дикого вівса (*Avena fatua* L.). Сполуки з цих рослин спричинювали більше пригнічення росту рослин чутливого генотипу дикого вівса, ніж синтетичний гербіцид пропоксикарбазон натрію.

У роботі малайзійських вчених [145] були вивчені фізіологічні та біохімічні ефекти WeedLock — біогербіциду з уже зареєстрованою формулою на рослинах агератуму конізовидного (*Ageratum conyzoides* L.), елевсини індійської (*Eleusine indica* (L.) Gaertn.), кукурудзи (*Zea mays* L.) та амаранту триколірного (*Amaranthus gangeticus* L.) у чотирьох різних часових проміжках. WeedLock значно знижував вміст хлорофілу і порушував фотосинтетичні процеси у всіх протестованих видів рослин. У них було виявлено підвищену продукцію малонового діальдегіду (МДА) та проліну, що є показником фітотоксичного стресу. Було підтверджено, що WeedLock порушує нормальні фізіолого-біохімічні процеси в рослинах і що його механізм дії

пов'язаний з продукцією активних форм кисню, хоча конкретний сайт дії цього нового біогербіциду не був визначений.

Підсумовуючи наведені результати досліджень можна констатувати, що розвиток технологій отримання алелопатичних сполук для розробки нових біогербіцидів та їх композицій з рослинної сировини або ж поліпшення існуючих чи створення нових систем сівозмін, мульчування, поєднання культур для отримання перспективних біогербіцидних ефектів та їх впровадження у рослинництво необхідні для підвищення продуктивності агроценозів.

Ефірні олії як джерело гербіцидної активності. Ефірні олії — це гідрофобні рідини, які часто містять у своєму складі монотерпеноїди, сесквітерпеноїди, фенілпропаноїди та інші сполуки. Їх особливо багато в ароматичних рослинах [146]. Ефірні олії, екстраговані з рослин, також демонстрували свою ефективність при використанні як біогербіцидів для боротьби з окремими бур'янами. Ефірні олії можна екстрагувати з кори, квітів, плодів, листків, коренів або ж з усієї рослини. Вони можуть спричинювати серйозні пошкодження ДНК, порушення біохімічних процесів і клітинних функцій цілої рослини, що може призводити до її поступової загибелі. Потенціал використання цих речовин як біогербіцидів зумовлений їхньою потенційною алелопатичною активністю. Остання відіграє важливу роль в екосистемах та екологічних сукцесіях [147].

Нещодавно на ринку з'явилося декілька біогербіцидів де як основний інгредієнт використані ефірні олії. До таких продуктів належать Avenger Weed Killer® (70 % D-лимонену), GreenMatch® (55 % D-лимонену), GreenMatchEX® (50 % олії лемонграсу), Weed Slayer® (6 % евгенол), WeedZap® (45 % гвоздичної олії та 45 % коричної олії) [148]. Добре відомі своєю алелопатичною дією ефірні олії з рослин родини *Lamiaceae*, що містять високі концентрації летких сполук, які чинять алелопатичний ефект [149, 150].

Результати праці [151] свідчать про високу активність ефірних олій *Origanum vulgare* subsp. Подібне дослідження щодо використання ефірних олій для зниження проростання насіння було проведено Ramezani et al. [152]. Автори використовували ефірні олії евкаліпту (*Eucalyptus nicholii* Maiden & Blakely), розмарину (*Rosmarinus officinalis* L.), кипарисовику Лавсона (*Chamaecyparis lowsoniana* (A. Murray) Parl.) та туї західної (*Thuja occidentalis*). Отримані результати свідчать про сильне пригнічення проростання насіння бур'янів. Особливо ефективною для пригнічення росту бур'янів виявилася евкаліптова олія, застосована у концентрації 300 ppm.

В одному з масштабних досліджень було виділено та оцінено алелопатичні властивості ефірних олій 32 видів ароматичних рослин. В результаті для подальших експериментів авторами відібрані ефірні олії найперспективніших видів — *Origanum syriacum* L., *Micromeria fruticosa* L. *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. Вони показали хорошу ефективність пригнічення проростання насіння низки видів, зокрема і амаранта, хоча також пригнічували і проростання рослин пшениці. Водночас перспективною перевагою були порівняно невеликі норми їх внесення (20—80 ppm) [153].

Групою Elghobashy et al. [154] був досліджений алелопатичний потенціал водних екстрактів й ефірних олій *Rosmarinus officinalis* L. та *Thymus vulgaris* L. на бур'янах лободі білій (*Chenopodium album* L.) та *Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv. Виявлено, що застосування ефірних олій мало більший інгібувальний вплив на проростання, ніж водні екстракти, причому для олії з *T. vulgaris* він був вираженішим.

За використання олії м'яти довголистої (*Mentha longifolia* (L.) Huds.) як біогербіциду на бур'янах *C. rotundus* і *E. crus-galli* виявилося, що найвираженіший ефект спостерігали для рослин *C. rotundus* [155]. При післясходовому використанні токсична дія ефірної олії м'яти проявлялася у зменшенні накопичення хлорофілу та швидкості росту рослин. Для визначення цитотоксичного ефекту ефірної олії використовували меристему коренів *Allium cepa* L. Вплив ефірної олії на корені проявлявся в різних хромосомних аберраціях. За використання найбільшої норми внесення (50 мкг/мл) олія спровокувала повну загибель коренів.

Mahdavikia та Saharkhiz [156] при дослідженні впливу олії м'яти перцевої (*Mentha piperita* L.) виявили пригнічення проростання насіння та росту рослин берізки польової (*Convolvulus arvensis* L.), портулаку городнього (*Portulaca oleracea* L.) і плоскухи селянської (*Echinochloa colona* (L.) Link), хоча олія *M. piperita* також пригнічувала ріст культурних рослин томатів і редьки. Значну токсичну дію на рослини *Portulaca oleracea* спричинила олія з шавлії мускатної (*Salvia sclarea* L.), найвища її концентрація пригнічувала проростання насіння бур'янів на 50 %. Водночас ця олія інгібувала проростання насіння *Lactuca sativa* L. і *Lepidium sativum* L. на 94 і 100 % відповідно [157].

Чебрець (*Thymbra capitata* L.) має у своєму складі карваклол, який проявляє гербіцидну активність щодо деяких видів бур'янів, зокрема злинки канадської (*Erigeron canadensis* L.), жовтого осоту городнього (*Sonchus oleraceus (*L.*))* L., *Chenopodium album* L., *Setaria verticillata* (L.) P. Beau., *Amaranthus retroflexus* L., *Portulaca oleracea* L. та *E. crus-galli* (L.) P.Beauv. За використання цієї ефірної олії в різних концентраціях відбувалося блокування росту *E. canadensis*, *S. oleraceus* та *C. album* — за 0,125 мкл/мл, *S. verticillata*, *A. fatua* та *S. nigrum* — 1 мкл/мл і *P. oleracea* та *E. crus-galli* — за 2 мкл/мл. Слід зазначити, що застосування олії навіть у найменшій дозі (0,125 мкл/мл) істотно знижувало (на 47,1 %) енергію проростання насіння *P. oleracea* [158].

Kaab et al. [159] при дослідженні впливу ефірної олії кориці на рослини *Arabidopsis thaliana* виявили, що використання 6 % розчину олії призводить до швидкого знебарвлення надземної частини рослин. Перші симптоми виникали вже через годину після обробки рослин, а в наступні 48 год листки і стебла рослин набували глибоких хлорозних змін і в'янули.

При попередньому тестуванні ефірної олії *Cinnamomum cassia* на дводольному (конюшина багряна — *Trifolium incarnatum* L.) та однодольному (пажитниця багаторічна — *Lolium perenne* L.) видах було виявлено сильну фітотоксичну дію проти обох видів. Розчини концентрацією 3 та 6 % зменшували вміст води в рослинах приблизно на 56 і

63 % для *T. incarnatum* та на 24 і 36 % для *L. perenne,* відповідно, порівняно з контролем. Обробка рослин ефірною олією продемонструвала високий рівень витоку електролітів в обох видів рослин — до 76 % для *T. incarnatum* та *L. perenne*. Ці факти підтверджують наявність великих перспектив для використання ефірної олії *C. cassia* як біогербіциду [160].

Miloudi et al. [161] вивчали ефективність застосування комплексів різних ефірних олій як гербіцидів. Для оцінки впливу на проростання рослин та їхній ріст вони використовували комплекси олій з *Satureja alpina* (L.)*, Thymus satureioides* Coss. і *Myrtus communis* (L.). Виявлено, що найефективнішою комбінацією була суміш олій *M. communis* (22 %), *S. alpina* (23 %) та *T. satureioides* (55 %) на бур'яні *Amaranthus retroflexus.* Використання суміші призвело до зменшення довжини пагонів і коренів, вмісту хлорофілів. Також істотно збільшився рівень витоку електролітів та окиснювального стресу, що призводило до загибелі рослин.

Dutra et al. [162] досліджували вплив олій *Sparattanthelium botocudorum* та *S. tupiniquinorum* на види *Lactuca sativa* і *Sorghum bicolor.* Екзогенна обробка ефірною олією із *S. botocudorum* знизила індекс проростання рослин *L. sativa* за використанні його високої концентрації (3000 ppm). Ефірні олії, екстраговані з обох видів, виявляли цитотоксичність на меристематичних клітинах *L. sativa*, зміни в ядрі були вираженішими при використанні олії *S. tupiniquinorum.*

Wei et al. [163] показали, що ефірна олія татарнику звичайного (*Onopordum acanthium* L.) спричинювала інгібувальний ефект на рівні розвитку коренів *A. retroflexus*, причому найбільший вплив на цей вид мала олія, екстрагована з квіток. За норми обробки 2,5 мг/мл рівень гальмування росту коренів досягав 75 %, а зі збільшенням норми внесення олії до 5 мг/мл — майже 100 %.

Інша група вчених досліджувала вплив ефірних олій деревію звичайного (*Achillea millefolium* L.), лепехи звичайної (*Acorus calamus* L.), кмину звичайного (*Carum carvi* L.), ромашки звичайної (*Chamomilla recutita* L.), фенхелю звичайного (*Foeniculum vulgare* Mill.), лаванди вузьколистої (*Lavandula angustinalia* Mill.), меліси лікарської (*Melissa officinalis* L.), золотушника канадського (*Solidago canadensis* L.), пижма звичайного (*Tanacetum vulgare* L.) і чебрецю садового (*Thymus vulgaris* L.) на схожість щириці загнутої (*Amaranthus retroflexus* L.), вівсюга звичайного (*Avena fatua* L.)*,* стоколоса житнього *(Bromus secalinus* L.) і волошки синьої (*Centaurea cyanus* L.) [164]. Виявилося, що найбільшу фітотоксичність мали олії *C. carvi*, *T. vulgare*, а найменшу — *S. canadensis.* Також найчутливішими до впливу цих олій були дрібнонасінні види: *A. retroflexus* і *C. cyanus*, тоді як *A. fatua* і культурна *Z. mays* були толерантнішими до дії ефірних олій.

Ribeiro et al. [165] під час тестування олій із 7 видів роду *Copaifera* виявили, що вони значно пригнічують або повністю інгібують проростання бур'яну однодольного *Agrostis stolonifera*, але не впливають на дводольні.

Baranova et al. [166] проаналізували хімічний склад та гербіцидні властивості ефірної олії полину білоповитого (*Artemisia herba-alba* Asso) проти двох видів бур'янів — пажитниці рясноцвітої (*Lolium mul-*

tiflorum Lam.) і конюшини лучної (*Trifolium pratense* L.), а також двох видів культурних рослин (*B. napus* і *H. vulgare*). Основними біологічно активними компонентами ефірної олії були камфора, α- та β-туйон, 1,8-цинеол, піперитенон та камфен. За використання високої концентрації олії (500 та 1000 мкг/мл) проростання видів культурних рослин було повністю пригнічене. Ріст *T. pratense* повністю пригнічувався за концентрації 1000 мкг/мл і на 48 % — за концентрації 500 мкг/мл. Для бур'яну *L. multiflorum* рівень пригнічення росту був меншим і становив 76 і 59 % за концентрацій 1000 і 500 мкг/мл, відповідно.

Abd-ElGawad et al. [167] провели подібний до наведеного експеримент, але вже на основі рослинної олії пергулярії (*Pergularia tomentosa* L.). Автори ідентифікували в ній 58 компонентів, основними її складовими були лонгібарнеол ацетат, транскрисантеніл ацетат, α-еудесмол ботридіол і торейол. Використання високої концентрації (40 мг/л) олії знизило рівень проростання насіння *Bidens pilosa* L., *Dactyloctenium aegyptium* (L.) Willd. і *T. aestivum* на 93,1, 68,5 та 44,6 %, відповідно. Найменша концентрація (10 мг/л) зменшила ріст бур'янів *B. pilosa* та *D. aegyptium* на 25 та 31 % і на 8 % для *T. aestivum*. При використанні найменшої концентрації ріст рослин пригнічувався на 25, 15 і 10 % для *D. aegyptium*, *B. pilosa* та *T. aestivum*. За найбільшої концентрації він був пригнічений на 72, 60 і 47 % для *D. aegyptium*, *B. pilosa* та *T. aestivum* відповідно.

Разом з тим, за використання ефірних олій як гербіцидів потрібно зважати на те, що їхня ефективність залежить від хімічного складу, на який впливає генетика окремих популяцій, а також якість відібраних зразків та умови вирощування рослин [168]. На нашу думку, з огляду на викладений матеріал, використання ефірних олій як біогербіцидів може мати великий потенціал. Однак слід враховувати, що виробництво ефірних олій рослинного походження потребує великої кількості рослинної сировини, що в рази збільшує вартість виробництва таких гербіцидів. Водночас потрібно пам'ятати й про площі ріллі, які необхідно виділяти для виробництва ефіроолійних культур, що, на жаль, зменшить кількість доступної ріллі для вирощування інших важливих культур. Хоча під деякі види ефіроолійних культур можна відвести непридатні для вирощування більшості сільськогосподарських культур землі.

Розробка нових біогербіцидів за допомогою біотехнологій та використання штучного інтелекту. Переваги у вигляді меншого терміну розробки біогербіцидів поряд з їх екологічністю та біобезпекою нівелюються низкою специфічних складнощів, пов'язаних, насамперед, з меншою стабільністю біологічних об'єктів та виділених з них метаболітів порівняно із синтетичними гербіцидами.

За визначенням Gressel [169], існують чотири головні умови успішної комерційної розробки мікогербіцидів, які можуть бути застосовані і для біогербіцидів інших типів: 1) підвищена вірулентність; 2) економічна ефективність; 3) оптимальний термін придатності для поширення продукту; 4) біобезпека без токсичного впливу за межами цільового шкідника.

Однією з ключових проблем розробки біогербіцидів є те, що часто метаболіти з гербіцидною активністю, отримані з ендемічних організмів дикого типу, недостатньо вірулентні, щоб впливати на рослину-хазяїна як ефективні біогербіциди. Також метаболіти, які синтезуються ними, тобто токсини, специфічні для хазяїна, часто не синтезуються в достатній концентрації або ж не можуть бути екстраговані у вигляді ефективного біологічного агента проти бур'яну. Вирішенню цієї проблеми опосередковано сприяють генетичні методи для створення, зокрема високопродуктивних штамів [30, 170].

Тому відкриття ефективних біогербіцидів з новими механізмами дії є на сьогоднішній день досить непростим завданням, і для спрощення процесу їхнього пошуку задіяні як міждисциплінарні підходи, так і найсучасніші комп'ютерні технології, в тому числі штучний інтелект (ШІ). Компанія «Moa Technology», наприклад, використовує методи скринінгу для виявлення біогербіцидної активності на принципах природного відбору рослин на ранніх фазах їх вегетації за допомогою фенотипування. У компанії «Oerth Bio» використовують переробку рослинних білків, які діють як інструмент захисту рослин. Американська компанія «Eko» демонструє широкий міждисциплінарний підхід на базі комбінаторної хімії, ШІ, машинного навчання у галузі розробки гербіцидів [171].

Великого успіху досягла компанія «Moa Technology», яка використовувала платформу «Galaxy». З її допомогою було перевірено близько мільйона натуральних і синтетичних сполук, а також виявлено понад 60 умовних хімічних областей, які, імовірно взаємодіють з новими сайтами дії в культурах in vitro. Їхня ефективність була визначена фактично за 100 фітометричними, біохімічними, фізіологічними та токсикологічними показниками [172]. Запатентований цією компанією процес цифрової сегментації та категоризації для кожної рослини забезпечує класифікацію кожної молекули за відомими moaNOVEL категоріями, по суті відкриваючи шлях до з'ясування механізмів їхньої дії.

Важливо зазначити, що запущений на ранній стадії процес розробки біогербіцидів нового покоління потенційно здатний дати результати вже через місяці, а не через роки, фактично у багато разів прискорюючи прогнозування безпеки та оптимізацію виробництва гербіцидів, потенційно готових до застосування в аграрному секторі [30].

Ще одним вдалим прикладом нових розробок біогербіцидів є біотехнологічна платформа «ATTUNE™», орієнтована на технології цілеспрямованої деградації білків. «PROTAC» — це розробка химерних білків, спрямованих на протеоліз [173]. Вони є біораціонально розробленими модульними сполуками, які індукують деградацію клітинних білків. Це трикомпонентні сполуки, що складаються з ліганду, що зв'язується з необхідним білком-мішенню (POI), ліганду, що зв'язується з ферментом убіквітинлігазою E3, і лінкеру, який ковалентно зв'язує ці два ліганди.

Основою «ATTUNE™» є лігандна лінія, розроблена «Oerth Bio», яка займається пошуком E3-лігаз та ідентифікацією лігандів. Оскільки E3-лігази необхідні для активності «PROTAC», «Oerth Bio»

спеціалізується на ідентифікації Е3-лігаз, специфічних для рослини, для використання в додатках, призначених для захисту рослин. Після того, як необхідна Е3-лігаза знайдена, для її підготовки до роботи з «PROTAC» вирішальне значення мають два ключові етапи: 1) підтвердження її деградаційної здатності за допомогою одного або декількох POI через спеціальний біологічний аналіз та 2) ідентифікація низькомолекулярного ліганду для зв'язування й активації цієї Е3-лігази. Далі йде співставлення лігази із сумісним білкомішенню. По суті, кожен з компонентів «PROTAC» може бути індивідуально підібраний/адаптований для досягнення унікальних властивостей комплексу, відкриваючи шлях до створення вибірнішого і безпечнішого гербіциду [173].

Натепер найяскравішим прикладом використання комплексного міждисциплінарного підходу з використанням ШІ у сфері гербіцидів та біогербіцидних розробок є технології компанії «Agrematch». Використання нею ШІ є частиною безперервного процесу скринінгу нових препаратів-кандидатів. ШІ став, по суті, основою об'єднання класичних методів скринінгу, а також існуючих баз даних щодо розробок та випробувань гербіцидів. Компанія створила власну платформу пошуку сполук на основі глибокого машинного навчання AI4AI™ (штучний інтелект для активних інгредієнтів) [174].

AI4AI™ є чудовим прикладом генеративного ШІ, що забезпечує ефективний підхід до розкриття функціональної хімії, раціонально спроектований для задоволення потреб усіх етапів процесу розробки препарату, починаючи з початкового скринінгу in silico. Унікальне системне об'єднання прискореної ідентифікації, оцінки та відбору активних інгредієнтів на ранніх стадіях розробки забезпечує прогностичне глибоке розуміння характеристик сполук. Це фактично дає змогу розробнику ухвалювати раціональні рішення ще на ранніх етапах, ефективно зменшуючи можливість виникнення подальших фінансових і тимчасових ризиків, пов'язаних із розробкою та реєстрацією майбутнього препарату [174].

Компанія «Agrematch» використовує дві власні платформи для визначення гербіцидів: платформу біогербіцидів, розроблену для створення високоефективного та послідовного підходу до ідентифікації гербіцидів природного походження, та платформу безпечних синтетичних гербіцидів, орієнтовану на виявлення гербіцидів з новими молекулярними активними групами (MOA) з оптимізованою безпекою для агрокультур, людини й навколишнього середовища.

На закінчення слід окреслити декілька ключових проблем розробки нових біогербіцидів та їх залучення в агропромисловий комплекс. Доволі відчутною проблемою є досягнення бажаного титру активних речовин, отриманих у процесі ферментації в системах біотехнологічного виробництва. Її вирішенню часто опосередковано сприяють генетичні методи, наприклад, експериментального мутагенезу, зокрема для створення високопродуктивних штамів. Подолання технічних складнощів під час розробки біогербіциду потребує великих ресурсів, а також залучення міждисциплінарного підходу.

Слід наголосити, що незважаючи на ріст зацікавленості щодо біогербіцидів на сьогоднішній день кількість комерційних препаратів

є недостатньою для забезпечення будь-якого рівня їхньої конкуренції із синтетичними гербіцидами. Проте удосконалення існуючих і розробка нових біотехнологій виробництва біогербіцидів, а також методів скринінгу рослинних, бактеріальних та грибних видів з потенційною біологічною активністю проти бур'янів на основі інформаційних технологій може сприяти істотному вдосконаленню біогербіцидних розробок. Водночас сучасні тенденції впровадження безпечних методів захисту рослин на рівні держрегулювання, а також суспільного попиту можуть сприяти як поширенню, так і глибшому впровадженню біогербіцидних технологій у агропромисловий комплекс у найближчому майбутньому.

REFERENCES

1. Chauhan, B.S. (2020). Grand challenges in weed management. Front. Agron., 1, 3. https://doi.org/10.3389/fagro.2019.00003
2. Llewellyn, R., Ronning, D., Clarke, M., Mayfield, A., Walker, S. & Ouzman, J. (2016). Impact of weeds in Australian grain production. Grains Research and Development Corporation, Canberra, ACT, Australia.
3. Gharde, Y., Singh, P.K., Dubey, R.P. & Gupta, P.K. (2018). Assessment of yield and economic losses in agriculture due to weeds in India. Crop Prot., 107, pp. 12-18. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.01.007
4. Qu, R.Y., He, B., Yang, J.F., Lin, H.Y., Yang, W.C., Wu, Q.Y., Li, Q.X. & Yang, G.F. (2021). Where are the new herbicides? Pest Manag. Sci., 77(6), pp. 2620-2625. https://doi.org/10.1002/ps.6285
5. Heap, I. (2025 September) The international herbicide-resistant weed database. Retrieved from: www.weedscience.org
6. Schwartau, V.V. & Mykhalska, L.M. (2022). Herbicide-resistant weed biotypes in Ukraine. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine., 6, pp. 85-94. https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.06.085
7. Poudyal, S. & Cregg, B.M. (2019). Irrigating nursery crops with recycled run-off: a review of the potential impact of pesticides on plant growth and physiology. HortTechnology, 29(6), pp. 716-729. https://doi.org/10.21273/HORTTECH04302-19
8. Baek, Y., Bobadilla, L.K., Giacomini, D.A., Montgomery, J.S., Murphy, B.P. & Tranel, P.J. (2021). Evolution of glyphosate-resistant weeds. In Knaak J.B. (Eds.) Reviews of environmental contamination and toxicology (pp. 1-30), Springer. https://doi.org/10.1007/398_2020_55
9. Gaines, T.A., Duke, S.O., Morran, S., Rigon, C.A., Tranel, P.J., Küpper, A. & Dayan, F.E. (2020). Mechanisms of evolved herbicide resistance. J. Biol. Chem., 295(30), pp. 10307-10330. https://doi.org/10.1074/jbc.REV120.013572
10. Charudattan, R. (2001). Biological control of weeds by means of plant pathogens: significance for integrated weed management in modern agro-ecology. BioControl, 46(2), pp. 229-260. https://doi.org/10.1023/A:1011477531101
11. Ocán-Torres, D., Martínez-Burgos, W.J., Manzoki, M.C., Soccol, V.T., Neto, C.J.D. & Soccol, C.R. (2024). Microbial bioherbicides based on cell-free phytotoxic metabolites: analysis and perspectives on their application in weed control as an innovative sustainable solution. Plants, 13(14), 1996. https://doi.org/10.3390/plants13141996
12. Islam, A.M., Karim, S.M.R., Kheya, S.A. & Yeasmin, S. (2024). Unlocking the potential of bioherbicides for sustainable and environment friendly weed management. Heliyon, 10(16), e36088. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36088
13. Hasan, M., Ahmad-Hamdani, M.S., Rosli, A.M. & Hamdan, H. (2021). Bioherbicides: An eco-friendly tool for sustainable weed management. Plants, 10(6), 1212. https://doi.org/10.3390/plants10061212
14. Kremer, R.J. (2023). Bioherbicide development and commercialization: Challenges and benefits. Opender Koul (ed). In Development and Commercialization of Biopesticides (pp. 119-148), Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95290-3.00016-9

15. El-Sayed, W. (2005). Biological control of weeds with pathogens: Current status and future trends/Biologische Schadpflanzenbekämpfung mit Pathogenen: Aktueller status und trends von morgen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz/J. Plant Dis. Prot., 112(3), pp. 209-221.
16. Hintz, W. (2007). Development of Chondrostereum purpureum as a mycoherbicide for deciduous brush control. In Vincent, C., Goettel, M.S. & Lazarovits G. (Eds.), Biological control: A global perspective (pp. 284—290). CAB International.
17. Zeng, P. (2020, February). Bio-herbicides: Global development status and product inventory. AgroPages. Retrieved from: http://news.agropages.com/News/NewsDetail-34164.htm
18. Bailey, K.L. (2014). The bioherbicide approach to weed control using plant pathogens. In Integrated pest management (pp. 245-266). Academic Press.
19. Cordeau, S., Triolet, M., Wayman, S., Steinberg, C. & Guillemin, J.P. (2016). Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. Crop Prot., 87, pp. 44-49. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.04.016
20. Verdeguer, M., Sánchez-Moreiras, A.M. & Araniti, F. (2020a). Phytotoxic effects and mechanism of action of essential oils and terpenoids. Plants, 9(11), 1571. https://doi.org/10.3390/plants9111571
21. Winston, R.L., Schwarzländer, M., Hinz, H.L., Day, M.D., Cock, M.J.W. & Julien, M.H. (2021). Biological control of weeds: a world catalogue of agents and their target weeds (Based on FHTET-2014-04). USDA forest service, forest health technology enterprise team. Https://www.ibiocontrol.org/catalog/
22. Kremer, R.J. (2005). The role of bioherbicides in weed management. Biopestic. Int., 1(3), 4, pp. 127-141.
23. Kremer, R.J. (2021). Disruption of the soil microbiota by agricultural pesticides. In Wilson, C.L. (Ed.). In Synthetic Pesticide Use in Africa (pp. 147-164). CRC Press.
24. Auld, B.A., Hetherington, S.D. & Smith, H.E. (2003). Advances in bioherbicide formulation. Weed Biol. Manage., 3(2), pp. 61-67. https://doi.org/10.1046/j.1445-6664.2003.00086.x
25. Bailey, B.A., Hebbar, K.P., Strem, M., Lumsden, R.D., Darlington, L.C., Connick Jr, W.J. & Daigle, D.J. (1998). Formulations of Fusarium oxysporum f. sp. erythroxyli for biocontrol of Erythroxylum coca var. coca. Weed Sci., 46(6), pp. 682-689. https://doi.org/10.1017/S0043174500089712
26. Kempenaar, C. & Scheepens, P.C. (1999). Dutch case studies showing the success and limitations of biological weed control. The 1999 Brighton Conference on Weeds (pp. 297-302), Brighton.
27. Wheeler, G.S. & Center, T.D. (2001). Impact of the biological control agent Hydrellia pakistanae (Diptera: Ephydridae) on the submersed aquatic weed Hydrilla verticillata (Hydrocharitaceae). Biol. Control, 21(2), pp. 168-181. https://doi.org/10.1006/bcon.2001.0927
28. Scheepens, P.C., Müller-Schärer, H. & Kempenaar, C. (2001). Opportunities for biological weed control in Europe. BioControl, 46(2), pp. 127-138. https://doi.org/10.1023/A:1011445721800
29. Charudattan, R. (2005a). Ecological, practical, and political inputs into selection of weed targets: what makes a good biological control target?. Biol. Control, 35(3), pp. 183-196. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.07.009
30. Duke, S.O., Twitty, A., Baker, C., Sands, D., Boddy, L., Travaini, M.L., Sosa, G., Polidore, A.L.A., Jhala, A.J., Kloeber, J.M., Jacq, X., Lieber, L., Varela, M.C., Lazzaro, M., Alessio, A.P., Ladner, C.C., Fourches, D., Bloch, I., Gal, M., Gressel, J., Putta, K., Phillip, Y., Shub, I., Ben-Chanoch, E. & Dayan, F.E. (2024). New approaches to herbicide and bioherbicide discovery. Weed Sci., 72(5), pp. 444-464. https://doi.org/10.1017/wsc.2024.54
31. Kremer, R.J. (2013). Interactions between the plants and microorganisms. Allelopathy J., 31(1), pp. 51-70.
32. Li, J. & Kremer, R.J. (2006). Growth response of weed and crop seedlings to deleterious rhizobacteria. Biol. Control, 39(1), pp. 58-65. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.04.016

33. Phukan, J., Deka, J., Kurmi, K. & Kalita, S. (2021). Deleterious rhizobacteria as a potential bioherbicide — A review. Int. J. Agric. Environ. Sci., 8(2), pp. 1-5. https://doi.org/10.14445/23942568/IJAES-V8I2P101
34. Kremer, R.J. (2006). The role of allelopathic bacteria in weed management. In S. Inderjit (Ed.), Allelochemicals: Biological control of plant pathogens and diseases (pp. 143-155). Springer Netherlands.
35. Abbas, T., Zahir, Z.A., Naveed, M. & Aslam, Z. (2017a). Biological control of broad-leaved dock infestation in wheat using plant antagonistic bacteria under field conditions. Environ. Sci. Pollut. Res., 24(17), pp. 14934-14944. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9144-9
36. Kennedy, A.C. (2019). Deleterious rhizobacteria and weed biocontrol. In Ann C. Kennedy (Ed). Ecological interactions and biological control (pp. 164-177), CRC Press.
37. Vessey, J.K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. Plant Soil, 255(2), pp. 571-586. https://doi.org/10.1023/A:1026037216893
38. Grossmann, K. (2010). Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. Pest Manag. Sci., 66(2), pp. 113-120. https://doi.org/10.1002/ps.1860
39. Grossmann, K. (2000). Mode of action of auxin herbicides: a new ending to a long, drawn out story. Trends Plant Sci., 5(12), pp. 506-508. https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01791-X
40. Grossmann, K. (2003). Mediation of herbicide effects by hormone interactions. J. Plant Growth Regul., 22(1), pp. 109-122. https://doi.org/10.1007/s00344-003-0020-0
41. Shi, C., Luo, P., Du, Y.T., Chen, H., Huang, X., Cheng, T.H., Luo, A., Li, H.J., Yang, W.C., Zhao, P. & Sun, M.X. (2019). Maternal control of suspensor programmed cell death via gibberellin signaling. Nat. Commun., 10(1), 3484. https://doi.org/10.1038/s41467-019-11476-3
42. Gallagher, L.A. & Manoil, C. (2001). Pseudomonas aeruginosa PAO1 kills Caenorhabditis elegans by cyanide poisoning. J. Bacteriol., 183(21), pp. 6207-6214. https://doi.org/10.1128/JB.183.21.6207-6 214.2001
43. Abbas, T., Zahir, Z.A. & Naveed, M. (2017b). Bioherbicidal activity of allelopathic bacteria against weeds associated with wheat and their effects on growth of wheat under axenic conditions. BioControl, 62(5), pp. 719-730. https://doi.org/10.1007/s10526-017-9836-6
44. Mustafa, A., Naveed, M., Saeed, Q., Ashraf, M.N., Hussain, A., Abbas, T., Kamran, M., Sun, N. & Minggang, X. (2019). Application potentials of plant growth promoting rhizobacteria and fungi as an alternative to conventional weed control methods. In M. Hasanuzzaman, M. Fujita, M.C. M.T. Filho, & T.A. R. Nogueira (Eds.). Sustainable crop production (pp. 1-23), Intech Open.
45. Blumer, C. & Haas, D. (2000). Mechanism, regulation, and ecological role of bacterial cyanide biosynthesis. Arch. Microbiol., 173(3), pp. 170-177. https://doi.org/10.1007/s002039900127
46. Dar, A., Zahir, Z.A., Ahmad, M., Hussain, A., Jaffar, M.T. & Kremer, R.J. (2024). Bacterial allelopathy: an approach for biological control of weeds. J. Appl. Microbiol., 136(9), lxae219. https://doi.org/10.1093/jambio/lxae219
47. Mingzhi, L.I., Ling, X.U., Ziling, S.U.N. & Yongquan, L.I. (2007). Isolation and characterization of a phytotoxin from Xanthomonas campestris pv. retroflexus. Chin. J. Chem. Eng., 15(5), pp. 639-642. https://doi.org/10.1016/S1004-9541(07)60138-4
48. Li, J., Kremer, R.J. & Ross Jr, L.M. (2002). Electron microscopy of root colonization of Setaria viridis by deleterious rhizobacteria as affected by soil properties. Symbiosis, 32(1), pp. 1-14.
49. Kremer, R.J. & Kennedy, A.C. (1996). Rhizobacteria as biocontrol agents of weeds. Weed Technol., 10(3), pp. 601-609. https://doi.org/10.1017/S0890037X00040525
50. Kennedy, A.C. (2018). Selective soil bacteria to manage downy brome, jointed goatgrass, and medusahead and do no harm to other biota. Biol. Control, 123, pp. 18-27. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.05.002
51. Radhakrishnan, R., Alqarawi, A.A. & Abd_Allah, E.F. (2018). Bioherbicides: Current knowledge on weed control mechanism. Ecotoxicol. Environ. Saf., 158, pp. 131-138. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.018

52. Stubbs, T.L. & Kennedy, A.C. (2012). Microbial weed control and microbial herbicides. Herbicides: Environmental Impact Studies and Management Approaches (pp. 135-166), Rijeka: InTech
53. Kennedy, A.C. & Stubbs, T.L. (2007). Management effects on the incidence of jointed goatgrass inhibitory rhizobacteria. Biol. Control, 40(2), pp. 213-221. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.10.006
54. Bo, A.B., Kim, J.D., Kim, Y.S., Sin, H.T., Kim, H.J., Khaitov, B., Young K., Ko, Y.K., Kee, W., Park, K.W. & Choi, J.S. (2019). Isolation, identification and characterization of Streptomyces metabolites as a potential bioherbicide. PLoS One, 14(9), e0222933. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222933
55. Abbas, T., Abbas, S., Abbas, U., Bashir, H., Sonia, A., Zahir, Z.A. & Naveed, M. (2024). Unveiling the bioherbicidal potential of weed suppressive bacteria to control growth of Echinocloa crusgalli in maize crop. Plant Environ., 5(02), pp. 33-43. https://doi.org/10.54219/plantenviron.05.02.2024.102
56. Verdugo-Navarrete, C., Maldonado-Mendoza, I.E., Castro-Martínez, C., Leyva-Madrigal, K.Y. & Martínez-Álvarez, J.C. (2021). Selection of rhizobacteria isolates with bioherbicide potential against Palmer amaranth (Amarathus palmeri S. Wats.). Braz. J. Microbiol., 52(3), pp. 1443-1450. https://doi.org/10.1007/s42770-021-00514-2
57. Li, W., Shen, S. & Chen, H. (2021). Bio-herbicidal potential of wheat rhizosphere bacteria on Avena fatua L. grass. Bioeng., 12(1), pp. 516-526. https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1877413
58. Bender, C.L., Rangaswamy, V. & Loper, J. (1999). Polyketide production by plant-associated pseudomonads. Ann. Rev. Phytopathol., 37(1), pp. 175-196. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.175
59. Caldwell, C.J., Hynes, R.K., Boyetchko, S.M. & Korber, D.R. (2012). Colonization and bioherbicidal activity on green foxtail by Pseudomonas fluorescens BRG100 in a pesta formulation. Can. J. Microbiol., 58(1), pp. 1-9. https://doi.org/10.1139/w11-109
60. Tranel, P.J., Gealy, D.R. & Kennedy, A.C. (1993). Inhibition of downy brome (Bromus tectorum) root growth by a phytotoxin from Pseudomonas fluorescens strain D7. Weed Technol., 7(1), pp. 134-139. https://doi.org/10.1017/S0890037X00037003
61. Omer, Z.S., Jacobsson, K., Eberhard, T.H. & Johansson, L.K.H. (2010). Bacteria considered as biocontrol agents to control growth of white clover on golf courses. Acta Agric. Scand. BSoil Plant Sci., 60(3), pp. 193-198. https://doi.org/10.1080/09064710902773637
62. Gealy, D.R., Gurusiddaiah, S. & Ogg Jr, A.G. (1996). Isolation and characterization of metabolites from Pseudomonas syringae-strain 3366 and their phytotoxicity against certain weed and crop species. Weed Sci., 44(2), pp. 383-392. https://doi.org/10.1017/S0043174500094042
63. Kennedy, A.C. (2016). Pseudomonas fluorescens strains selectively suppress annual bluegrass (Poa annua L.). Biol. Control, 103, pp. 210-217. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.09.012
64. Oluwaseun, A.C., Kola, O.J., Mishra, P., Singh, J.R., Singh, A.K., Cameotra, S.S. & Micheal, B.O. (2017). Characterization and optimization of a rhamnolipid from Pseudomonas aeruginosa C1501 with novel biosurfactant activities. Sustain. Chem. Pharm., 6, pp. 26-36. https://doi.org/10.1016/j.scp.2017.07.001
65. Robeson, D., Strobel, G., Matusumoto, G.K., Fisher, E.L., Chen, M.H. & Clardy, J. (1984). Alteichin: an unusual phytotoxin from Alternaria eichorniae, a fungal pathogen of water hyacinth. Experientia, 40(11), pp. 1248-1250.
66. Kong, H., Blackwood, C., Buyer, J.S., Gulya Jr, T.J. & Lydon, J. (2005). The genetic characterization of Pseudomonas syringae pv. tagetis based on the 16S—23S rDNA intergenic spacer regions. Biol. Control, 32(3), pp. 356-362. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.11.005
67. Lawrance, S., Varghese, S., Varghese, E.M. & Asok, A.K. (2019). Quinoline derivatives producing Pseudomonas aeruginosa H6 as an efficient bioherbicide for weed management. Biocatal. Agric. Biotechnol., 18, 101096
68. Aguila-López, J., Flores-González, M., Sánchez-Rivera, M., Díaz-Reyes, J., Sánchez-González, N. & Sánchez-Ramírez, J.F. (2025). Encapsulation and controlled release of Streptomyces sp. herbicidal metabolites for pre-plant weed germination control. Biocontrol Sci. Technol., 35(1), pp. 88-104. https://doi.org/10.1080/09583157.2024.2431597

69. Boyette, C.D. & Hoagland, R.E. (2013). Bioherbicidal potential of a strain of Xanthomonas spp. for control of common cocklebur (Xanthium strumarium). Biocontrol Sci. Technol., 23(2), pp. 183-196. https://doi.org/10.1080/09583157.2012.745485
70. Radhakrishnan, R., Park, J.M. & Lee, I.J. (2016). Enterobacter sp. I-3, a bio-herbicide inhibits gibberellins biosynthetic pathway and regulates abscisic acid and amino acids synthesis to control plant growth. Microbiol. Res., 193, pp. 132-139
71. Kennedy, A.C., Johnson, B.N. & Stubbs, T.L. (2001). Host range of deleterious rhizobacterium for biological control of downy brome. Weed Sci., 49(6), pp. 792-797. https://doi.org/10.1614/0043-1745(2001)049[0792:HROADR]2.0.CO;2
72. Bordin, E.R., Frumi Camargo, A., Stefanski, F.S., Scapini, T., Bonatto, C., Zanivan, J., Preczeski, K., Modkovski, T.A., Reichert, F.J., Mossi, A.J., Fongaro, G., Ramsdorf, W.A. & Treichel, H. (2021). Current production of bioherbicides: mechanisms of action and technical and scientific challenges to improve food and environmental security. Biocatal. Biotransform., 39(5), pp. 346-359. https://doi.org/10.1080/10242422.2020.1833864
73. Awasthi, D.P. & Mishra, N.K. (2020). Chapter-2 Myco-herbicides. In Vishuddha Nand (Ed). Research Trends in Crop and Weed (pp. 17-37).
74. Boyette, C.D. & Abbas, H.K. (1995). Weed control with mycoherbicides and phytotoxins: a nontraditional application of allelopathy. https://doi.org/10.1021/bk-1995-0582.ch021
75. Chakraborty, A. & Ray, P. (2021). Mycoherbicides for the noxious meddlesome: can Colletotrichum be a budding candidate?. Front. Microbiol., 12, 754048. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.754048
76. Xu, D., Xue, M., Shen, Z., Jia, X., Hou, X., Lai, D. & Zhou, L. (2021). Phytotoxic secondary metabolites from fungi. Toxins, 13(4), p. 261. https://doi.org/10.3390/toxins13040261
77. Kumar, V., Singh, M., Sehrawat, N., Atri, N., Singh, R., Upadhyay, S.K., Kumar, S. & Yadav, M. (2021). Mycoherbicide Control Strategy: Concept, Constraints, and Advancements. Biopestic. Int., 17(1), pp. 29-40.
78. Dumas, M.T., Wood, J.E., Mitchell, E.G. & Boyonoski, N.W. (1997). Control of Stump Sprouting of Populus tremuloides and P. grandidentata by Inoculation with Chondrostereum purpureum. Biol. Control, 10(1), pp. 37-41. https://doi.org/10.1006/bcon.1997.0507
79. Galea, V.J. (2021). Use of stem implanted bioherbicide capsules to manage an infestation of Parkinsonia aculeata in northern Australia. Plants, 10(9), 1909. https://doi.org/10.3390/plants10091909
80. Paul, N.D., Ayres, P.G. & Hallett, S.G. (1993). Mycoherbicides and other biocontrol agents for Senecio spp. Pestic. Sci., 37(4), pp. 323-329. https://doi.org/10.1002/ps.2780370404
81. Taborda, Y.D.M. (2025). Caracterizac±o morfológica, molecular e potencial fitopatogênico de fungos associados as plantas daninhas Ipomoea nil (L.) Roth, Ipomoea hederifolia L. e Merremia aegyptia (L.) Urb., sob a estratégia bioherbicida. Te (Doutorado em Protecto de Plantas). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, Brazil.
82. Zhu, H., Li, H. & Ma, Y. (2025). Exploring the Biocontrol Potential of Fungus Alternaria gaisen GD-011 in the Tibetan Plateau. Plants, 14(3), 331. https://doi.org/10.3390/plants14030331
83. Chung, Y.R., Koo, S.J., Kim, H.T. & Cho, K.Y. (1998). Potential of an indigenous fungus, Plectosporium tabacinum, as a mycoherbicide for control of arrowhead (Sagittaria trifolia). Plant Dis., 82(6), pp. 657-660. https://doi.org/10.1094/PDIS.1998.82.6.657
84. Sotelo-Cerón, N.D., Maldonado-Mendoza, I.E., Leyva-Madrigal, K.Y. & Martínez-Álvarez, J.C. (2023). Isolation, selection, and identification of phytopathogenic fungi with bioherbicide potential for the control of field bindweed (Convolvulus arvensis L.). Weed Biol. Manag., 23(3-4), pp. 99-109. https://doi.org/10.1111/wbm.12275
85. Pes, M.P., Mazutti, M.A., Almeida, T.C., Curioletti, L.E., Melo, A.A., Guedes, J.V. & Kuhn, R.C. (2016). Bioherbicide based on Diaporthe sp. secondary metabolites in the control of three tough weeds. Afr. J. Agric. Res., 11(42), pp. 4242-4249. https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11639

86. Gu, Q., Chu, S., Huang, Q., Chen, A., Li, L. & Li, R. (2023). Colletotrichum echinochloae: a potential bioherbicide agent for control of barnyardgrass (Echinochloa crus-galli (L.) Beauv.). Plants, 12(3), 421. https://doi.org/10.3390/plants12030421
87. Cignitas, E., Basbagci, G., Sulu, G. & Kitis, Y.E. (2024). Fusarium fujikuroi as a potential biocontrol agent of the parasitic weed Phelipanche aegyptiaca in tomato. J. Phytopathol., 172(3), e13344. https://doi.org/10.1111/jph.13344
88. Oloyede, A.R., Qosim, A.H.O., Atayese, A.O. & Badmos, A.O. (2025). Phytotoxic potential and safety of metabolites produced by rhizospheric fungi on the post-emergence of goat weed (Ageratum conyzoides L.) under greenhouse and field conditions. Arch. Phytopathol. Plant Prot., 58(3), pp. 167-181. https://doi.org/10.1080/03235408.2025.2466247
89. Gupta, N., Shanmugaiah, V., Roy, B. & Nighojkar, A. (2024). Phoma herbarum: A Potential Biocontrol Agent Against Weeds, that Promotes Wheat Growth. Curr. Agric. Res. J., 12(2). https://doi.org/10.12944/CARJ.12.2.22
90. Boyette, C.D., Hoagland, R.E. & Stetina, K.C. (2014). Biological control of the weed hemp sesbania (Sesbania exaltata) in rice (Oryza sativa) by the fungus Myrothecium verrucaria. Agronomy, 4(1), pp. 74-89. https://doi.org/10.3390/agronomy4010074
91. Larson, C., Chichinsky, D., Menalled, F. & Seipel, T. (2025). Integrating Puccinia punctiformis, a biological control agent, into Cirsium arvense management in semi-arid organic agriculture. Biol. Control, 202, 105724. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105724
92. Vogelgsang, Watson, Ditommaso & Hurle. (1998). Effect of the pre-emergence bioherbicide Phomopsis convolvulus on seedling and established plant growth of Convolvulus arvensis. Weed Res., 38(3), pp. 175-182. https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.1998.00088.x
93. Srisuksam, C., Yodpanan, P., Suntivich, R., Tepboonrueng, P., Wattananukit, W., Jongsareejit, B. & Amnuaykanjanasin, A. (2022). The fungus Phoma multirostrata is a host-specific pathogen and a potential biocontrol agent for a broadleaf weed. Fungal Biol., 126(2), pp. 162-173. https://doi.org/10.1016/j.funbio.2021.11.008
94. Tang, Y., Chen, W., He, F., Liu, T., Hu, Q., Weng, Q. & Zhang, K. (2024). Herbicidal fungal strain isolated from soil in Xinjiang, China. Microbiology Spectrum, 12(12), e01589-24. https://doi.org/10.1128/spectrum.01589-24
95. Tan, M., Zhang, Y., Zhang, Y., Vurro, M. & Qiang, S. (2024). Effects of Bipolaris yamadae strain HXDC-1-2 as a bioherbicide against Echinochloa crus-galli in rice and dry fields. Pest Manag. Sci., 80(8), pp. 3786-3794. https://doi.org/10.1002/ps.8081
96. Fulcher, M.R. & Little, R.C. (2024). Development and application of the fungal plant pathogen Colletotrichum shisoi to control invasive Perilla frutescens. Biol. Control, 194, 105543. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105543
97. Rostami, A., Saremi, H. & Saremi, H. (2024). Using protoplast fusion to improve biocontrol ability of Fusarium oxysporum against Egyptian broomrapes (Phelipanche aegyptiaca). Australas. Plant Pathol., 53(1), pp. 89-101. https://doi.org/10.1007/s13313-023-00957-1
98. Dorigo, W., Lucieer, A., Podobnikar, T. & Čarni, A. (2012). Mapping invasive Fallopia japonica by combined spectral, spatial, and temporal analysis of digital orthophotos. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 19, pp. 185-195. https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.05.004
99. Kurose, D., Seier, M.K. & Evans, H.C. (2024). Exploiting exotic pathogens as mycoherbicides against invasive alien weeds: Japanese knotweed as a case study. Pest Manag. Sci., 80(1), pp. 87-91. https://doi.org/10.1002/ps.7510
100. Siriphan, T., Unartngam, A., Imsabai, W., Lueangjaroenkit, P., Kosawang, C., Jørgensen, H.J.L. & Unartngam, J. (2025). Host Specificity of the Bioherbicidal Fungal Strain Paramyrothecium eichhorniae TBRC10637 for Control of Water Hyacinth. Biology, 14(2), 199. https://doi.org/10.3390/biology14020199
101. Boyette, C.D., Hoagland, R.E. & Stetina, K.C. (2019). Extending the host range of the bioherbicidal fungus Colletotrichum gloeosporioides f. sp. aeschynomene. Biocontrol Sci. Technol., 29(7), pp. 720-726. https://doi.org/10.1080/09583157.2019.1581130
102. Vieira, B.S., Dias, L.V.S.A., Langoni, V.D. & Lopes, E.A. (2018). Liquid fermentation of Colletotrichum truncatum UFU 280, a potential mycoherbicide for beggartick. Australas. Plant Pathol., 47(3), pp. 277-283. https://doi.org/10.1007/s13313-018-0555-y

103. Meena, M. & Samal, S. (2019). Alternaria host-specific (HSTs) toxins: An overview of chemical characterization, target sites, regulation and their toxic effects. Toxicol. Rep., 6, pp. 745-758. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.06.021
104. Tsuge, T., Harimoto, Y., Akimitsu, K., Ohtani, K., Kodama, M., Akagi, Y., Egusa, M., Yamamoto, M. & Otani, H. (2013). Host-selective toxins produced by the plant pathogenic fungus Alternaria alternata. FEMS Microbiol. Rev., 37(1), pp. 44-66. https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2012.00350.x
105. Strange, R.N. (2007). Phytotoxins produced by microbial plant pathogens. Nat. Prod. Rep., 24(1), pp. 127-144. https://doi.org/10.1039/B513232K
106. Piyasena, K.N.P., Wickramarachchi, W.A.R.T., Kumar, N.S., Jayasinghe, L. & Fujimoto, Y. (2015). Two phytotoxic azaphilone derivatives from Chaetomium globosum, a fungal endophyte isolated from Amaranthus viridis leaves. Mycology, 6(3-4), pp. 158-160. https://doi.org/10.1080/21501203.2015.1089332
107. Ma, K.L., Wei, W.J., Li, H.Y., Song, Q.Y., Dong, S.H. & Gao, K. (2019). Meroterpenoids with diverse ring systems and dioxolanone-type secondary metabolites from Phyllosticta capitalensis and their phytotoxic activity. Tetrahedron, 75(33), pp. 4611-4619. https://doi.org/10.1016/j.tet.2019.07.003
108. Shuai, L.I., Jiang, D.H. & Zhang, Y.L. (2016). Isolation, identification, derivatization and phytotoxic activity of secondary metabolites produced by Cladosporium oxysporum DH14, a locust-associated fungus. J. Integr. Agric., 15(4), pp. 832-839. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61145-5
109. Li, H., Wei, J., Pan, S.Y., Gao, J.M. & Tian, J.M. (2014). Antifungal, phytotoxic and toxic metabolites produced by Penicillium purpurogenum. Nat. Prod. Res., 28(24), pp. 2358-2361. https://doi.org/10.1080/14786419.2014.940586
110. Mallik, M.A.B. (2001). Selective isolation and screening of soil microorganisms for metabolites with herbicidal potential. J. Crop Prod., 4(2), pp. 219-236. https://doi.org/10.1300/J144v04n02_07
111. Huang, R.H., Gou, J.Y., Zhao, D.L., Wang, D., Liu, J., Ma, G.Y., Li, Y.Q. & Zhang, C.S. (2018). Phytotoxicity and anti-phytopathogenic activities of marine-derived fungi and their secondary metabolites. RSC Adv., 8(66), pp. 37573-37580. https://doi.org/10.1039/C8RA08047J
112. Du, F.Y., Li, X.M., Sun, Z.C., Meng, L.H. & Wang, B.G. (2020). Secondary metabolites with agricultural antagonistic potentials from Beauveria felina, a marine-derived entomopathogenic fungus. J. Agric. Food Chem., 68(50), pp. 14824-14831. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05696
113. Masi, M., Aloi, F., Nocera, P., Cacciola, S.O., Surico, G. & Evidente, A. (2020). Phytotoxic metabolites isolated from Neufusicoccum batangarum, the causal agent of the scabby canker of cactus pear (Opuntia ficus-indica L.). Toxins, 12(2), 126. https://doi.org/10.3390/toxins12020126
114. Masi, M., Meyer, S., Clement, S., Pescitelli, G., Cimmino, A., Cristofaro, M. & Evidente, A. (2017). Chloromonilinic acids C and D, phytotoxic tetrasubstituted 3-chromanonacrylic acids isolated from Cochliobolus australiensis with potential herbicidal activity against buffelgrass (Cenchrus ciliaris). J. Nat. Prod., 80(10), pp. 2771-2777. https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.7b00583
115. Cimmino, A., Andolfi, A., Berestetskiy, A. & Evidente, A. (2008). Production of phytotoxins by Phoma exigua var. exigua, a potential mycoherbicide against perennial thistles. J. Agric. Food Chem., 56(15), pp. 6304-6309. https://doi.org/10.1021/jf8004178
116. Zhao, D.L., Han, X.B., Wang, M., Zeng, Y.T., Li, Y.Q., Ma, G.Y., Liu, J., Zheng, C.J., Wen, M.X., Zhang, Z.F., Zhang, P. & Zhang, C.S. (2020). Herbicidal and antifungal xanthone derivatives from the alga-derived fungus Aspergillus versicolor D5. J. Agric. Food Chem., 68(40), pp. 11207-11214. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04265
117. Evidente, A., Andolfi, A., Abouzeid, M.A., Vurro, M., Zonno, M.C. & Motta, A. (2004). Ascosonchine, the enol tautomer of 4-pyridylpyruvic acid with herbicidal activity produced by Ascochyta sonchi. Phytochem., 65(4), pp. 475-480. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2003.09.016
118. Pedras, M.S.C., Chumala, P.B., Jin, W., Islam, M.S. & Hauck, D.W. (2009). The phytopathogenic fungus Alternaria brassicicola: phytotoxin production and phytoalexin elicitation. Phytochem., 70(3), pp. 394-402. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.01.005

119. Moskalenko, M.P. (2022). Allelopathy. Sumy [in Ukrainian]
120. Khamare, Y., Chen, J. & Marble, S.C. (2022). Allelopathy and its application as a weed management tool: A review. Front. Plant Sci., 13, 1034649. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034649
121. Bhadoria, P.B.S. (2011). Allelopathy: a natural way towards weed management. Am. J. Exp. Agric., 1(1), pp. 7-20.
122. Farooq, M., Jabran, K., Cheema, Z.A., Wahid, A. & Siddique, K.H. (2011). The role of allelopathy in agricultural pest management. Pest Manag. Sci., 67(5), pp. 493-506. https://doi.org/10.1002/ps.2091
123. Peters, R.D., Sturz, A.V., Carter, M.R. & Sanderson, J.B. (2003). Developing disease-suppressive soils through crop rotation and tillage management practices. Soil Tillage Res., 72(2), pp. 181-192. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00087-4
124. Baumann, D.T., Bastiaans, L. & Kropff, M.J. (2002). Intercropping system optimization for yield, quality, and weed suppression combining mechanistic and descriptive models. Agron. J., 94 (4), pp. 734-742. https://doi.org/10.2134/agronj2002.7340
125. Saudy, H.S. (2015). Maize—cowpea intercropping as an ecological approach for nitrogen-use rationalization and weed suppression. Arch. Agron. Soil Sci. 61 (1), pp. 1-14. https://doi.org/10.1080/03650340.2014.920499
126. Vrignon-Brenas, S., Celette, F., Piquet-Pissaloux, A., Corre-Hellou, G. & David, C. (2018). Intercropping strategies of white clover with organic wheat to improve the trade-off between wheat yield, protein content and the provision of ecological services by white clover. Field Crops Res., 224, pp. 160-169. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.009
127. Cheema, Z.A., Farooq, M. & Wahid, A. (Eds.). (2012). Allelopathy: current trends and future applications. Berlin: Springer Science & Business Media.
128. Khaliq, A., Matloob, A., Farooq, M., Mushtaq, M.N. & Khan, M.B. (2011). Effect of crop residues applied isolated or in combination on the germination and seedling growth of horse purslane (Trianthema portulacastrum). Planta Daninha, 29, pp. 121-128. https://doi.org/10.1590/S0100-83582011000100014
129. Czarnota, M.A., Paul, R.N., Weston, L.A. & Duke, S.O. (2003). Anatomy of sorgoleone-secreting root hairs of Sorghum species. Int. J. Plant Sci., 164(6), pp. 861-866. https://doi.org/10.1086/378661
130. Albouchi, F., Hassen, I., Casabianca, H. & Hosni, K. (2013). Phytochemicals, antioxidant, antimicrobial and phytotoxic activities of Ailanthus altissima (Mill.) swingle leaves. South Afr. J. Bot. 87, pp. 164-174. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.04.003
131. Tsao, R., Romanchuk, F.E., Peterson, C.J. & Coats, J.R. (2002). Plant growth regulatory effect and insecticidal activity of the extracts of the tree of heaven (Ailanthus altissima L.). BMC Ecol., 2(1), 1. https://doi.org/10.1186/1472-6785-2-1
132. Azhar, M., Cheema, Z.A., Abdul Khaliq, A.K. & Anwar-ul-Hassan, A.U.H. (2010). Evaluating the potential of allelopathic plant water extracts in suppressing horse purslane growth. Int. J. Agric. Biol. 12(4), pp. 581-585.
133. Rehman, A., Cheema, Z.A., Khaliq, A., Arshad, M. & Mohsan, S. (2010). Application of sorghum, sunflower and rice water extract combinations helps in reducing herbicide dose for weed management in rice. Int. J. Agric. Biol. 12 (6), pp. 901-906.
134. Iqbal, J. & Cheema, Z.A. (2008). Purple nutsedge (Cyperus rotundus L.) management in cotton with combined application of sorgaab and s-metolachlor. Pak. J. Bot, 40(6), pp. 2383-2391.
135. Rudnyk-Ivashchenko, O.I., Borzykh, O.O., Mykhalska, L.M., Schwartau, V.V. (2024). Bioactivity of Juglans nigra fallen leaves. Fiziol. rosl. genet., 56(5), pp. 441-450. https://doi.org/10.15407/frg2024.05.441 [in Ukrainian].
136. Anese, S., Jatobá, L.J., Grisi, P.U., Gualtieri, S.C.J., Santos, M.F.C. & Berlinck, R.G.D.S. (2015). Bioherbicidal activity of drimane sesquiterpenes from Drimys brasiliensis Miers roots. Ind. Crops Prod., 74, pp. 28-35. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.042
137. Tigre, R.C., Pereira, E.C., Da Silva, N.H., Vicente, C. & Legaz, M.E. (2015). Potential phenolic bioherbicides from Cladonia verticillaris produce ultrastructural changes in Lactuca sativa seedlings. S. Afr. J. Bot., 98, pp. 16-25. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.02.002
138. Anwar, T., Qureshi, H., Mahnashi, M.H., Kabir, F., Parveen, N., Ahmed, D., Afzal, U., Batool, S., Awais, M., Alyami, S.A. & Alhaider, H.A. (2021). Bioherbicidal ability

and weed management of allelopathic methyl esters from Lantana camara. Saudi J. Biol. Sci., 28(8), pp. 4365-4374. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.026
139. Mendes, I.D.S. & Rezende, M.O.O. (2014). Assessment of the allelopathic effect of leaf and seed extracts of Canavalia ensiformis as postemergent bioherbicides: A green alternative for sustainable agriculture. J. Environ. Sci. Health, B, 49(5), pp. 374-380. https://doi.org/10.1080/03601234.2014.882179
140. Roberts, J., Florentine, S., Fernando, W.D. & Tennakoon, K.U. (2022). Achievements, developments and future challenges in the field of bioherbicides for weed control: A global review. Plants, 11(17), 2242. https://doi.org/10.3390/plants11172242
141. Hossen, K., Das, K.R., Asato, Y., Teruya, T. & Kato-Noguchi, H. (2021). Allelopathic activity and characterization of allelopathic substances from Elaeocarpus floribundus Blume leaves for the development of bioherbicides. Agron., 12(1), 57. https://doi.org/10.3390/agronomy12010057
142. Hossen, K. & Kato-Noguchi, H. (2022). Evaluation of the allelopathic activity of albizia procera (Roxb.) benth. as a potential source of bioherbicide to control weeds. Int. J. Plant Biol., 13(4), pp. 523-534. https://doi.org/10.3390/ijpb13040042
143. Lopes, R.W.N., Marques Morais, E., Lacerda, J.J.D.J. & Araújo, F.D.D.S. (2022). Bioherbicidal potential of plant species with allelopathic effects on the weed Bidens bipinnata L. Sci. Rep., 12(1), 13476. https://doi.org/10.1038/s41598-022-16203-5
144. Pytlarz, E. & Gala-Czekaj, D. (2022). Seed meals from allelopathic crops as a potential bio-based herbicide on herbicide-susceptible and-resistant biotypes of wild oat (Avena fatua L.). Agron., 12(12), 3083. https://doi.org/10.3390/agronomy12123083
145. Hasan, M., Mokhtar, A.S., Mahmud, K., Berahim, Z., Rosli, A.M., Hamdan, H., Mst. Motmainna & Ahmad-Hamdani, M.S. (2022). Physiological and biochemical responses of selected weed and crop species to the plant-based bioherbicide WeedLock. Sci. Rep., 12(1), 19602. https://doi.org/10.1038/s41598-022-24144-2
146. Rehman, R., Hanif, M.A., Mushtaq, Z., Mochona, B. & Qi, X. (2016). Biosynthetic factories of essential oils: The aromatic plants. Nat. Prod. Chem. Res, 4(4), 1000227. https://doi.org/10.4172/2329-6836.1000227
147. Aslam, F., Khaliq, A., Matloob, A., Tanveer, A., Hussain, S. & Zahir, Z.A. (2017). Allelopathy in agro-ecosystems: a critical review of wheat allelopathy-concepts and implications. Chemoecology, 27(1), pp. 1-24. https://doi.org/10.1007/s00049-016-0225-x
148. McLaren, D.A., Butler, K.L. & Bonilla, J. (2014, September). Effects of pine oil, sugar and covers on germination of serrated tussock and kangaroo grass in a pot trial. In Proceedings of the Nineteenth Australasian Weeds Conference (pp. 239-242), Hobart, Australia.
149. Angelini, L.G., Carpanese, G., Cioni, P.L., Morelli, I., Macchia, M. & Flamini, G. (2003). Essential oils from Mediterranean Lamiaceae as weed germination inhibitors. J. Agric. Food Chem., 51(21), pp. 6158-6164. https://doi.org/10.1021/jf0210728
150. Jouini, A., Verdeguer, M., Pinton, S., Araniti, F., Palazzolo, E., Badalucco, L. & Laudicina, V.A. (2020). Potential effects of essential oils extracted from Mediterranean aromatic plants on target weeds and soil microorganisms. Plants, 9(10), 1289. https://doi.org/10.3390/plants9101289
151. Nikolova, M.T. & Berkov, S.H. (2018). Use of essential oils as natural herbicides. Ecol. Balkanica, 10(2), pp. 259-265.
152. Ramezani, S., Saharkhiz, M.J., Ramezani, F. & Fotokian, M.H. (2008). Use of Essential Oils as Bioherbicides. J. Essent. Oil Bear. Plants, 11(3), pp. 319-327. https://doi.org/10.1080/0972060X.2008.10643636
153. Dudai, N., Poljakoff-Mayber, A., Mayer, A.M., Putievsky, E. & Lerner, H.R. (1999). Essential oils as allelochemicals and their potential use as bioherbicides. J. Chem. Ecol., 25(5), pp. 1079-1089. https://doi.org/10.1023/A:1020881825669
154. Elghobashy, R.M., El-Darier, S.M., Atia, A.M. & Zakaria, M. (2024). Allelopathic potential of aqueous extracts and essential oils of Rosmarinus officinalis L. and Thymus vulgaris L.J. Soil Sci. Plant Nutr., 24(1), pp. 700-715. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01576-x
155. Singh, N., Singh, H.P., Batish, D.R., Kohli, R.K. & Yadav, S.S. (2020). Chemical characterization, phytotoxic, and cytotoxic activities of essential oil of Mentha longifolia. Environ. Sci. Pollut. Res., 27(12), pp. 13512-13523. https://doi.org/10.1007/s11356-020-07823-3

156. Mahdavikia, F. & Saharkhiz, M.J. (2015). Phytotoxic activity of essential oil and water extract of peppermint (Mentha× piperita L. CV. Mitcham). J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants, 2(4), pp. 146-153. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.09.003
157. Bozok, F. & Ulukanli, Z. (2016). Volatiles from the aerial parts of east Mediterranean clary sage: Phytotoxic activity. J. Essent. Oil Bear. Plants, 19(5), pp. 1192-1198. https://doi.org/10.1080/0972060X.2015.1119066
158. Verdeguer, M., Torres-Pagan, N., Muñoz, M., Jouini, A., García-Plasencia, S., Chinchilla, P., Berbegal, M., Salamone, A., Agnello, S., Carrubba, A., Cabeiras-Freijanes, L., Regueira-Marcos, L., Sánchez-Moreiras, A.M. & Blázquez, M.A. (2020). Herbicidal activity of Thymbra capitata (L.) Cav. essential oil. Molecules, 25(12), 2832. https://doi.org/10.3390/molecules25122832
159. Kaab, S.B., Martin, M., Degand, H., Foncoux, B., Morsomme, P. & Jijakli, M.H. (2025). Label free quantitative proteomic analysis reveals the physiological and biochemical responses of Arabidopsis thaliana to cinnamon essential oil. Sci. Rep., 15(1), 6156. https://doi.org/10.1038/s41598-025-89368-4
160. Ben Kaab, S., Fernández Pierna, J.A., Foncoux, B., Compère, P., Baeten, V. & Jijakli, M.H. (2024). Biochemical and physiological responses of weeds to the application of a botanical herbicide based on cinnamon essential oil. Plants, 13(23), 3432. https://doi.org/10.3390/plants13233432
161. Miloudi, S., Abbad, I., Soulaimani, B., Ferradous, A., Abbad, A. & El Mouden, E.H. (2024). Optimization of herbicidal activity of essential oil mixtures from Satureja alpina, Thymus satureioides and Myrtus communis on seed germination and post-emergence growth of Amaranthus retroflexus L. Crop Prot., 180, 106642. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106642
162. Dutra, Q.P., Christ, J.A., Carrijo, T.T., de Assis Alves, T., de Assis Alves, T., Mendes, L.A. & Praca-Fontes, M.M. (2020). Phytocytotoxicity of volatile constituents of essential oils from Sparattanthelium Mart. species (Hernandiaceae). Sci. Rep., 10(1), 12213. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69205-6
163. Wei, C., Zhou, S., Shi, K., Zhang, C. & Shao, H. (2020). Chemical profile and phytotoxic action of Onopordum acanthium essential oil. Sci. Rep., 10(1), 13568. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70463-7
164. Synowiec, A., Kalemba, D., Drozdek, E. & Bocianowski, J. (2017). Phytotoxic potential of essential oils from temperate climate plants against the germination of selected weeds and crops. J. Pest Sci., 90(1), pp. 407-419. https://doi.org/10.1007/s10340-016-0759-2
165. Ribeiro, V.P., Bajsa-Hirschel, J., Bastos, J.K., Reichley, A., Duke, S.O. & Meepagala, K.M. (2024). Characterization of the Phytotoxic Potential of Seven Copaifera spp. Essential Oils: Analyzing Active Compounds through Gas Chromatography—Mass Spectrometry Molecular Networking. J. Agric. Food Chem., 72(33), pp. 18528-18536. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c04586
166. Baranová, B., Grulová, D., Polito, F., Sedlák, V., Konečná, M., Blaščáková, M.M., Amri, I., De Feo, V. & Poráčová, J. (2025). Artemisia herba-alba Essential Oil: Chemical Composition, Phytotoxic Activity and Environmental Safety. Plants, 14(2), 242. https://doi.org/10.3390/plants14020242
167. Abd-ElGawad, A.M., Assaeed, A.M., Bonanomi, G., Dar, B.A., Abd Elkarim, A.S., El Gendy, A.E.N.G. & Elshamy, A.I. (2025). Oxygenated terpenoids-rich essential oil of Pergularia tomentosa exhibited herbicidal potentiality towards Dactyloctenium aegyptium and Bidens pilosa weeds. J. Essent. Oil Bear. Plants, 28(2), pp. 250-261. https://doi.org/10.1080/0972060X.2025.2483330
168. Kaab, S.B., Rebey, I.B., Hanafi, M., Berhal, C., Fauconnier, M.L., De Clerck, C., Ksouri, R. & Jijakli, H. (2019). Rosmarinus officinalis essential oil as an effective antifungal and herbicidal agent. Span. J. Agric. Res., 17(2), e1006-e1006. https://doi.org/10.5424/sjar/2019172-14043
169. Gressel, J. (2024). Four pillars are required to support a successful biocontrol fungus. Pest Manag. Sci., 80(1), pp. 35-39. https://doi.org/10.1002/ps.7417
170. King, R.R., Lawrence, C.H. & Gray, J.A. (2001). Herbicidal properties of the thaxtomin group of phytotoxins. J. Agric. Food Chem., 49(5), pp. 2298-2301. https://doi.org/10.1021/jf0012998

171. Sparks, T.C., Sparks, J.M. & Duke, S.O. (2023). Natural product-based crop protection compounds — origins and future prospects. J. Agric. Food Chem., 71(5), pp. 2259-2269. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c06938
172. Hachisu, S. (2021). Strategies for discovering resistance-breaking, safe and sustainable commercial herbicides with novel modes of action and chemotypes. Pest Manag. Sci., 77(7), pp. 3042-3048. https://doi.org/10.1002/ps.6397
173. Békés, M., Langley, D.R. & Crews, C.M. (2022). PROTAC targeted protein degraders: the past is prologue. Nat. Rev. Drug Discov., 21(3), pp. 181-200. https://doi.org/10.1038/s41573-021-00371-6
174. Viswa, C.A., Bleys, J., Leydon, E., Shah, B. & Zurkiya, D. (2024). Generative AI in the Pharmaceutical Industry: Moving from Hype to Reality. McKinsey & Company. 25 p. https://www.mckinsey.com/industries/life-sciences/our-insights/generative-ai-in-the-pharmaceutical-industry-moving-from-hype-to-reality. Accessed: July, 2024.

Received 12.11.2025

BIOLOGICAL HERBICIDES: AN ECOLOGICAL ALTERNATIVE TO SYNTHETIC HERBICIDES

V.O. Storozhenko, V.V. Yukhymuk

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylkivska St., Kyiv, 03022, Ukraine
e-mail: vstoro@ukr.net

The review focuses on the role of bioherbicides in weed control, their use as an alternative to synthetic herbicides, including their role in overcoming resistance to synthetic herbicides. The possibilities for their combined use with synthetic herbicides to protect crops from weeds are considered. A brief historical overview of the development of bioherbicide technologies is provided, and the current distribution of bioherbicides in the world and the problems of their application are considered. Bioherbicides are shown to have diverse natural origins. Sources of bioherbicides can be allelopathic bacteria and plants, fungi, and mycotoxins isolated from them. Special attention is paid to essential oils as substances with potential herbicidal activity. The physiological characteristics of the effect of specific and non-specific bioherbicides on weeds, their selectivity in relation to both individual species and cultivated plants, as well as related problems are considered. The features of the search for target plant species for different types and forms of bioherbicides are discussed. Some identified compounds of natural origin with herbicidal activity and the relationship between their chemical structure and phytotoxicity are described. Issues related to the production and economic efficiency of bioherbicides in the agro-industrial sector and possible ways to address them are considered. A separate section is devoted to the latest technologies for the development of new bioherbicides and synthetic herbicides using biotechnological methods, as well as the use of artificial intelligence in these processes. Their potential advantages are considered, primarily related to a significant reduction in the time required for the identification of naturally occurring herbicides, their screening, and ultimately the time required for the development of new naturally occurring herbicides.

Key words: weeds, resistance, bioherbicides, synthetic herbicides, screening, mycoherbicides, allelopathy, bacterial herbicides, essential oil herbicides.

ORCID

В.О. СТОРОЖЕНКО — V.O. Storozhenko https://orcid.org/0000-0002-7355-3699

В.В. ЮХИМУК — V.V. Yukhymuk https://orcid.org/0000-0001-5551-5253