

<https://doi.org/10.15407/frg2024.05.399>

УДК 631.316

РОЗВИТОК СИСТЕМ КОНТРОЛЮВАННЯ БУР'ЯНІВ

В.В. ЮХИМУК

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

Розвиток екологічно безпечних технологій вирощування сільськогосподарських культур обмежується необхідністю широкого застосування хімічних засобів боротьби з бур'янами. Тому вже з 1980-х років розроблялися складові технології вирощування зі зменшеним внесенням токсикантів. Застосування відомих із часів початку розвитку інтенсивного сільського господарства агротехнічних рішень лімітується зростанням цін на енергоресурси. В овочівництві та садах ефективними є мульчі, як хімічні (плівки), так і органічні. Великі зусилля спрямовані на розробку біологічних методів контролювання бур'янів, від селективних/специфічних до окремих видів бур'янів патогенів до складних багатокomпонентних систем в агрофітоценозах, де ефективно використовуються численні взаємодії між видами рослин, між рослинами в різних ярусах посіву, з різною ефективністю поглинання ФАР тощо. Сучасні методи контролювання бур'янів все більше спираються на цифрові технології у сільському господарстві. Цьому сприяє прогрес інформаційних технологій (ІТ), що дає можливість роботизації сільськогосподарського виробництва. Також використання здобутків ІТ сприяє вирішенню важливої проблеми браку працівників. Роботи з видалення бур'янів орієнтуються в просторі за допомогою супутникових систем навігації або сканерів LiDAR. Як робочі інструменти використовуються лазери або роботизовані маніпулятори. За допомогою камер відбувається розпізнавання та ідентифікація культурних рослин і засмічувачів. Крім механічного видалення бур'янів, вивчалася також ефективність застосування високовольтного електричного розряду й електромагнітного випромінювання надвисокої частоти. Всі ці методи мають свої переваги та недоліки. У ближній перспективі альтернативні методи можуть замінити хімічний лише в окремих ситуаціях і на незначних площах. Однак це не виключає можливості подальшого удосконалення цих методів і можливості значно ширшого їх використання в майбутньому.

Ключові слова: інтегрована боротьба з бур'янами, механічний контроль за бур'янення, ІТ у сільському господарстві, біологічний контроль, стійке сільське господарство.

Зростання потреб людства в агропродукції ставить перед агропромисловим комплексом завдання підвищення виробництва для досягнення продовольчої безпеки. Для досягнення цієї мети важливе значен-

ня має захист посівів від бур'янів, оскільки забур'яненість призводить до значних втрат сільськогосподарської продукції. Зараз головним елементом інтегральних технологій захисту посівів є хімічний метод контролювання бур'янів [1, 2]. Однак широкомасштабне застосування гербіцидів і спричинений ними селекційний тиск спровокували виникнення резистентних до гербіцидів біотипів бур'янів, кількість яких останнім часом стрімко зростає [3]. Їх розповсюдження призводить до зниження ефективності захисту, значних втрат врожаю, що потребує вживання додаткових заходів для контролювання бур'янів. Внаслідок цього зростають витрати при вирощуванні сільськогосподарських культур і збільшується рівень пестицидного навантаження на агроценози [4–6].

Отже, проблема резистентності бур'янів до гербіцидів набула загальносвітового значення і потребує невідкладного пошуку можливих шляхів її вирішення. Нині вдосконалення хімічного методу контролювання бур'янів завдяки створенню нових гербіцидів залежить від прогресу у висвітленні низки фундаментальних питань щодо механізмів індукованого гербіцидами патогенезу [7]. Оскільки терміни, які знадобляться для вирішення цих питань, невідомі, а проблема резистентності потребує негайних заходів, тому останнім часом актуалізувалися розробки альтернативних методів захисту посівів. Розповсюдження резистентності до гербіцидів спонукає до ширшого застосування відомих і пошуку нових, альтернативних хімічному, методів контролювання бур'янів, які в майбутньому дали б змогу повністю відмовитися від застосування гербіцидів або хоча б істотно зменшити масштаби їх використання [8–13].

Історично склалося, що всі системи контролювання бур'янів розвивалися від механічного прополювання до хімічного. З огляду на це здається, що першим знову має бути механічний метод. Однак у сучасному суспільстві як найреальніша альтернатива для контролю бур'янів розглядається біометод. Класичним біологічним методом контролювання бур'янів вважається використання фітопатогенів, які є природними селективними «ворогами» бур'янів [14–16]. З деяких причин можливості використання біометоду є обмеженими, через що пропонується використовувати біогербіциди в якості синергістів синтетичних гербіцидів [17]. Втім існує низка ситуацій, в яких специфічні патогени для рослин-хазяїв можуть бути розроблені як біогербіциди, наприклад, для контролювання паразитних бур'янів [18].

Оригінальним способом зменшення насінневої продуктивності бур'янів і, як наслідок, потенційного засмічення ґрунту є аналог біологічного методу боротьби зі шкідниками, який базується на введенні стерильних самців у популяцію шкідливих комах, а у випадку бур'янів пропонується використовувати стерильний пилок [19]. Певним «симбіозом» хімічного та біологічного методів є використання в якості гербіцидів продуктів життєдіяльності фітопатогенів [20]. Водночас досвід практичного використання фітопатогенів у межах класичного біологічного методу або ж результати застосування фітотоксинів демонструють, що обидва варіанти біологічного методу за ефективністю не можуть конкурувати із синтетичними гербіцидами [21]. Тому природні фітотоксини частіше розглядаються як імовірне джерело ство-

рення гербіцидів з новими механізмами дії, тобто як спосіб удосконалення хімічного методу контролювання бур'янів [22, 23].

Іншим методом, який широко використовується для зменшення забур'янення, є мульчування ґрунту. Мульчування ґрунту органічними або синтетичними матеріалами, окрім пригнічення проростання насіння бур'янів, дає змогу захистити ґрунт від ерозії, зберегти в ґрунті вологу, захистити кореневу систему від різких коливань температури, що зрештою забезпечує підвищення урожайності та якості агропродукції [24]. Мульчування найчастіше використовують для контролювання небажаної рослинності в міському ландшафтному дизайні та при облаштуванні присадибних ділянок [25]. У сільському господарстві мульчування органічними рештками, а також нетканими синтетичними матеріалами широко використовується в посівах овочів, у посадках багаторічних рослин, зокрема, на ягідниках [26, 27]. Слід відзначити, що використання для мульчування синтетичної плівки може призвести до засмічення ґрунту залишками персистентного пластику й спричинити значний негативний вплив на довкілля [28].

Альтернативою синтетичній плівці може бути висівання товарних культур під покривну культуру при використанні технологій з мінімальним або взагалі без обробітку ґрунту (no-till) [29, 30]. Використання покривної культури може реалізовуватися двома способами: посів товарної культури проводиться по вегетації покривної культури або вже після її скошування під шар органічної мульчі. Потрібно враховувати, що посів по вегетації покривної культури є досить складним завданням [31, 32]. Для того, щоб культура була придатна для такого використання, вона має відповідати багатьом критеріям. Головними з них є швидкий ріст в осінній період, здатність до перезимівлі, велика біомаса, щоб ефективно інгібувати ріст бур'янів, стійкість до шкідників і хвороб, які можуть вражати товарну культуру [33, 34]. Перевагою застосування методу мульчування з використанням покривних культур є те, що завдяки цій технології ґрунт захищений від ерозії, покращується його структура та родючість.

Однак використання покривних культур має певні недоліки. Зокрема внаслідок того, що покривна культура конкурує не лише з бур'янами, а також із товарною культурою, може зменшуватися врожай. Водночас необхідно враховувати можливість алелопатичної взаємодії між покривною та товарною культурами [35, 36]. Разом з тим, алелопатичну активність решток окремих видів рослин, наприклад, *Schinus terebinthifolius*, *Ailanthus altissima*, *Triadica sebifera*, *Juglans nigra*, *Wedelia trilobata*, які мають сильний пригнічувальний вплив на бур'яни, доцільно використовувати в якості мульчувального матеріалу [37–40]. Із традиційних культур сильний алелопатичний ефект чинить жито завдяки виробленню бензоксазінонів, які можуть накопичуватися в ґрунті. До того ж виділення бензоксазінонів відбувається активніше з мертвих залишків рослин, ніж зі свіжих [41]. Було помічено, що кореневі виділення жита здатні протягом двох місяців пригнічувати проростання насіння бур'янів і не впливати на урожайність сої [42, 43]. Проте, внаслідок технічних обмежень, ця технологія не може використовуватися на великих площах. Переважно мульчування рештками рослин, що мають такі властивості, вико-

ристовують у господарствах, які спеціалізуються на органічному землеробстві.

Алелопатія є одним з елементів конкуренції між культурними рослинами та бур'янами в агрофітоценозі [44]. Алелопатична активність окремих частин рослин або екстрактів з них може бути безпосередньо застосована для боротьби з бур'янами [45—47], або ж через використання даних речовин вдасться зменшити норми внесення синтетичних гербіцидів [48]. Ці речовини також є перспективним матеріалом для створення нових гербіцидів [45, 49]. Привабливою є можливість використання культурних рослин, які мають таку властивість, для боротьби з бур'янами. Зокрема, рослини ячменю та ріпаку виявилися дієвими для пригнічення росту й розвитку резистентного до інгібіторів ALS біотипу *Glebionis coronaria*, який становив серйозну загрозу посівам зернових колосових [50]. Проводилися селекційні дослідження, спрямовані на створення сортів пшениці [51, 52] та рису [53, 54], підвищена алелопатична активність яких збільшувала би конкурентоспроможність цих культур.

Але все ж таки механічне прополювання, яке було ще з часів початку культурного землеробства, досі залишається актуальним. Механічне прополювання може здійснюватися за умови просторового відокремлення бур'янів від культурних рослин. Тобто, механічне прополювання застосовується для контролювання бур'янів у міжрядях посівів просапних культур, а також на парах при підготовці до сівби або після збирання урожаю. Залежно від умов довкілля механічне прополювання має свої позитивні й негативні сторони. Його позитивною стороною є розпушення та зменшення щільності ґрунту, збереження ґрунтової вологості. А негативною — підвищення імовірності вітрової ерозії ґрунту, можливість пошкодження кореневої системи рослин при міжрядних прополюваннях. Для нівелювання негативних наслідків, зумовлених пошкодженням культурних рослин, збільшують густоту посіву, що призводить до підвищення витрат на посівний матеріал [55].

Безперечним недоліком механічного прополювання є відсутність селективності. До появи гербіцидів і дотепер в органічному землеробстві цей недолік долається за допомогою використання малопродуктивної та економічно витратної ручної праці. Частковим рішенням проблеми є гібридний метод захисту, який поєднує механічне міжрядне прополювання та обприскування гербіцидами в рядках [56]. Подальше поліпшення технологій механічного прополювання буде здійснюватися шляхом удосконалення методів фізичного впливу на бур'яни та застосування роботизованих систем з використанням штучного інтелекту для забезпечення розпізнавання культурних рослин і бур'янів [10, 57, 58].

Можливим напрямом удосконалення фізичних методів прополювання є застосування термічного впливу на бур'яни. Цей вплив може реалізовуватися шляхом випалювання або обробкою бур'янів гарячою парою, обробітку ґрунту електромагнітним випромінюванням надвисокої частоти (НВЧ) [59]. Так, спалювання рослинних решток із насінням забезпечує зменшення насінневого пулу в ґрунті [60, 61]. Випалювання може бути ефективним для боротьби з інвазивними ви-

дами бур'янів [62]. Однак метод випалювання навряд чи може широко застосовуватися у сільськогосподарському виробництві, а імовірніше є придатнішим для використання в місцях, де відсутня можливість пошкодження вогнем культурних рослин — на узбіччях доріг, залізничних коліях тощо [63, 64]. Крім того, великим недоліком випалювання є викиди вуглекислого газу, що суперечить сучасній тенденції до екологізації сільського господарства [65].

Метод пропарювання, згідно з яким термічна обробка здійснюється гарячою водяною парою, застосовується для боротьби з небажаною рослинністю, яка перешкоджає відновленню лісових насаджень на вирубках [66, 67], а також для обробки ґрунту з метою зменшення насінневого пулу [68, 69]. Водночас сублетальні дози пари можуть порушувати спокій насіння та провокувати проростання деяких видів бур'янів, що в подальшому полегшить їх знищення [70]. Проте слід враховувати, що пропарювання ґрунту може негативно позначитися на ґрунтовій мікрофлорі, зокрема призвести до зниження вмісту азотфіксуючих бактерій у ґрунті [71]. Якщо пропарювати лише окремі частини, а не всю ділянку, то така технологія є безпечнішою [72]. Енерговитрати на контролювання бур'янів шляхом пропарювання залежать від видового складу агроценозу, оскільки різні види відрізняються за рівнем термочутливості, а також від механічного складу ґрунту [70, 73].

Досить ефективним методом термічного впливу є застосування електромагнітного НВЧ опромінення. Цікавість до цього методу виникла досить давно, ще до відкриття та впровадження у практику гербіцидів [74]. Було встановлено, що ефективність пригнічення проростання насіння повністю визначається тим, наскільки зростає його температура внаслідок опромінення [75]. При цьому вплив НВЧ опромінення на схожість насіння бур'янів залежить від виду рослин і вологості насіння [76]. НВЧ опромінення дає змогу не тільки пригнічувати схожість насіння, а й знищувати вегетуючі рослини бур'янів. До того ж чутливість до опромінення залежить від виду рослин, їх віку та лінійних розмірів [77]. Попри те, що енергетична ефективність НВЧ опромінення є досить високою порівняно з іншими термічними методами, не потрібно перевозити велику кількість води й палива, як при випарюванні, відсутня небезпека займання, як при випалюванні, цей метод не набув широкого розповсюдження. Насамперед це зумовлено його низькою продуктивністю, оскільки для обробки одиниці площі за допомогою НВЧ опромінення потрібно більше часу, ніж при використанні інших термічних методів [78].

Окрім НВЧ опромінення рослини бур'янів можуть знищуватися високовольтним електричним розрядом [78]. Ця технологія теж може бути віднесена до термічних методів, оскільки пошкодження відбувається внаслідок стрімкого нагрівання рослин бур'янів електричним струмом, який проходить через рослини від електроду на землю. Електричний ланцюг може замикатися або при безпосередньому контакті електроду з рослинами, або сходженням іскрового розряду при наближенні електроду до рослин. Отже, ефективність дії електричного розряду на бур'яни визначається силою струму і часом контакту рослин з електродом. Крім того, чутливість до електричного

розряду залежить від анатомо-морфологічних особливостей рослин й умов зовнішнього середовища [79, 80]. Недоліком цієї технології є її потенційна небезпека для осіб, які здійснюють обробку, та необхідність надійного просторового розділення бур'янів і культурних рослин.

Загальним недоліком термічних методів контролювання бур'янів є інерційність, яка, навіть за умови існування пристрою, що розрізнятиме бур'яни та культурні рослини [81], ускладнює вирішення проблеми селективності. Подолати цей недолік можна, якщо в якості фізичного засобу перенесення енергії на бур'яни будуть використовуватися лазери [82–85]. Як і у випадку інших термічних методів, чутливість рослин до лазерного опромінення зменшується зі збільшенням їх віку і, відповідно, збільшення лінійних розмірів [85]. Важливим чинником, який впливає на ступінь пошкодження рослин і можливість їх відновлення після опромінення, є розмір лазерного променя. Необхідно щоб він був досить малим для концентрації енергії, достатньої для пошкодження клітин [86, 87], але не занадто малим, щоб кількість пошкоджених меристематичних клітин унеможливила подальше відновлення рослини [88].

Отже, всі переваги від використання лазерного опромінення залежать від керуючого пристрою, який у польових умовах у режимі реального часу має точно визначати місцезнаходження бур'янів і відрізняти їх від культурних рослин [89]. Зокрема, лімітувальним чинником для таких керуючих пристроїв може бути занадто велика густина бур'янів [90]. Крім того, при використанні лазерних променів необхідно дотримуватись заходів безпеки, оскільки його відбиття може бути шкідливим для обслуговуючого персоналу [85]. Сьогодні проводиться активна робота з вдосконалення технології лазерного прополювання шляхом розробки нових способів розміщення лазерів і поліпшення системи розпізнавання бур'янів і культурних рослин [89, 91].

Прогрес ІТ забезпечив можливість роботизації сільськогосподарського виробництва, зокрема використання роботів для прополювання сільськогосподарських посівів [10, 92, 93]. Такі роботи складаються із трьох важливих блоків: сенсорної системи, штучного інтелекту для обробки отриманих даних та прийняття рішення, робочого механізму для виконання цього рішення [94]. Для орієнтації у просторі може використовуватися супутникова система навігації або сканери LiDAR, перевагою яких є більша точність і відсутність збоїв, зумовлених тимчасовим перериванням сигналу від супутників [95–99]. В якості робочих інструментів для прополювання, окрім лазерів, можуть використовуватися роботизовані маніпулятори, оснащені електродом [100], або здатні виконувати інші операції [99]. Зазвичай система, яка відрізняє бур'яни від культурних рослин, може використовуватися не тільки для фізичного впливу на бур'яни, а й для зменшення витрат гербіцидів завдяки відмові від суцільного обприскування посівів і спрямованого внесення гербіцидів на бур'яни [101]. Можливий також варіант, коли залежно від виду бур'янів використовується механічний або хімічний метод впливу [102]. Однак найскладнішим є ідентифікація та розпізнавання рослин. Прогрес у

вирішенні цієї проблеми зумовлений можливістю використання різних варіантів здатного до самонавчання штучного інтелекту, якому вдається відрізнити бур'яни від культурних рослин з ефективністю понад 90 % [103–108]. Складність проблеми розпізнавання бур'янів і культурних рослин істотно зростає при змиканні листків посіву культурних рослин. Проте компаніями «TerraSentia» та «Weeding Apparatus» розроблені малі портативні агророботи, які вирішують цю проблему й уможливають проведення прополювання протягом всього вегетаційного періоду [109].

Питання про заміну хімічного методу контролювання бур'янів фізичними способами постало ще до виникнення проблеми резистентності у зв'язку з побоюваннями щодо екологічних наслідків широкомасштабного застосування гербіцидів. Зокрема, вивчалася ефективність застосування високовольного електричного розряду для знищення вегетуючих рослин бур'янів та електромагнітного випромінювання надвисокої частоти для знищення насіння бур'янів у ґрунті [110]. Як наслідок було зроблено висновок, що фізичні методи зможуть конкурувати з хімічним лише за умови розроблення методів переривання стану органічного спокою насіння та стимуляції проростання насіння бур'янів. Впровадження цих методів дало б змогу отримувати масові сходи бур'янів, які легко можна було б у подальшому знищити фізичними засобами. Так, було запропоновано мембранний механізм регуляції, який пояснював різні особливості стану спокою [111]. Однак питання щодо розробки методів стимуляції проростання насіння бур'янів не вирішено й дотепер. Всі фізичні методи можуть забезпечити високу ефективність контролювання бур'янів, але вони є енерговитратними [112] й поки що занадто вартісними [113]. Недоліком біологічних методів є їх низька ефективність порівняно із застосуванням гербіцидів [21].

Отже, в ближній перспективі альтернативні методи можуть замінити хімічний лише в окремих ситуаціях і на незначних площах, зокрема при вирощуванні органічної продукції. Втім це не виключає можливості подальшого вдосконалення цих методів і можливості значно ширшого їх використання в майбутньому.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Kraehmer H., Laber B., Rosinger C., Schulz A. Herbicides as weed control agents: state of the art: I. Weed control research and safener technology: the path to modern agriculture. *Plant Physiol.* 2014. **166** (3). P. 1119–1131. <https://doi.org/10.1104/pp.114.241901>
2. Kraehmer H., van Almsick A., Beffa R., Dietrich H., Eckes P., Hacker E., Hain R., Strek H.J., Stuebler H., Willms L. Herbicides as weed control agents: state of the art: II. Recent achievements. *Plant Physiol.* 2014. **166** (3). P. 1132–1148. <https://doi.org/10.1104/pp.114.241992>
3. Heap I. The International Herbicide-Resistant Weed Database. September 2, 2024. Retrieved from: www.weedscience.org
4. Riar D.S., Norsworthy J.K., Steckel L.E., Stephenson D.O., Bond J.A. Consultant perspectives on weed management needs in midsouthern United States cotton: a follow-up survey. *Weed Technol.* 2013. **27** (4). P. 778–787. <https://doi.org/10.1614/WT-D-13-00070.1>
5. Hurley T.M., Frisvold G. Economic Barriers to Herbicide-Resistance Management. *Weed Sci.* 2016. **64** (S1). P. 585–594. <https://doi.org/10.1614/WS-D-15-00046.1>

6. Livingston M., Fernandez-Cornejo J., Frisvold G.B. Economic returns to herbicide resistance management in the short and long run: the role of neighbor effects. *Weed Sci.* 2016. **64** (S1). P. 595–608. <https://doi.org/10.1614/WS-D-15-00047.1>
7. Morderer Y.Y. What is missing to create new herbicides and solving the problem of resistance? *Fiziol. rast. i genetika.* 2023. **55** (5). P. 371–394. <https://doi.org/10.15407/frg2023.05.371>
8. Hatcher P.E., Melander B. Combining physical, cultural and biological methods: prospects for integrated non-chemical weed management strategies. *Weed Res.* 2003. **43** (5). P. 303–322. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00352.x>
9. Harker K., O'Donovan J. Recent weed control, weed management, and integrated weed management. *Weed Technol.* 2013. **27** (1). P. 1–11. <https://doi.org/10.1614/WT-D-12-00109.1>
10. Westwood J.H., Charudattan R., Duke S.O., Fennimore S.A., Marrone P., Slaughter D.C., Swanton C., Zollinger R. Weed Management in 2050: Perspectives on the future of weed science. *Weed Sci.* 2018. **66** (3). P. 275–285. <https://doi.org/10.1017/wsc.2017.78>
11. Duke S.O., Powles S.B., Sammons R.D. Glyphosate — how it became a once in a hundred year herbicide and its future. *Outlooks on Pest Manag.* 2018. **29** (6). P. 247–251. https://doi.org/10.1564/v29_dec_03
12. Perotti V.E., Larran A.S., Palmieri V.E., Martinatto A.K., Permingeat H.R. Herbicide resistant weeds: a call to integrate conventional agricultural practices, molecular biology knowledge and new technologies. *Plant Sci.* 2020. 290. 110255. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110255>
13. Moore L., Jennings K., Monks D., Boyette M., Leon R., Jordan D., Ippolito S., Blankenship C., Chang P. Evaluation of electrical and mechanical Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) management in cucumber, peanut, and sweetpotato. *Weed Technol.* 2023. **37** (1). P. 53–59. <https://doi.org/10.1017/wet.2023.1>
14. Tichich R.P., Doll J.D. Field-based evaluation of a novel approach for infecting Canada thistle (*Cirsium arvense*) with *Pseudomonas syringae* pv. *tagetis*. *Weed Sci.* 2006. **54** (1). P. 166–171. <https://doi.org/10.1614/WS-03-144R3.1>
15. Leth V., Netland J., Andreassen C. *Phomopsis cirsii*: a potential biocontrol agent of *Cirsium arvense*. *Weed Res.* 2008. **48** (6). P. 533–541. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00666.x>
16. Gu Q., Chu S., Huang Q., Chen A., Li L., Li R. *Colletotrichum echinocloeae*: A Potential Bioherbicide Agent for Control of Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.). *Plants.* 2023. **12** (3). P. 421. <https://doi.org/10.3390/plants12030421>
17. Gressel J. Herbicides as Synergists for Mycoherbicides, and Vice Versa. *Weed Sci.* 2010. **58** (3). P. 324–328. doi:10.1614/WS-09-071.1
18. Hallett S.G. Where are the bioherbicides? *Weed Sci.* 2005. **53** (3). P. 404–415. <https://doi.org/10.1614/WS-04-157R2>
19. Wu W., Mesgaran M.B. Exploring sterile pollen technique as a novel tool for management of Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*). *Weed Sci.* 2024. **72** (3). P. 234–240. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.7>
20. Manichart N., Laosinwattana C., Somala N., Teerarak M., Chotsaeng N. Physiological mechanism of action and partial separation of herbicide—active compounds from the *Diaporthe* sp. extract on *Amaranthus tricolor* L. *Sci. Rep.* 2023. **13** (1). 18693. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46201-0>
21. Duke S.O. Why are there no widely successful microbial bioherbicides for weed management in crops? *Pest Manag. Sci.* 2024. **80** (1). P. 56–64. <https://doi.org/10.1002/ps.7595>
22. Dayan F.E., Duke S.O. Natural compounds as next-generation herbicides. *Plant Physiol.* 2014. **166** (3). P. 1090–1105. <https://doi.org/10.1104/pp.114.239061>
23. Duke S.O., Pan Z., Bajsa-Hirschel J., Boyette C.D. The potential future roles of natural compounds and microbial bioherbicides in weed management in crops. *Adv. Weed Sci.* 2022. **40** (SP1). e020210054. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five003>
24. Mulching: Materials, advantages and crop production. Protected Cultivation and Smart Agriculture: Maitra, S., Gaikwad, D.J., Tanmoy, S., (Eds.). New Delhi: New Delhi Publishers. 2020. P. 55–66. <https://doi.org/10.30954/NDP-PCSA.2020.6>

25. Chalker-Scott L. Impact of mulches on landscape plants and the environment—a review. *J. Environ. Hortic.* 2007. **25** (4). P. 239–249. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-25.4.239>
26. Magee J.B., Spiers J.M. Influence of mulching systems on yield and quality of southern highbush blueberries. *J. Small Fruit & Viticult.* 1996. **3** (2–3). P. 133–141. https://doi.org/10.1300/J065v03n02_14
27. Lamont Jr. W.J. Plastic mulches for the production of vegetable crops. In *A guide to the manufacture, performance, and potential of plastics in agriculture*. Elsevier, 2017. P. 45–60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00003-8>
28. Kumar M.V., Sheela A.M. Effect of plastic film mulching on the distribution of plastic residues in agricultural fields. *Chemosphere*. 2020. 273. P. 128590. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128590>
29. Altieri D.M., Lovato D.P., Lana M.M., Bittencourt M.H. Testing and scaling-up agroecologically based organic conservation tillage systems for family farmers in southern Brazil. In *16th IFOAM Organic World Congress (2019, January)*. Modena: 2019. <https://orgprints.org/12338/>
30. Vincent-Caboud L., Casagrande M., David C., Ryan M.R., Silva E.M., Peigne J. Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 2019. **39** (45). P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0590-2>
31. Hiltbrunner J., Streit B., Liedgens M. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crop Res.* 2007. **102** (3). P. 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.009>
32. Peigné J., Lefèvre V., Vian J.F., Fleury P. Conservation agriculture in organic farming: experiences, challenges and opportunities in Europe. Farooq, M., Siddique, K. (Eds.). *Conserv. Agric.*, 2015. P. 559–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_21
33. Mischler R.A., Curran W.S., Duiker S.W., Hyde J.A. Use of a rolled-rye cover crop for weed suppression in no-till soybeans. *Weed Technol.* (2010). **24** (3). P. 253–261. <https://doi.org/10.1617/WT-D-09-00004.1>
34. Mirsky S.B., Ryan M.R., Curran W.S., Teasdale J.R., Maul J., Spargo J.T., Camargo G.G. Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. *Renew. Agric. and Food Syst.* 2012. **27** (1). P. 31–40. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000457>
35. Abouziena H.F., Radwan S.M. Allelopathic effects of sawdust, rice straw, bur-clover weed and cogongrass on weed control and development of onion. *Int. J. of ChemTech Res.* 2015. **7** (01). P. 337–345
36. Bhaskar V., Westbrook A.S., Bellinder R.R., DiTommaso A. Integrated management of living mulches for weed control: A review. *Weed Technol.* 2021. **35** (5). P. 856–868. <https://doi.org/10.1017/wet.2021.52>
37. Heisey R.M. Allelopathic and herbicidal effects of extracts from tree of heaven (*Ailanthus altissima*). *Am. J. Bot.* 1990. **77** (5). P. 662–670. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1990.tb14451.x>
38. Appleton B.L., Berrier R., Harris R., Alleman D., Swanson L. The walnut tree: allelopathic effects and tolerant plants. Virginia Cooperative Extension. 2020. Retrieved from: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/51323/VCE430_021_2000.pdf
39. Barbosa L.C.A., Demuner A.J., Clemente A.D., Paula V.F.D., Ismail F. Seasonal variation in the composition of volatile oils from *Schinus terebinthifolius* raddi. *Quim. Nova*. 2007. **30**. P. 1959–1965. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000800030>
40. Uyun Q., Respatie D.W., Indradewa D. Unveiling the allelopathic potential of wedelia leaf extract as a bioherbicide against purple nutsedge: a promising strategy for sustainable weed management. *Sustainability*. 2024. **16** (2). P. 479. <https://doi.org/10.3390/su16020479>
41. Schulz M., Marocco A., Tabaglio V., Macias F.A., Molinillo J.M. Benzoxazinoids in rye allelopathy—from discovery to application in sustainable weed control and organic farming. *J. Chem. Ecol.* 2013. **39**. P. 154–174. <https://doi.org/10.1007/s10886-013-0235-x>
42. Barnes J.P., Putnam A.R. Role of benzoxazinones in allelopathy by rye (*Secale cereale* L.). *J. of Chem. Ecol.* 1987. **13** (4). P. 889–906. <https://doi.org/10.1007/BF01020168>
43. Burgos N.R., Talbert R.E. Differential activity of allelochemicals from *Secale cereale* in seedling bioassays. *Weed Sci.* 2000. **48** (3). P. 302–310. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2000\)048\[0302:DAOAFS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2000)048[0302:DAOAFS]2.0.CO;2)

44. Zhang Q., Li J., Chen H., Xuan X., Xu D., Wen Y. Mechanisms underlying allelopathic disturbance of herbicide imazethapyr on wheat and Its neighboring ryegrass (*Lolium perenne*). *J. Agric. and Food Chem.* 2024. **72** (7). P. 3445–3455. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c09519>
45. Pytlarz E., Gala-Czekaj D. Seed meals from allelopathic crops as a potential bio-based herbicide on herbicide-susceptible and —resistant biotypes of wild oat (*Avena fatua* L.). *Agron.* 2022. **12** (12). P. 3083. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123083>
46. Madadi E., Fallah S., Sadeghpour A., Barani-Beiranvand H. Exploring the use of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) bioactive compounds to control flaxweed (*Descurainia sophia* L.) in bread wheat (*Triticum aestivum* L.): Implication for reducing chemical herbicide pollution. *Saudi J. Biol. Sci.* 2022. **29** (11). P. 103421. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103421>
47. Yu H.L., Ci T.I.A.N., Shen R.Y., Zhao H., Juan Y.A.N.G., Dong J.G., Zhang L.H. Herbicidal activity and biochemical characteristics of the botanical drupacine against *Amaranthus retroflexus* L. *J. Integ. Agric.* 2023. **22** (5). P. 1434–1444.
48. Abdellatif B., El Houssine B., Atman A., Mohammed Y., Laila N., Saadia B. Reduced Corum herbicide dose with allelopathic crop water extract for weed control in faba bean. *J. of Plant Prot. Res.* 2023. **63** (2). P. 219–232. <https://doi.org/10.24425/jppr.2023.145756>
49. Thang P.T., Vien N.V., Anh L.H., Xuan T.D., Duong V.X., Nhung N.T., Trung K.H., Quan N.T., Nguyen C.C., Loan L.T.K., Khanh T.D., Ha T.T.T. Assessment of allelopathic activity of *Arachis pintoi* Krapov. & WC Greg as a potential source of natural herbicide for paddy rice. *Appl. Sci.* 2023. **13** (14). 8268. <https://doi.org/10.3390/app13148268>
50. Hada Z., Jenfaoui H., Khammassi M., Matmati A., Souissi T. Allelopathic effect of barley (*Hordeum vulgare*) and rapeseed (*Brassica napus*) crops on early growth of acetolactate synthase (ALS)-resistant *Glebionis coronaria*. *Tunisian J. of Plant Protect.* 2022. **17** (2). P. 55–66. <https://doi.org/10.52543/tjpp.17.2.2>
51. Lemerle D., Verbenk B., Cousens R.G., Coombes N.E. The potential for selecting wheat varieties strongly competitive against weeds. *Weed Res.* 2006. **36** (6). P. 505–513. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1996.tb01679.x>
52. Bernoldson N.-O. Breeding spring wheat for improved allelopathic potential. *Weed Res.* 2010. **50** (1). P. 49–57. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2009.00754.x>
53. Tang J., Xie J., Chen X., Yu L.Q. Can rice genetic diversity reduce *Echinochloa crus-galli* infestation? *Weed Res.* 2009. **49** (1). P. 47–54. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00650.x>
54. Seal A.N., Pratley J.E. The specificity of allelopathy in rice (*Oryza sativa*). *Weed Res.* 2010. **50** (4). P. 303–311. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00783.x>
55. Machleb J., Peteinatos G.G., Kollenda B.L., Andújar D., Gerhards R. Sensor-based mechanical weed control: Present state and prospects. *Comput. Electron. Agric.* 2020. 176. 105638. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105638>
56. Zawada M., Legutko S., Gościańska-Łowińska J., Szymczyk S., Nijak M., Wojciechowski J., Zwierzyński M. Mechanical weed control systems: methods and effectiveness. *Sustainability.* 2023. **15** (21). 15206. <https://doi.org/10.3390/su152115206>
57. Van Der Weide R.Y., Bleeker P.O., Achten V.T.J.M., Lotz L.A.P., Fogelberg F., Melander B. Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Res.* 2008. **48** (3). P. 215–224. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00629.x>
58. Christenssen S., Sogaard H.T., Kudsk P., Norremark M., Lund I., Nadimi E.S., Jorgensen R. Site-specific weed control technologies. *Weed Res.* 2009. **49** (3). P. 233–241. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2009.00696.x>
59. Peerzada A.M., Chauhan B.S. Thermal weed control: history, mechanisms, and impacts. In non-chemical weed control. Academic Press. 2018. P. 9–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809881-3.00002-4>
60. Norsworthy J.K., Green J.K., Barber T., Roberts T.L., Walsh M.J. Seed destruction of weeds in southern US crops using heat and narrow-windrow burning. *Weed Technol.* 2020. **34** (4). P. 589–596. <https://doi.org/10.1017/wet.2020.36>
61. Spoth M., Haring S., Everman W., Reberg-Horton C., Greene W., Flessner M. Narrow-windrow burning to control seeds of Italian ryegrass (*Lolium perenne* ssp. *multiflorum*) in wheat and Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in soybean. *Weed Technol.* 2022. **36** (5). P. 716–722. <https://doi.org/10.1017/wet.2022.70>

62. DiTomaso J.M., Brooks M.L., Allen E.B., Minnich R., Rice P.M., Kyser G.B. Control of invasive weeds with prescribed burning. *Weed Technol.* 2006. **20** (2). P. 535–548. <https://doi.org/10.1614/WT-05-086R1.1>
63. Rask A.M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Res.* 2007. **47** (5). P. 370–380. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x>
64. Kristoffersen P., Rask A.M., Larsen S.U. Non-chemical weed control on traffic islands: a comparison of the efficacy of five weed control techniques. *Weed Res.* 2008. **48** (2). P. 124–130. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00612.x>
65. Morselli N., Puglia M., Pedrazzi S., Muscio A., Tartarini P., Allesina G. Energy, environmental and feasibility evaluation of tractor-mounted biomass gasifier for flame weeding. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2022. 50. 101823. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101823>
66. Jäderlund A., Norberg G., Zackrisson O., Dahlberg A., Teketay D., Dolling A., Nilsson M.C. Control of bilberry vegetation by steam treatment—effects on seeded Scots pine and associated mycorrhizal fungi. *For. Ecol. Manag.* 1998. 108 (3). P. 275–285. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00232-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00232-1)
67. Norberg G., Dolling A. Steam treatment as a vegetation management method on a grass-dominated clearcut. *For. Ecol. Manag.* 2003. 174 (1-3). P. 213–219. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00022-1)
68. Barberi P., Moonen A.C., Peruzzi A., Fontanelli M., Raffaelli M. Weed suppression by soil steaming in combination with activating compounds. *Weed Res.* 2009. 49 (1). P. 55–66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00653.x>
69. Peruzzi A., Raffaelli M., Frascioni C., Fontanelli M., Barberi P. Influence of an injection system on the effect of activated soil steaming on *Brassica juncea* and the natural weed seedbank. *Weed Res.* 2012. 52 (2). P. 140–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00901.x>
70. Vidotto F., De Palo F., Ferrero A. Effect of short-duration high temperatures on weed seed germination. *Ann. Appl. Biol.* 2013. 163 (3). P. 454–465. <https://doi.org/10.1111/aab.12070>
71. Roux-Michollet D., Czarnes S., Adam B., Berry D., Commeaux C., Guillaumaud N., Le Roux X., Clays-Josserand A. Effects of steam disinfection on community structure, abundance and activity of heterotrophic, denitrifying and nitrifying bacteria in an organic farming soil. *Soil Biol. Biochem.* 2008. 40 (7). P. 1836–1845. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.007>
72. Elsgaard L., Jørgensen M.H., Elmholt S. Effects of band-steaming on microbial activity and abundance in organic farming soil. *Agric. Ecosys. Environ.* 2010. **137** (3–4). P. 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.007>
73. Melander B., Kristensen J.K. Soil steaming effects on weed seedling emergence under the influence of soil type, soil moisture, soil structure and heat duration. *Ann. Appl. Biol.* 2011. **158** (2). P. 194–203. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00453.x>
74. Ark P.A., Parry W. Application of high-frequency electrostatic fields in agriculture. *Q. Rev. Biol.* 1940. **15** (2). P. 172–191.
75. Barker A.V., Craker L.E. Inhibition of weed seed germination by microwaves. *Agron. J.* 1991. **83** (2). P. 302–305. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300020008x>
76. Davis F.S., Wayland J.R., Merkle M.G. Ultrahigh-frequency electromagnetic fields for weed control: phytotoxicity and selectivity. *Sci.* 1971. **173** (3996). P. 535–537. <https://doi.org/10.1126/science.173.3996.535>
77. Rana A., Derr J.F. Responses of ten weed species to microwave radiation exposure as affected by plant size. *J. Environ. Hort.* 2018. **36** (1). P. 14–20. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-36.1.14>
78. Diprose M.F., Benson F.A., Willis A.J. The effect of externally applied electrostatic fields, microwave radiation and electric currents on plants and other organisms, with special reference to weed control. *Bot. Rev.* 1984. 50. P. 171–223. <https://doi.org/10.1007/BF02861092>
79. Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard, F. Physical control methods in plant protection. *Springer Science & Business Media*, 2001.
80. Slaven M.J., Koch M., Borger C.P. Exploring the potential of electric weed control: A review. *Weed Sci.* 2023. **71** (5). P. 1–49. <https://doi.org/10.1017/wsc.2023.38>

81. Burgos-Artizzu X.P., Ribeiro A., Guijarro M., Pajares G. Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields. *Comput. Electron. Agric.* 2011. **75** (2). P. 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.011>
82. Mathiassen S.K., Bak T., Christensen S., Kudsk P. The effect of laser treatment as a weed control method. *Biosyst. Eng.* 2006. **95** (4). P. 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.010>
83. Wöltjen C., Haferkamp H., Rath T., Herzog D. Plant growth depression by selective irradiation of the meristem with CO₂ and diode lasers. *Biosyst. Eng.* 2008. **101** (3). P. 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.08.006>
84. Coleman G., Betters C., Squires C., Leon-Saval S., Walsh M. Low energy laser treatments control annual ryegrass (*Lolium rigidum*). *Front. Agron.* 2021. 2. 601542. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.601542>
85. Andreasen C., Scholle K., Saberi M. Laser weeding with small autonomous vehicles: Friends or foes? *Front. Agron.* 2022. 4. 841086. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.841086>
86. Heisel T., Schou J., Christensen S., Andreasen C. Cutting weeds with a CO₂ laser. *Weed Res.* 2001. **41** (1). P. 19–29. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00212.x>
87. Kaierle S., Marx C., Rath T., Hustedt M. Find and irradiate—users used for weed control: chemical free elimination of unwanted plants. *Laser Techn. J.* 2013. **10** (3). P. 44–47. <https://doi.org/10.1002/latj.201390038>
88. Marx C., Barcikowski S., Hustedt M., Haferkamp H., Rath T. Design and application of a weed damage model for laser-based weed control. *Biosyst. Eng.* 2012. **113** (2). P. 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.07.002>
89. Wang A., Zhang W., Wei X. A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques. *Comput. Electron. Agric.* 2019. 158. P. 226–240. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.005>
90. Fennimore S.A., Slaughter D.C., Siemens M.C., Leon R.G., Saber M.N. Technology for automation of weed control in specialty crops. *Weed Technol.* 2016. **30** (4). P. 823–837. <https://doi.org/10.1614/WR-D-16-00070.1>
91. Fatima H.S., ul Hassan I., Hasan S., Khurram M., Stricker D., Afzal M.Z. Formation of a lightweight, deep learning-based weed detection system for a commercial autonomous laser weeding robot. *Appl. Sci.* 2023. **13** (6). 3997. <https://doi.org/10.3390/app13063997>
92. Reddy N.V., Reddy A.V.V.V., Pranavadithya S., Kumar J.J. A critical review on agricultural robots. *Int. J. Mech. Eng. Technol.* 2016. **7** (4). P. 183–188.
93. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosyst. Eng.* 2017. 153. P. 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004>
94. Slaughter D. C., Giles D., Downey D. Autonomous robotic weed control systems: A review. *Comp. Electron. Agric.* 2008. **61** (1). P. 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.008>
95. Hiremath S.A., Van Der Heijden G.W., Van Evert F.K., Stein A., Ter Braak C.J. Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter. *Comput. Electron. Agric.* 2014. 100. P. 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.005>
96. Lammie C., Olsen A., Carrick T., Azghadi M.R. Low-Power and High-Speed Deep FPGA Inference Engines for Weed Classification at the Edge. *IEEE Access.* 2019. 7. P. 51171–51184.
97. Mirbod O., Choi D., Thomas R., He L. Overcurrent-driven LEDs for consistent image colour and brightness in agricultural machine vision applications. *Comput. Electron. Agric.* 2021. 187. P. 106266. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106266>
98. Nehme H., Aubry C., Solatges T., Savatier X., Rossi R., Boutteau R. Lidar-based structure tracking for agricultural robots: Application to autonomous navigation in vineyards. *J. Intell. Robot. Syst.* 2021. **103** (4). P. 61. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01519-7>
99. Xie D., Chen L., Liu L., Chen L., Wang H. Actuators and sensors for application in agricultural robots: A review. *Machines.* 2022. **10** (10). P. 913. <https://doi.org/10.3390/machines10100913>
100. Blasco J., Aleixos N., Roger J.M., Rabatel G., Moltó E. AE—Automation and emerging technologies: Robotic weed control using machine vision. *Biosyst. Eng.* 2002. **83** (2). P. 149–157. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0109>

101. Raja R., Nguyen T.T., Slaughter D.C., Fennimore S.A. Real-time weed-crop classification and localisation technique for robotic weed control in lettuce. *Biosyst. Eng.* 2020. 192. P. 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.002>
102. Bawden O., Kulk J., Russell R., McCool C., English A., Dayoub F., Lehnert C., Perez T. Robot for weed species plant-specific management. *J. Field Robot.* 2017. **34** (6). P. 1179–1199. <https://doi.org/10.1002/rob.21727>
103. Sugimoto M., Inoki Y., Shirakawa T., Takeuchi K., Yamaji T., Endo M., Manabu I., Shiro K., Kazunori H., Sori H. A Study for Development of Autonomous Paddy-weeding Robot System — An experimentation for autonomously workspace-cognition and counter-rotation turn. In *Proceedings of The Fourth International Conference on Electronics and Software Science: Japan*. 2018. P. 115–124.
104. Champ J., Mora-Fallas A., Goeau H., Mata-Montero E., Bonnet P., Joly A. Instance segmentation for the fine detection of crop and weed plants by precision agricultural robots. *Appl. Plant Sci.* 2020. **8** (7). e11373. <https://doi.org/10.1002/aps3.11373>
105. Mary M.F., Yogaraman D. Neural network based weeding robot for crop and weed discrimination. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. 1979 (1). 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1979/1/012027>
106. Li Y., Guo Z., Shuang F., Zhang M., Li X. Key technologies of machine vision for weeding robots: A review and benchmark. *Comput. Electron. Agric.* 2022. 196. 106880. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n1.85955>
107. Quan L., Jiang W., Li H., Li H., Wang Q., Chen L. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode. *Biosyst. Eng.* 2022. 216. P. 13–31. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.019>
108. Simon S., Jacob P. M. Weed Plant Identification and Removal Using Machine Vision and Robotics. In *2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (Sakhir, 2022, February)*. Sakhir, 2022. P. 575–579. <https://doi.org/10.1109/ICDABI56818.2022.10041569>
109. McAllister W., Whitman J., Axelrod A., Varghese J., Chowdhary G., Davis A. Agbots 2.0: Weeding Denser Fields with Fewer Robots. *Robotics: Sci. Syst.* 2020. 5. P. 1–9
110. Мордерер Є.Ю. Фізіологічні основи використання фізичних способів боротьби з бур'янами: дис. канд. біол. наук. Інститут фізіології рослин і генетики НАН України. Київ. 1990
111. Мордерер Є.Ю., Гродзінський Д.М. Перекисне окиснення ліпідів і регуляція стану органічного спокою насіння. *Український Бот. Ж.* 1988. **45** (6). С. 84–90
112. Coleman G.R., Stead A., Rigter M.P., Xu Z., Johnson D., Brooker G.M., Sukkarieh S., Walsh M.J. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control. *Weed Technol.* 2019. **33** (4). P. 633–650. <https://doi.org/10.1017/wet.2019.32>
113. Gerhards R., Risser P., Spaeth M., Saile M., Peteinatos G. A comparison of seven innovative robotic weeding systems and reference herbicide strategies in sugar beet (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* L.) and rapeseed (*Brassica napus* L.). *Weed Res.* 2024. **64** (1). P. 42–53. <https://doi.org/10.1111/wre.12603>

Отримано 23.09.2024

REFERENCES

1. Kraehmer, H., Laber, B., Rosinger, C. & Schulz, A. (2014). Herbicides as weed control agents: state of the art: I. Weed control research and safener technology: the path to modern agriculture. *Plant Physiol.*, 166 (3), pp. 1119-1131. <https://doi.org/10.1104/pp.114.241901>
2. Kraehmer, H., van Almsick, A., Beffa, R., Dietrich, H., Eckes, P., Hacker, E., Hain, R., Strek, H.J., Stuebler, H. & Willms, L. (2014). Herbicides as weed control agents: state of the art: II. Recent achievements. *Plant Physiol.*, 166 (3), pp. 1132-1148. <https://doi.org/10.1104/pp.114.241992>
3. Heap, I. (2024). The International Herbicide-Resistant Weed Database. September 2, 2024. Retrieved from: www.weedscience.org
4. Riar, D.S., Norsworthy, J.K., Steckel, L.E., Stephenson, D.O. & Bond, J.A. (2013). Consultant perspectives on weed management needs in midsouthern United States cot-

- ton: a follow-up survey. *Weed Technol.*, 27 (4), pp. 778-787. <https://doi.org/10.1614/WT-D-13-00070.1>
5. Hurley, T.M. & Frisvold, G. (2016). Economic Barriers to Herbicide-Resistance Management. *Weed Sci.*, 64 (S1), pp. 585-594. <https://doi.org/10.1614/WS-D-15-00046.1>
6. Livingston, M., Fernandez-Cornejo, J. & Frisvold, G.B. (2016). Economic returns to herbicide resistance management in the short and long run: the role of neighbor effects. *Weed Sci.*, 64 (S1), pp. 595-608. <https://doi.org/10.1614/WS-D-15-00047.1>
7. Morderer, Y.Y. (2023). What is missing to create new herbicides and solving the problem of resistance? *Fiziol. Rast. i Genetika*, 55 (5), pp. 371-394. <https://doi.org/10.15407/frg2023.05.371>
8. Hatcher, P.E. & Melander, B. (2003). Combining physical, cultural and biological methods: prospects for integrated non-chemical weed management strategies. *Weed Res.*, 43 (5), pp. 303-322. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00352.x>
9. Harker, K. & O'Donovan, J. (2013). Recent weed control, weed management, and integrated weed management. *Weed Technol.*, 27 (1), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1614/WT-D-12-00109.1>
10. Westwood, J.H., Charudattan, R., Duke, S.O., Fennimore, S.A., Marrone, P., Slaughter, D.C., Swanton, C. & Zollinger, R. (2018). Weed Management in 2050: Perspectives on the future of weed science. *Weed Sci.*, 66 (3), pp. 275-285. <https://doi.org/10.1017/wsc.2017.78>
11. Duke, S.O., Powles, S.B. & Sammons, R.D. (2018). Glyphosate — how it became a once in a hundred year herbicide and its future. *Outlooks on Pest Manag.*, 29 (6), pp. 247-251. https://doi.org/10.1564/v29_dec_03
12. Perotti, V.E., Larran, A.S., Palmieri, V.E., Martinatto, A.K. & Permingeat, H.R. (2020). Herbicide resistant weeds: a call to integrate conventional agricultural practices, molecular biology knowledge and new technologies. *Plant Sci.*, 290, 110255. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110255>
13. Moore, L., Jennings, K., Monks, D., Boyette, M., Leon, R., Jordan, D., Ippolito S., Blankenship, C. & Chang, P. (2023). Evaluation of electrical and mechanical Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) management in cucumber, peanut, and sweetpotato. *Weed Technol.*, 37 (1), pp. 53-59. <https://doi.org/10.1017/wet.2023.1>
14. Tichich, R.P. & Doll, J.D. (2006). Field-based evaluation of a novel approach for infecting Canada thistle (*Cirsium arvense*) with *Pseudomonas syringae* pv. *tagetis*. *Weed Sci.*, 54 (1), pp. 166-171. <https://doi.org/10.1614/WS-03-144R3.1>
15. Leth, V., Netland, J. & Andreasen, C. (2008). *Phomopsis cirsii*: a potential biocontrol agent of *Cirsium arvense*. *Weed Res.*, 48 (6), pp. 533-541. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00666.x>
16. Gu, Q., Chu, S., Huang, Q., Chen, A., Li, L. & Li, R. (2023). *Colletotrichum echinocloae*: A Potential Bioherbicide Agent for Control of Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.). *Plants*, 12 (3), p. 421. <https://doi.org/10.3390/plants12030421>
17. Gressel, J. (2010). Herbicides as Synergists for Mycoherbicides, and Vice Versa. *Weed Sci.*, 58 (3), pp. 324-328. doi:10.1614/WS-09-071.1
18. Hallett, S.G. (2005). Where are the bioherbicides? *Weed Sci.*, 53 (3), pp. 404-415. <https://doi.org/10.1614/WS-04-157R2>
19. Wu, W. & Mesgaran, M.B. (2024). Exploring sterile pollen technique as a novel tool for management of Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*). *Weed Sci.*, 72 (3), pp. 234–240. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.7>
20. Manichart, N., Laosinwattana, C., Somala, N., Teerarak, M. & Chotsaeng, N. (2023). Physiological mechanism of action and partial separation of herbicide—active compounds from the *Diaporthe* sp. extract on *Amaranthus tricolor* L. *Sci. Rep.*, 13 (1), 18693. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46201-0>
21. Duke, S.O. (2024). Why are there no widely successful microbial bioherbicides for weed management in crops? *Pest Manag. Sci.*, 80 (1), pp. 56-64. <https://doi.org/10.1002/ps.7595>
22. Dayan, F.E. & Duke, S.O. (2014). Natural compounds as next-generation herbicides. *Plant Physiol.*, 166 (3), pp. 1090-1105. <https://doi.org/10.1104/pp.114.239061>
23. Duke, S.O., Pan, Z., Bajsa-Hirschel, J. & Boyette, C.D. (2022). The potential future roles of natural compounds and microbial bioherbicides in weed management in crops.

- Adv. Weed Sci., 40 (SP1), e020210054. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five003>
24. Peera, P.G.S.K., Debnath, S. & Maitra, S. (2020). Mulching: Materials, advantages and crop production. Protected Cultivation and Smart Agriculture; Maitra, S., Gaikwad, D.J., Tanmoy, S., Eds. New Delhi: New Delhi Publishers. <https://doi.org/10.30954/NDP-PCSA.2020.6>
 25. Chalker-Scott, L. (2007). Impact of mulches on landscape plants and the environment—a review. J. Environ. Hortic., 25 (4), pp. 239-249. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-25.4.239>
 26. Magee, J.B. & Spiers, J.M. (1996). Influence of mulching systems on yield and quality of southern highbush blueberries. J. Small Fruit & Viticult., 3 (2—3), pp. 133-141. https://doi.org/10.1300/J065v03n02_14
 27. Lamont, Jr. W.J. (2017). Plastic mulches for the production of vegetable crops. In A guide to the manufacture, performance, and potential of plastics in agriculture. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00003-8>
 28. Kumar, M.V. & Sheela, A.M. (2020). Effect of plastic film mulching on the distribution of plastic residues in agricultural fields. Chemosphere, 273, 128590-128590. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128590>
 29. Altieri, D.M., Lovato, D.P., Lana, M.M. & Bittencourt, M.H. (2019, January). Testing and scaling-up agroecologically based organic conservation tillage systems for family farmers in southern Brazil. In 16th IFOAM Organic World Congress. <http://orgprints.org/12338/>.
 30. Vincent-Caboud, L., Casagrande, M., David, C., Ryan, M.R., Silva, E.M. & Peigne, J. (2019). Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review. Agron. for sustain. Dev., 39 (45), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0590-2>
 31. Hiltbrunner, J., Streit, B. & Liedgens, M. (2007). Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? Field Crop Res., 102 (3), pp. 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.009>
 32. Peigné, J., Lefevre, V., Vian, J.F. & Fleury, P. (2015). Conservation agriculture in organic farming: experiences, challenges and opportunities in Europe. Conserv. Agric., pp. 559-578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_21
 33. Mischler, R.A., Curran, W.S., Duiker, S.W. & Hyde, J.A. (2010). Use of a rolled-rye cover crop for weed suppression in no-till soybeans. Weed Technol., 24 (3), pp. 253-261. <https://doi.org/10.1617/WT-D-09-00004.1>
 34. Mirsky, S.B., Ryan, M.R., Curran, W.S., Teasdale, J.R., Maul, J., Spargo, J.T. & Camargo, G.G. (2012). Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. Agric. and Food Syst., 27 (1), pp. 31-40. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000457>
 35. Abouziena, H.F. & Radwan, S.M. (2015). Allelopathic effects of sawdust, rice straw, bur-clover weed and cogongrass on weed control and development of onion. Int. J. ChemTech Res., 7 (01), pp. 337-345
 36. Bhaskar, V., Westbrook, A.S., Bellinder, R.R. & DiTommaso, A. (2021). Integrated management of living mulches for weed control: A review. Weed Technol., 35 (5), pp. 856-868. <https://doi.org/10.1017/wet.2021.52>
 37. Heisey, R.M. (1990). Allelopathic and herbicidal effects of extracts from tree of heaven (Ailanthus altissima). Am. J. Bot., 77 (5), pp. 662-670. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1990.tb14451.x>
 38. Appleton, B.L., Berrier, R., Harris, R., Alleman, D. & Swanson, L. (2000). The walnut tree: allelopathic effects and tolerant plants. Retrieved from: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/51323/VCE430_021_2000.pdf
 39. Barbosa, L.C.A., Demuner, A.J., Clemente, A.D., Paula, V.F.D. & Ismail, F. (2007). Seasonal variation in the composition of volatile oils from Schinus terebinthifolius Raddi. Quím. Nova, 30, pp. 1959-1965. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000800030>
 40. Uyun, Q., Respatie, D.W. & Indradewa, D. (2024). Unveiling the allelopathic potential of wedelia leaf extract as a bioherbicide against purple nutsedge: a promising strategy for sustainable weed management. Sustainability, 16 (2), p. 479. <https://doi.org/10.3390/su16020479>
 41. Schulz, M., Marocco, A., Tabaglio, V., Macias, F.A. & Molinillo, J.M. (2013). Benzoxazinoids in rye allelopathy—from discovery to application in sustainable weed con-

- trol and organic farming. *J. Chem. Ecol.*, 39, pp. 154-174. <https://doi.org/10.1007/s10886-013-0235-x>
42. Barnes, J.P. & Putnam, A.R. (1987). Role of benzoxazinones in allelopathy by rye (*Secale cereale* L.). *J. Chem. Ecol.*, 13 (4), pp. 889-906. <https://doi.org/10.1007/BF01020168>
43. Burgos, N.R. & Talbert, R.E. (2000). Differential activity of allelochemicals from *Secale cereale* in seedling bioassays. *Weed Sci.*, 48 (3), pp. 302-310. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2000\)048\[0302:DAOAFS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2000)048[0302:DAOAFS]2.0.CO;2)
44. Zhang, Q., Li, J., Chen, H., Xuan, X., Xu, D. & Wen, Y. (2024). Mechanisms underlying allelopathic disturbance of herbicide imazethapyr on wheat and Its neighboring rye-grass (*Lolium perenne*). *J. Agric. Food Chem.*, 72 (7), pp. 3445-3455. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c09519>
45. 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>
46. Madadi, E., Fallah, S., Sadeghpour, A. & Barani-Beiranvand, H. (2022). Exploring the use of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) bioactive compounds to control flaxweed (*Descurainia sophia* L.) in bread wheat (*Triticum aestivum* L.): Implication for reducing chemical herbicide pollution. *Saudi J. Biol. Sci.*, 29 (11), 103421. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103421>
47. Yu, H.L., Ci, T. I. A. N., Shen, R. Y., Zhao, H., Juan, Y. A. N. G., Dong, J. G. & Zhang, L. H. (2023). Herbicidal activity and biochemical characteristics of the botanical drupacine against *Amaranthus retroflexus* L. *J. Integ. Agric.*, 22 (5), pp. 1434-1444.
48. Abdellatif, B., El Houssine, B., Atman, A., Mohammed, Y., Laila, N. & Saadia B. (2023). Reduced Corum herbicide dose with allelopathic crop water extract for weed control in faba bean. *J. Plant Prot. Res.*, 63 (2), pp. 219-232. <https://doi.org/10.24425/jppr.2023.145756>
49. Thang, P.T., Vien, N.V., Anh, L.H., Xuan, T.D., Duong, V.X., Nhung, N.T., Trung, K.H., Quan, N.T., Nguyen C.C., Loan, L.T.K., Khanh, T.D. & Ha, T.T.T. (2023). Assessment of allelopathic activity of *Arachis pintoi* Krapov. & WC Greg as a potential source of natural herbicide for paddy rice. *Appl. Sci.*, 13 (14), 8268. <https://doi.org/10.3390/app13148268>
50. Hada, Z., Jenfaoui, H., Khammassi, M., Matmati, A. & Souissi, T. (2022). Allelopathic effect of barley (*Hordeum vulgare*) and rapeseed (*Brassica napus*) crops on early growth of acetolactate synthase (ALS)-resistant *Glebionis coronaria*. *Tunisian J. Plant Prot.*, 17 (2), pp. 55-66. <https://doi.org/10.52543/tjpp.17.2.2>
51. Lemerle, D., Verbenk, B., Cousens R.G. & Coombes N.E. (2006). The potential for selecting wheat varieties strongly competitive against weeds. *Weed Res.*, 36 (6), pp. 505-513. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1996.tb01679.x>
52. Bernoldson, N-O. (2010). Breeding spring wheat for improved allelopathic potential. *Weed Res.*, 50 (1), pp. 49-57. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2009.00754.x>
53. Tang, J., Xie, J., Chen, X. & Yu, L.Q. (2009). Can rice genetic diversity reduce *Echinochloa crus-galli* infestation? *Weed Res.*, 49 (1), pp. 47-54. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00650.x>
54. Seal, A.N. & Pratley, J.E. (2010). The specificity of allelopathy in rice (*Oryza sativa*). *Weed Res.*, 50 (4), pp. 303-311. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00783.x>
55. Machleb, J., Peteinatos, G.G., Kollenda, B.L., Andújar, D. & Gerhards, R. (2020). Sensor-based mechanical weed control: Present state and prospects. *Comput. Electron. Agric.*, 176, 105638. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105638>
56. Zawada, M., Legutko, S., Gościańska-Lowińska, J., Szymczyk, S., Nijak, M., Wojciechowski, J. & Zwierzyński, M. (2023). Mechanical weed control systems: methods and effectiveness. *Sustainability*, 15 (21), 15206. <https://doi.org/10.3390/su152115206>
57. Van Der Weide, R.Y., Bleeker, P., O., Achten, V.T.J.M., Lotz, L.A.P., Fogelberg, F. & Melander, B. (2008). Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Res.*, 48 (3), pp. 215-224. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00629.x>
58. Christensen, S., Sogaard, H.T., Kudsk, P., Norremark, M., Lund, I., Nadimi, E.S. & Jorgensen, R. (2009). Site-specific weed control technologies. *Weed Res.*, 49 (3), pp. 233-241. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2009.00696.x>

59. Peerzada, A.M. & Chauhan, B.S. (2018). Thermal weed control: history, mechanisms, and impacts. In non-chemical weed control. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809881-3.00002-4>
60. Norsworthy, J.K., Green, J.K., Barber, T., Roberts, T.L. & Walsh, M.J. (2020). Seed destruction of weeds in southern US crops using heat and narrow-windrow burning. *Weed Technol.*, 34 (4), pp. 589-596. <https://doi.org/10.1017/wet.2020.36>
61. Spoth, M., Haring, S., Everman, W., Reberg-Horton, C., Greene, W. & Flessner, M. (2022). Narrow-windrow burning to control seeds of Italian ryegrass (*Lolium perenne* ssp. *multiflorum*) in wheat and Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in soybean. *Weed Technol.*, 36 (5), pp. 716-722. <https://doi.org/10.1017/wet.2022.70>
62. DiTomaso, J.M., Brooks, M.L., Allen, E.B., Minnich, R., Rice, P.M. & Kyser, G.B. (2006). Control of invasive weeds with prescribed burning. *Weed Technol.*, 20 (2), pp. 535-548. <https://doi.org/10.1614/WT-05-086R1.1>
63. Rask, A.M. & Kristoffersen, P. (2007). A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Res.*, 47 (5), pp. 370-380. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x>
64. Kristoffersen, P., Rask, A.M. & Larsen, S.U. (2008). Non-chemical weed control on traffic islands: a comparison of the efficacy of five weed control techniques. *Weed Res.*, 48 (2), pp. 124-130. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00612.x>
65. Morselli, N., Puglia, M., Pedrazzi, S., Muscio, A., Tartarini, P. & Allesina, G. (2022). Energy, environmental and feasibility evaluation of tractor-mounted biomass gasifier for flame weeding. *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 50, 101823. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101823>
66. Jäderlund, A., Norberg, G., Zackrisson, O., Dahlberg, A., Teketay, D., Dolling, A. & Nilsson, M. C. (1998). Control of bilberry vegetation by steam treatment—effects on seeded Scots pine and associated mycorrhizal fungi. *For. Ecol. Manag.*, 108 (3), pp. 275-285. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00232-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00232-1)
67. Norberg, G. & Dolling, A. (2003). Steam treatment as a vegetation management method on a grass-dominated clearcut. *For. Ecol. Manag.*, 174 (1-3), pp. 213-219. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00022-1)
68. Barberi, P., Moonen, A.C., Peruzzi, A., Fontanelli, M. & Raffaelli, M. (2009). Weed suppression by soil steaming in combination with activating compounds. *Weed Res.*, 49 (1), pp. 55-66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00653.x>
69. Peruzzi, A., Raffaelli, M., Frascioni, C., Fontanelli, M., & Barberi, P. (2012). Influence of an injection system on the effect of activated soil steaming on *Brassica juncea* and the natural weed seedbank. *Weed Res.*, 52 (2), pp. 140-152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00901.x>
70. Vidotto, F., De Palo, F. & Ferrero, A. (2013). Effect of short-duration high temperatures on weed seed germination. *Ann. Appl. Biol.*, 163 (3), pp. 454-465. <https://doi.org/10.1111/aab.12070>
71. Roux-Michollet, D., Czarnes, S., Adam, B., Berry, D., Commeaux, C., Guillaumaud, N., Le Roux, X. & Clays-Josserand, A. (2008). Effects of steam disinfection on community structure, abundance and activity of heterotrophic, denitrifying and nitrifying bacteria in an organic farming soil. *Soil Biol. Biochem.*, 40 (7), pp. 1836-1845. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.007>
72. Elsgaard, L., Jørgensen, M.H. & Elmholt, S. (2010). Effects of band-steaming on microbial activity and abundance in organic farming soil. *Agric. Ecosys. Environ.*, 137 (3-4), pp. 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.007>
73. Melander, B. & Kristensen, J.K. (2011). Soil steaming effects on weed seedling emergence under the influence of soil type, soil moisture, soil structure and heat duration. *Ann. Appl. Biol.*, 158 (2), pp. 194-203. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00453.x>
74. Ark, P.A. & Parry, W. (1940). Application of high-frequency electrostatic fields in agriculture. *Q. Rev. Biol.*, 15 (2), pp. 172-191.
75. Barker, A.V. & Craker, L.E. (1991). Inhibition of weed seed germination by microwaves. *Agron. J.*, 83 (2), pp. 302-305. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300020008x>
76. Davis, F.S., Wayland, J.R. & Merkle, M.G. (1971). Ultrahigh-frequency electromagnetic fields for weed control: phytotoxicity and selectivity. *Science*, 173 (3996), pp. 535-537. <https://doi.org/10.1126/science.173.3996.535>

77. Rana, A. & Derr, J.F. (2018). Responses of ten weed species to microwave radiation exposure as affected by plant size. *J. Environ. Hortic.*, 36 (1), pp. 14-20. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-36.1.14>
78. Diprose, M.F., Benson, F.A. & Willis, A.J. (1984). The effect of externally applied electrostatic fields, microwave radiation and electric currents on plants and other organisms, with special reference to weed control. *Bot. Rev.*, 50, pp. 171-223. <https://doi.org/10.1007/BF02861092>
79. Vincent, C., Panneton, B. & Fleurat-Lessard, F. (2001). Physical control methods in plant protection. Springer Science & Business Media
80. Slaven, M.J., Koch, M. & Borger, C.P. (2023). Exploring the potential of electric weed control: A review. *Weed Sci.*, 71 (5), pp. 1-49. <https://doi.org/10.1017/wsc.2023.38>
81. Burgos-Artizzu, X.P., Ribeiro, A., Guijarro, M. & Pajares, G. (2011). Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields. *Comput. Electron. Agric.*, 75 (2), pp. 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.011>
82. Mathiassen, S.K., Bak, T., Christensen, S. & Kudsk, P. (2006). The effect of laser treatment as a weed control method. *Biosyst. Eng.*, 95 (4), pp. 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.010>
83. Wöltjen, C., Haferkamp, H., Rath, T. & Herzog, D. (2008). Plant growth depression by selective irradiation of the meristem with CO₂ and diode lasers. *Biosyst. Eng.*, 101 (3), pp. 316-324. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.08.006>
84. Coleman, G., Betters, C., Squires, C., Leon-Saval, S. & Walsh, M. (2021). Low energy laser treatments control annual ryegrass (*Lolium rigidum*). *Front. Agron.*, 2, 601542. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.601542>
85. Andreasen, C., Scholle, K. & Saberi, M. (2022). Laser weeding with small autonomous vehicles: Friends or foes? *Front. Agron.*, 4, 841086. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.841086>
86. Heisel, T., Schou, J., Christensen, S. & Andreasen, C. (2001). Cutting weeds with a CO₂ laser. *Weed Res.*, 41 (1), pp. 19-29. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00212.x>
87. Kaierle, S., Marx, C., Rath, T. & Hustedt, M. (2013). Find and irradiate—users used for weed control: chemical free elimination of unwanted plants. *Laser Techn. J.*, 10 (3), pp. 44-47. <https://doi.org/10.1002/latj.201390038>
88. Marx, C., Barcikowski, S., Hustedt, M., Haferkamp, H. & Rath, T. (2012). Design and application of a weed damage model for laser-based weed control. *Biosys. Eng.*, 113 (2), pp. 148-157. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.07.002
89. Wang, A., Zhang, W. & Wei, X. (2019). A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques. *Comput. Electron. Agric.*, 158, pp. 226-240. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.005>
90. Fennimore, S.A., Slaughter, D.C., Siemens, M.C., Leon, R.G. & Saber, M.N. (2016). Technology for automation of weed control in specialty crops. *Weed Technol.*, 30 (4), pp. 823-837. <https://doi.org/10.1614/WR-D-16-00070.1>
91. Fatima, H.S., ul Hassan, I., Hasan, S., Khurram, M., Stricker, D. & Afzal, M.Z. (2023). Formation of a lightweight, deep learning-based weed detection system for a commercial autonomous laser weeding robot. *Appl. Sci.*, 13 (6), 3997. <https://doi.org/10.3390/app13063997>
92. Reddy, N.V., Reddy, A. V. V. V., Pranavadithya, S. & Kumar, J.J. (2016). A critical review on agricultural robots. *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 7 (4), pp. 183-188.
93. Bechar, A. & Vigneault, C. (2017). Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosys. Eng.*, 153, pp. 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004>
94. Slaughter, D.C., Giles, D.K. & Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. *Comput. Electron. Agric.*, 61 (1), pp. 63-78. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.008>
95. Hiremath, S.A., Van Der Heijden, G.W., Van Evert, F.K., Stein, A. & Ter Braak, C.J. (2014). Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter. *Comput. Electron. Agric.*, 100, pp. 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.005>
96. Lammie, C., Olsen, A., Carrick, T. & Azghadi, M.R. (2019). Low-Power and High-Speed Deep FPGA Inference Engines for Weed Classification at the Edge. *IEEE Access*, 7, pp. 51171-51184

97. Mirbod, O., Choi, D., Thomas, R. & He, L. (2021). Overcurrent-driven LEDs for consistent image colour and brightness in agricultural machine vision applications. *Comput. Electron. Agric.*, 187, 106266. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106266>
98. Nehme, H., Aubry, C., Solatges, T., Savatier, X., Rossi, R. & Boutteau, R. (2021). Lidar-based structure tracking for agricultural robots: Application to autonomous navigation in vineyards. *J. Intell. Robot. Syst.*, 103 (4), p. 61. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01519-7>
99. Xie, D., Chen, L., Liu, L., Chen, L. & Wang, H. (2022). Actuators and sensors for application in agricultural robots: A review. *Machines*, 10 (10), p. 913. <https://doi.org/10.3390/machines10100913>
100. Blasco, J., Aleixos, N., Roger, J.M., Rabatel, G. & Moltó, E. (2002). AE—Automation and emerging technologies: Robotic weed control using machine vision. *Biosyst. Eng.*, 83(2), pp. 149-157. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0109>
101. Raja, R., Nguyen, T.T., Slaughter, D.C. & Fennimore, S.A. (2020). Real-time weed-crop classification and localisation technique for robotic weed control in lettuce. *Biosyst. Eng.*, 192, pp. 257-274. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.002>
102. Bawden, O., Kulk, J., Russell, R., McCool, C., English, A., Dayoub, F., Lehnert, C. & Perez, T. (2017). Robot for weed species plant-specific management. *J. Field Robot.*, 34 (6), pp. 1179-1199. <https://doi.org/10.1002/rob.21727>
103. Sugimoto, M., Inoki, Y., Shirakawa, T., Takeuchi, K., Yamaji, T., Endo, M., Manabu, I., Shiro, K., Kazunori H. & Sori, H. (2018). A Study for Development of Autonomous Paddy-weeding Robot System — An experimentation for autonomously workspace-cognition and counter-rotation turn. In *Proceedings of The Fourth International Conference on Electronics and Software Science*, pp. 115-124.
104. Champ, J., Mora-Fallas, A., Goeau, H., Mata-Montero, E., Bonnet, P. & Joly, A. (2020). Instance segmentation for the fine detection of crop and weed plants by precision agricultural robots. *Appl. Plant Sci.*, 8 (7), e11373. <https://doi.org/10.1002/aps3.11373>
105. Mary, M.F. & Yogaraman, D. (2021). Neural network based weeding robot for crop and weed discrimination. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1979 (1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1979/1/012027>
106. Li, Y., Guo, Z., Shuang, F., Zhang, M. & Li, X. (2022). Key technologies of machine vision for weeding robots: A review and benchmark. *Comput. Electron. Agric.*, 196, 106880. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n1.85955>
107. Quan, L., Jiang, W., Li, H., Li, H., Wang, Q. & Chen, L. (2022). Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode. *Biosyst. Eng.*, 216, pp. 13-31. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.019>
108. Simon, S. & Jacob, P.M. (2022, February). Weed Plant Identification and Removal Using Machine Vision and Robotics. In *2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry*. Sakhir, Bahrain. <https://doi.org/10.1109/ICD-ABI56818.2022.10041569>
109. McAllister, W., Whitman, J., Axelrod, A., Varghese, J., Chowdhary, G. & Davis, A. (2020). Agbots 2.0: Weeding Denser Fields with Fewer Robots. *Robotics: Sci. Syst.*, 5, pp. 1-9.
110. Morderer, Ye. Yu. (1990). Physiological basis of using physical methods of weed control. Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukrainian. 1990 [in Russian]
111. Morderer, Ye. Yu. & Grodzinsky, D. M. (1988). Peroxidation of lipids and regulation of the state of organic dormancy of seeds. *Ukrainian Bot. J.*, 45, (6), pp. 84-90 [in Ukrainian].
112. Coleman, G.R., Stead, A., Rigter, M.P., Xu, Z., Johnson, D., Brooker, G.M., Sukkarieh, S. & Walsh, M.J. (2019). Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control. *Weed Technol.*, 33 (4), pp. 633-650. <https://doi.org/10.1017/wet.2019.32>
113. Gerhards, R., Risser, P., Spaeth, M., Saile, M. & Peteinatos, G. (2024). A comparison of seven innovative robotic weeding systems and reference herbicide strategies in sugar beet (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* L.) and rapeseed (*Brassica napus* L.). *Weed Res.*, 64 (1), pp. 42-53. <https://doi.org/10.1111/wre.12603>

Received 23.09.2024

DEVELOPMENT OF THE WEED CONTROL SYSTEMS

V.V. Yukhymuk

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

The development of environmentally friendly crop production technologies is limited by the need for widespread use of chemical weed control products. Therefore, since the 1980s, components of crop production technologies have been developed with reduced levels of toxic substances. Today, the use of agrotechnical solutions known since the beginning of agricultural development is limited by rising energy prices. Both chemical (films) and organic mulches are effective in fruit and vegetable production. Great efforts have been made to develop biological methods of weed control, from selective/specific for individual weed pathogens to complex multi-component systems in agrophytocenoses, where numerous interactions between plant species, between plants in different crop layers, with different absorption efficiencies of plant protection products etc., are effectively used. Modern weed control methods are increasingly based on digital technologies in agriculture. This is being facilitated by the development of IT technologies that enable the robotization of agricultural production. The use of IT technology is also helping to solve the important problem of labour shortages. Weed-killing robots navigate in space using satellite navigation systems or LiDAR scanners. Lasers or robotic arms are used as tools. Cameras are used to detect and identify crops and weeds. In addition to mechanical weeding, the effectiveness of high-voltage electrical discharge and ultra-high frequency electromagnetic radiation has been studied. All these methods have their advantages and disadvantages. In the short term, alternative methods can only replace chemical methods in certain situations and on small areas. However, this does not preclude the possibility of further improvements in these methods and their wider use in the future.

Key words: integrated weed management, mechanical weed control, IT in agriculture, biological control, sustainable agriculture.

ORCID

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