

Received: 26.03.2021 / Accepted: 20.04.2021

ARTYKUŁ ORYGINALNY

Biologiczne zwalczanie chwastów – perspektywy i ograniczenia

Biological weed control – prospects and limitations

Kinga Cholajda*, Kinga Matysiak^A, Roman Kierzek^B, Joanna Krzywińska^C

Streszczenie

Wycofywanie wielu substancji chemicznych, których zadaniem było ograniczanie występowania chorób, szkodników i chwastów, skłania środowisko naukowe do podjęcia intensywnych działań opartych na poszukiwaniu przyjaznych środowisku i nietoksycznych dla ludzi i zwierząt czynników biologicznych, które zapewniłyby zdrowotność i stabilne plonowanie roślinom uprawnym. W biologicznym zwalczaniu chwastów wykorzystuje się jednego lub więcej naturalnych wrogów (roztoczy, owadów, patogenów) na konkretny gatunek chwastu. Najważniejszym wyzwaniem w biologicznych metodach zwalczania chwastów jest zdefiniowana orientacja czynnika biologicznego na jeden gatunek (rzadziej rodzinę) chwastu. W dostępnej literaturze naukowej, coraz częściej spotyka się badania oceniające przydatność różnego rodzaju organizmów rodzimych lub obcych, które mogłyby być wykorzystane jako biologiczne środki zwalczające niektóre gatunki chwastów, a tym samym stanowiłyby uzupełnienie metod konwencjonalnych (głównie mechanicznych). Istotnym ograniczeniem w badaniach nad biologicznym zwalczaniem chwastów jest pracochłonność, dokładność badawcza i duża wiedza o możliwych interakcjach pomiędzy organizmami. Z tego powodu postęp w tym obszarze jest bardzo powolny i obciążony dużym ryzykiem niepowodzenia. W pracy dokonano przeglądu literatury dotyczącej możliwości zwalczania rodzimych gatunków chwastów metodami biologicznymi.

Słowa kluczowe: metoda biologiczna klasyczna, bioherbicydy, mykoherbicydy, allelopatia

Abstract

The withdrawal of many chemical substances whose task was to reduce the occurrence of diseases, pests and weeds, prompts the scientific community to undertake intensive activities based on the search for biological agents that are environmentally friendly and non-toxic to humans and animals, which would ensure health and stable yield of crops. Biological weed control uses one or more natural enemies (mites, insects, pathogens) per species of weed. The most important challenge in biological methods of weed control is the defined orientation of a biological factor on one species (less often a family) of weeds. In the available scientific literature, there are more and more studies assessing the suitability of various types of native or foreign organisms that could be used as biological agents for controlling some weed species, and thus complement conventional (mainly mechanical) methods. A significant limitation in research on biological weed control is labour consumption, research accuracy and extensive knowledge of possible interactions between organisms. For this reason, progress in this area is very slow and carries a high risk of failure. The paper reviews the literature on the possibility of controlling native weeds with biological methods.

Key words: classical biological control, bioherbicides, mycoherbicides, allelopathy

Institut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy
Władysława Węgorka 20, 60-318 Poznań

*corresponding author: k.cholajda@iorpib.poznan.pl

ORCID: ^A0000-0001-8082-9342, ^B0000-0001-9373-7703, ^C0000-0002-6257-9850

Wstęp / Introduction

W niektórych regionach świata, jak na przykład w USA, Kanadzie, Chinach i Japonii z powodzeniem wdrożono już programy biologicznego zwalczania dla głównych gatunków chwastów (Schwarzländer i wsp. 2018). Biologiczna metoda zwalczania chwastów postrzegana jest jako potencjalnie skuteczna alternatywa dla stosowania syntetycznych herbicydów, aczkolwiek postęp w tym kierunku jest bardzo powolny. Na całym świecie wprowadzono do użycia ponad tysiąc biologicznych środków do zwalczania chwastów, a najwcześniejsze dowody na badania dotyczące biologicznego zwalczania chwastów pochodzą z drugiej połowy XIX wieku (Charudattan 2001). W krajach europejskich postęp w tej dziedzinie jest powolniejszy (Naylor 2002). Jednakże w niedalekiej przyszłości, także w Europie metody biologiczne prawdopodobnie staną się stałym elementem strategii zwalczania chwastów. Związane jest to głównie z tym, że od krajów członkowskich Unii Europejskiej oczekuje się wprowadzenia takich metod regulacji zachwaszczenia, które będą bezpieczne dla organizmów żywych i agrofitycenozy (Adamczewski i Dobrzański 2012).

Komisja Europejska w Europejskim Zielonym Ładzie przedstawiła strategię zrównoważonego stosowania środków ochrony roślin. Głównym celem tej strategii jest dążenie do opracowania bezpiecznych i sprawdzonych alternatyw dla stosowania chemicznych środków ochrony roślin. Zielony Ład oraz strategia „Od pola do stołu” dążą do wprowadzenia zrównoważonych praktyk rolniczych opartych na rolnictwie ekologicznym oraz rolnictwie precyzyjnym. Europejski Zielony Ład wskazuje na inwestowanie we wszystkie technologie uprawy i ochrony roślin, które będą przyjazne dla środowiska. Strategia „Od pola do stołu” zakłada, że do 2030 roku nastąpi zmniejszenie o 50% stosowania chemicznych środków ochrony roślin oraz związanych z nimi zagrożeń. Zakłada się, że w przypadku chwastów m.in. będzie można to osiągnąć poprzez szersze wykorzystanie czynników biologicznych, takich jak np. mikro- i makroorganizmy. Założenia strategii „Od pola do stołu” są jak najbardziej słuszne, ale cel niezwykle trudny do osiągnięcia (Anonymus 2020).

W XX wieku biologiczne zwalczanie chwastów cieszyło się różną popularnością, ale dziś postrzegane jest jako ważny element zintegrowanej ochrony środowiska. Powszechnie wiadomo, że walka z chwastami jest trudnym przedsięwzięciem i choć obecnie zalecana jest integracja metod, to wypracowywanie skutecznej regulacji zachwaszczenia z wykorzystaniem czynników biologicznych wciąż jest procesem czasochłonnym, wymagającym dużej wiedzy o agroekosystemach i znacznego zaangażowania badawczego (Mohan Babu i wsp. 2003; Adetunji i wsp. 2019). Niektórzy autorzy podkreślają, że badania w zakresie technologii zwalczania chwastów, oprócz badań dotyczących pozostałości herbicydów, nowatorskich metod zwalczania chwastów, badań powiązanych ze zmiano-

waniem roślin oraz uproszczeniami upraw, a także badań związanych ze środowiskiem i metodami hodowlanymi, powinny skupiać się właśnie na rozwoju biologicznych metod zwalczania (Skrzypczak i Pudełko 2003).

Biologiczne metody zwalczania chwastów zyskują na ważności także z powodu nieoczekiwanych zmian w strukturze zachwaszczenia związanych z biologią chwastów oraz pojawieniem się nowych gatunków, które wcześniej nie występowały bądź były obserwowane sporadycznie. Przykładem takich zmian jest pojawienie się coraz większej liczby gatunków chwastów odpornych na herbicydy. Odporność na herbicydy jest wynikiem ciągłego stosowania tych samych substancji czynnych lub herbicydów o podobnym lub nawet tym samym mechanizmie działania. Odporne gatunki najczęściej pojawiają się w uprawach, w których rutynowo stosuje się zabiegi herbicydowe (zboża, kukurydza) (Moss i Rubin 1993; Jasienuik i wsp. 1996; Adamczewski 2014). Poza nasilającymi się problemami z chwastami odpornymi na herbicydy, do wzrostu znaczenia biologicznego zwalczania chwastów przyczyniają się także czynniki społeczno-ekonomiczne, tj. wysokie koszty opracowania i rejestracji nowych herbicydów chemicznych, brak zarejestrowanych herbicydów w uprawach małoobszarowych, wycofywanie coraz większej liczby substancji czynnych oraz preferencje konsumentów dotyczące niechemicznych alternatyw w produkcji żywności (Charudattan 2001). Biologiczne zwalczanie chwastów jest wciąż nowatorską metodą, w której podstawową trudnością i ryzykiem jest nieprzewidywalność interakcji biologicznych (Macdonald i Wissel 1989).

Makro- i mikroorganizmy są stosowane jako czynniki kontroli biologicznej w dwóch szerokich podejściach: klasycznej metody biologicznej oraz augmentatywnej metody biologicznej zwanej jako podejście bioherbicydowe (Hallet 2005). Metoda augmentatywna, głównie z wykorzystaniem herbicydów mikrobiologicznych ma większe możliwości zastosowania w intensywnym rolnictwie (Müller-Schärer i wsp. 2000). Podejście augmentatywne jest stosunkowo bezpieczniejszym sposobem wprowadzania rodzimych naturalnych gatunków w porównaniu z wprowadzaniem egzotycznych gatunków do nowego siedliska. Zasadą tego podejścia jest okresowe zastosowanie dużych populacji naturalnych antagonistów chwastów, które znajdują już się na tym terenie (Abbas i wsp. 2017). Niedoskonałością tej metody jest jednak to, że naturalni antagoniści nie są w stanie sukcesywnie powiększać swojej populacji, dlatego przynajmniej w niektórych regionach, może być wymagana czasowa lub sezonowa ich suplementacja. Augmentatywną metodę biologiczną stosuje się często jako uzupełnienie klasycznej metody biologicznej w celu zwiększenia skuteczności zwalczania (Tisdell i wsp. 1984).

Celem pracy jest przegląd literatury dotyczącej możliwości zwalczania rodzimych chwastów metodami biologicznymi.

Metoda biologiczna klasyczna / Classical biological control

Klasyczna metoda biologiczna bazuje na tym, iż w naturalnym środowisku dla niektórych gatunków chwastów zawleczonych z innych regionów brak jest naturalnych wrogów (szkodników i patogenów). W metodzie tej naturalni, swoiści dla rośliny żywicielskiej wrogowie są zaintrygowani na teren występowania danego gatunku chwastu. Ich rolą jest redukcja populacji gatunku lub gatunków chwastów do poziomu, przy którym nie będą one stanowiły zagrożenia ekonomicznego dla rośliny uprawnej (McFadyen 1998; Schwarzländer i wsp. 2018). Metodą tą nie można zwalczyć chwastów całkowicie, a jej powodzenie uzależnione jest od współczynnika rozmnażania oraz zdolności i szybkości rozprzestrzeniania się organizmu antagonistycznego. W związku z tym, jest to stosunkowo powolny sposób zwalczania chwastów, który w bardzo dużym stopniu zależy od wzajemnych oddziaływań organizmów w całym ekosystemie.

Klasyczne zwalczanie biologiczne odnosi się do uwolnienia naturalnego drapieżnika lub patogenu roślinnego, przy założeniu że będzie on zdolny do przetrwania w konkretnym środowisku (Charudattan 2001). W klasycznej metodzie biologicznej duży nacisk kładzie się na odpowiedni dobór organizmu wrogięgo, który oprócz wysokiej swoistości musi charakteryzować się szybkim rozprzestrzenianiem (np. wiele gatunków owadów) oraz

odpowiednią zdolnością przetrwania (np. grzyby) (Müller-Schärer i wsp. 2000). Literatura podaje, że środkami biologicznymi mogą być takie organizmy żywe, jak: stawonogi (roztocza, owady), ślimaki, ptaki (np. kaczki), ryby, ssaki (bydło, kozy) (Kiewnick 2007; Bailey i wsp. 2010; Glare i wsp. 2012). Przykłady owadów, które mogą być wykorzystane do zwalczania rodzimych gatunków chwastów przedstawiono w tabeli 1. Organizmami, z którymi związane są największe nadzieje są stawonogi, a wśród nich roztocza. Te drobne pajęczaki spełniają wiele wymaganych kryteriów pożądaných u organizmów w klasycznej metodzie biologicznej m.in. są monofagami (nie żerują na roślinach uprawnych lub użytkowych), szybko się rozprzestrzeniają i łatwo odnajdują roślinę żywicielską (Charudattan 2001). Gatunkami roztoczy, które z powodzeniem wprowadzono do klasycznego zwalczania biologicznego są np. *Cecidophyes rouhollahi* i *Aceria malherbae* (Julien i Griffiths 1998; Sobhian i wsp. 2004). Jednakże, ostateczny efekt wykorzystania roztoczy w zwalczaniu biologicznym zależy od ich dużej liczebności na roślinie, co z kolei jest uzależnione od wielu czynników ekologicznych m.in. warunków klimatyczno-środowiskowych oraz nasilenia występowania ich naturalnych antagonistów (Smith i wsp. 2010). Tabela 2. prezentuje przykłady roztoczy, które mogą być wykorzystane w biologicznym zwalczaniu chwastów.

Generalnie, czynnik zwalczania biologicznego powinien posiadać kilka kluczowych cech m.in. wpływać tylko i wyłącznie na żywiciela, być wolny od drapieżników lub

Tabela 1. Przykłady owadów do zwalczania chwastów

Table 1. Examples of owadów for weed control

Gatunek chwastu Weed species	Czynnik Agents	Miejsce działania Site of action	Bibliografia Bibliography
<i>Amaranthus retroflexus</i>	<i>Disonycha glabrata</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	<i>Epiblema strenuana</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)
<i>Centaurea cyanus</i>	<i>Chaetorellia australis</i> <i>Chaetorellia succinea</i>	–	Julien i Griffiths (1998)
<i>Cirsium arvense</i>	<i>Altica carduorum</i> <i>Haltica carduorum</i> <i>Corythuca disticta</i> <i>Cassida rubiginosa</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)
<i>Cirsium vulgare</i>	<i>Rhinocyllus conicus</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)
<i>Convolvulus arvensis</i>	<i>Tyta luctuosa</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)
<i>Hypericum perforatum</i>	<i>Actinotia hyperici</i> <i>Aculus hyperici</i> <i>Agrilus hyperici</i> <i>Chrysolina hypericin</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)
<i>Phalaris</i> spp. <i>Polygonum</i> spp. <i>Ranunculus</i> spp.	<i>Aristichthys nobilis</i> <i>Ctenopharyngodon idella</i>	–	Julien i Griffiths (1998)
<i>Rumex</i> spp.	<i>Synansphecchia dorylifformis</i> <i>Chamaesphecchia dorylifformis</i>	korzeń – root	Julien i Griffiths (1998)
<i>Sonchus arvensis</i>	<i>Cystiphora sonchi</i> <i>Liriomyza sonchi</i> <i>Tephritis dilacerate</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)

Tabela 2. Przykłady roztoczy do zwalczania chwastów
Table 2. Examples of mites for weed control

Gatunek chwastu Weed species	Czynnik Agent	Miejsce działania Site of action	Bibliografia Bibliography
<i>Galium spurium</i> L.	<i>Cecidophyes rouhollahi</i>	liść – leaf	Sobhian i wsp. (2004)
<i>Convolvulus arvensis</i>	<i>Aceria malherbae</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)

Pasożytów, łatwo dostosować się do wprowadzonych warunków środowiskowych, wykazywać duże predyspozycje w poszukiwaniu swojego żywiciela oraz posiadać zdolność do rozmnażania się w takim stopniu, aby natychmiast po zaintrygowaniu, bez zbędnych opóźnień, w jak największym stopniu opanować roślinę żywicielską (Devi i wsp. 2020). Należy dodać, że raz uwolnionego organizmu nie można wycofać, tak więc wymagana jest duża ostrożność i stały monitoring celem zapewnienia bezpieczeństwa gatunków niebędących przedmiotem zwalczania (Abbas i wsp. 2017). Dodatkowo, konieczne jest m.in. szczegółowe poznanie biologii i ekologii czynników zwalczających, utrzymywanie ich na stałym poziomie w agroekosystemie oraz stale obecna niewielka liczba roślin żywicielskich, która zapewni przetrwanie naturalnego wroga (Blossey i wsp. 2018).

Klasyczna metoda biologiczna zwalczania chwastów najlepiej sprawdza się do ochrony upraw trwałych, takich jak użytki zielone i sady (Müller-Schärer i wsp. 2000). Inni badacze są zdania, że najlepszych efektów działania tej metody można spodziewać się tylko w warunkach rolnictwa ekstensywnego i do zwalczania wyłącznie chwastów wieloletnich. Gatunki jednoroczne zachwaszczające uprawy już od dawna uznawane są za słabe cele dla klasycznej metody biologicznej (Naylor 2002). Zagrożeniem dla metody klasycznej może być obniżona skuteczność czynników zwalczania biologicznego uniemożliwiająca uzyskanie satysfakcjonującego poziomu ograniczenia populacji chwastów. Czynnikami ograniczającymi są przede wszystkim czynniki środowiskowe, w tym te najistotniejsze, tj. wilgotność powietrza i temperatura. W klasycznej metodzie biologicznej kluczowym elementem jest właściwe rozpoznanie organizmów zwalczających, które powinny posiadać wysoce specyficzne cechy w odniesieniu do żywiciela (zjadliwość oraz zdolność do przeżycia). Negatywnymi aspektami klasycznej metody biologicznej są często niepowodzenia związane z nieodpowiednim wyborem obiektu zwalczanego (Briese 2000; Scheepens i wsp. 2001).

Bioherbicydy / Bioherbicides

W przeciwieństwie do klasycznego zwalczania biologicznego, w którym czynniki biologiczne stają się stałymi elementami fauny na danym obszarze, istnieje strategia alternatywna, zwana podejściem bioherbicydowym. Podejście

bioherbicydowe polega na zastosowaniu patogenu roślinnego przez odpowiednie preparaty do zwalczania chwastów docelowych (TeBeest 1996). Bioherbicydy to naturalne produkty pochodzące od organizmów żywych wykorzystywane do zwalczania chwastów bez szkodliwej ingerencji w środowisko (Bailey 2014). Zaletami stosowania bioherbicydów są przede wszystkim brak toksyczności dla ludzi i środowiska oraz wysoka selektywność względem zwalczanych gatunków chwastów. Bardzo ważny jest wybór docelowego chwastu. Bioherbicydy najskuteczniej działają na chwasty jednoroczne, samopylne, rozmnażające się generatywnie, bez zdolności do wegetatywnej regeneracji uszkodzonych organów. Znajdują szerokie zastosowanie na ograniczonych powierzchniach typu parki, ogrody, trawniki. Bioherbicydami mogą być mikroorganizmy chorobotwórcze (herbicydy mikrobiologiczne) lub grzyby chorobotwórcze (mykoherbicydy) (Naylor 2002; Stokłosa 2006).

Zbadano również szereg bakterii jako potencjalne biologiczne środki do zwalczania chwastów. Biologiczne zwalczanie chwastów przy użyciu bakterii może mieć kilka zalet w porównaniu do preparatów grzybowych, w tym wyższą podatność na transfer genów, a także względnie prostsze wymagania w odniesieniu do warunków stosowania m.in. ich działanie jest w mniejszym stopniu uzależnione od warunków klimatycznych. Spośród bakterii największe zainteresowanie wzbudziły *Pseudomonas fluorescens* oraz *Xanthomonas campestris* (Harding i Raizada 2015). Wśród preparatów mikrobiologicznych, szczególne znaczenie przypisuje się tym, które zawierają mikroorganizmy ryzosferowe. Ich główne działanie polega na hamowaniu rozwoju siewek chwastów, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia banku nasion chwastów. Stosowanie mikroorganizmów ryzosferowych jest metodą przyjazną środowisku, znacznie zmniejszającą koszty nie tylko w produkcji roślinnej, ale również w systemach wodnych i leśnictwie (Kremer i wsp. 1990; Kennedy i wsp. 1991; Bailey i wsp. 2010). W tabeli 3. zaprezentowano przykłady mikroorganizmów do zwalczania rodzimych gatunków chwastów.

Niewątpliwie największą grupę bioherbicydów stanowią preparaty oparte na wykorzystaniu grzybów (mykoherbicydy). Koncepcja wykorzystania mykoherbicydów rozwinęła się już we wczesnych latach 60. XX wieku, kiedy udowodniono, że patogen rośliny rodzimej może być efektywny poprzez aplikowanie go w odpowiednio wysokiej ilości w fazie rozwojowej chwastu, w której jest on najbardziej wrażliwy. W efekcie, następuje zainicjowanie choroby

Tabela 3. Przykłady mikroorganizmów do zwalczania chwastów**Table 3.** Examples of microorganisms for weed control

Gatunek chwastu Weed species	Pathogens Pathogens	Miejsce działania Site of action	Bibliografia Bibliography
<i>Avena fatua</i>	izolat bakteryjny RWA52 wykazujący znaczną produkcję IAA RWA52 bacterial isolate showing significant IAA production	korzeń – root	Dahiya i wsp. (2019)
<i>Bromus tectorum</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	korzeń – root	Kennedy i wsp. (1991) Kennedy i wsp. (2001)
<i>Phalaris minor</i>	izolaty – isolates <i>Rhizobacterium</i>	korzeń – root	Phour (2012)
<i>Poa annua</i> <i>Poa attenuate</i>	<i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>poae</i>	liść – leaf	Imaizumi i wsp. (1997)
<i>Setaria viridis</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	korzeń – root	Quail i wsp. (2002)

w populacji danego gatunku chwastu. Oczywiście, patogen musi być specyficzny dla żywiciela, ale także musi być genetycznie stabilny i zdolny do masowej produkcji trwałego inokulum. Pierwszym mykoherbicydem był preparat DeVine wprowadzony na rynek w 1981 roku przez Abbott Laboratories (USA). Preparat ten zawierał szczep *Phytophthora palmivora* przeznaczony do stosowania na uprawach cytrusów w celu zwalczania *Vincetoxicum rossicum*. Preparat ten był przydatny do użycia jedynie przez 6 tygodni (Naylor 2002).

Mykoherbicydy są zwykle aplikowane raz w roku lub częściej (rzadsze przypadki) wkrótce po wykiełkowaniu chwastów. Z uwagi na metodę produkcji i sposób aplikacji, mykoherbicydy są najbardziej zbliżone do typowych (chemicznych) środków ochrony roślin. Jednym z ważniejszych czynników działania mykoherbicydu jest jego odpowiednia formuacja. Chociaż w wielu krajach intensywnie prowadzone są prace badawcze nad wykorzystaniem mykoherbicydów, to badania te koncentrują się głównie na wyodrębnieniu specyficznego patogenu dla danego gatunku chwastu. Wiele badań zostaje też zakończonych właśnie na tym etapie, co stanowi poważną blokadę przed wprowadzeniem preparatu do praktyki. Kolejnym etapem powinien być dobór odpowiedniej formuacji. Wiele bioherbicydów do swojej skuteczności potrzebuje odpowiedniej ilości wody po zabiegu. Ustalono, że po aplikacji mykoherbicydów wymagane jest utrzymanie stałej wilgotności od 6 do 48 godzin. Stąd też, kluczowe znaczenie dla zachowania żywotności spor i odpowiedniej ich dystrybucji na roślinach ma formuacja. Problem jest tym większy, że dla każdego czynnika biologicznego (patogenu) potrzebna jest zwykle inna formuacja. Wiele autorów podkreśla, że formuacja bioherbicydów powinna być taka, aby preparat mógł być zastosowany z wykorzystaniem opryskiwaczy przeznaczonych do chemicznych środków ochrony roślin (Boczek 1996; Naylor 2002; Stokłosa 2006; Weaver i wsp. 2007). Strategia bioherbicydowa jest więc oparta na technologii, podczas gdy klasyczna metoda biologiczna jest metodą opartą na ekologii. Technologia ta musi jednak być szyb-

ka i niedroga. Ponadto, każdy patogen użyty jako czynnik w biologicznym zwalczaniu musi być odporny na fungicydy, a jego ekspansywność musi być bardzo dobrze poznana.

Zniszczenie całej populacji danego gatunku chwastu nigdy nie powinno być celem działania mykoherbicydu. Niektóre badania wskazują, że już subletalna infekcja na chwastach może eliminować ich zdolności konkurencyjne względem rośliny uprawnej. Utrata wigoru chwastu skutkuje mniejszą produkcją nasion o obniżonej żywotności i w ten sposób redukowany jest bank nasion w glebie (Naylor 2002). Pozwala to na zachowanie populacji chwastów jako żywicieli dla organizmów pożytecznych i zachowania bioróżnorodności. Udowodniono także, że bioherbicydy wykazują działanie synergistyczne z niskimi dawkami niektórych herbicydów. Ten synergizm może być skutecznie wykorzystany w integrowanych systemach ochrony (Evans 2013). Przykłady grzybów do zwalczania gatunków chwastów występujących w Polsce przedstawiono w tabeli 4.

Istnieje również koncepcja wykorzystania wirusów, jako składnika bioherbicydów. Jej zwolennicy zaznaczają jednak, że sprawdza się ona głównie w bardzo dużych ekosystemach. Wirusy obecnie jednak nie są rozważane w praktycznym wykorzystaniu na szeroką skalę z uwagi na dużą zmienność genetyczną i niestałą swoistość w stosunku do żywiciela (Harding i Raizada 2015).

Alleloherbicydy / Alleloherbicides

W ostatnich latach wiele doniesień naukowych poświęconych jest zagadnieniu allelopatii w zwalczaniu chwastów. Allelopatia to zjawisko występujące w biocenozie, w którym biorą udział związki biologiczne z roślin oraz mikroorganizmów, mające wpływ na wzrost i rozwój układów biologicznych (Singh i wsp. 2003; Qiming i wsp. 2006). Allelopatia to pozytywny lub negatywny wpływ jednej rośliny na drugą z udziałem związków chemicznych uwalnianych do środowiska (Rice 1984). To proces o charakterze wtórnym, a metabolity produkowane przez algi, grzyby, bakterie oraz

Tabela 4. Przykłady grzybów do zwalczania chwastów**Table 4.** Examples of fungi for weed control

Gatunek chwastu Weed species	Czynnik Agent	Miejsce działania Site of action	Bibliografia Bibliography
<i>Abutilon theophrasti</i>	<i>Colletotrichum coccodes</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)
<i>Avena fatua</i>	<i>Septoria tritici</i> Desm. f. sp. <i>avenae</i>	–	Madariaga i Scharen (1985)
<i>Carduus thoermeri</i>	<i>Puccinia carduorum</i>	liść – leaf	Baudoin i wsp. (1993)
<i>Chenopodium album</i> <i>Cirsium arvense</i> <i>Setaria viridis</i> <i>Mercurialis annua</i>	<i>Phoma chenopodicola</i>	liść – leaf	Cimmino i wsp. (2013)
<i>Chenopodium album</i>	<i>Ascochyta caulina</i> <i>Cercospora chenopodii</i> <i>Cercospora dubia</i>	liść – leaf	Scheepens i van Zon (1982)
<i>Chenopodium album</i>	<i>Ascochyta caulina</i>	liść – leaf	Scheepens i wsp. (1997) Vurro i wsp. (2001)
<i>Convolvulus arvensis</i>	<i>Phomopsis convolvulus</i>	korzeń – root	Vogelgsang i wsp. (1998)
<i>Echinochloa crus-galli</i>	<i>Cochliobolus lunatus</i>	liść – leaf	Scheepens (1987)
<i>Malva pusilla</i>	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	liść – leaf	Julien i Griffiths (1998)
<i>Parthenium hysterophorus</i>	<i>Cladosporium</i> sp.	liść – leaf	Kumar i wsp. (2009)
<i>Taraxacum officinale</i>	<i>Phoma herbarum</i>	korzeń – root	Neumann i Boland (1999)
<i>Taraxacum officinale</i> <i>Trifolium repens</i> <i>Plantago minor</i>	<i>Sclerotinia minor</i>	liść – leaf, korzeń – root	Riddle i wsp. (1991) Abu-Dieyeh i Watson (2007)
<i>Amaranthus retroflexus</i>	<i>Lasiodiplodia theobromae</i>	liść – leaf	Adetunji i wsp. (2017)
<i>Echinochloa crus-galli</i>	<i>Exserohilum monoceras</i>	liść – leaf	Zhang i Watson (1997)

rośliny wpływają na wzrost i rozwój innych roślin. Wiele wtórnych metabolitów to związki allelochemiczne pośrednio lub bezpośrednio wywierające działanie fitotoksyczne, ograniczające wzrost konkurencyjnych roślin w otaczającym środowisku (Dudai i wsp. 1999, 2000). Wśród naturalnych metabolitów znajdują się m.in. fitoksyny, antybiotyki, ALA, IAA oraz HCN wytwarzane przez komórki bakterii lub grzybów (Kim i Rhee 2012; Park i wsp. 2015; Adetunji i wsp. 2018; Phour i wsp. 2018; Radhakrishnan i wsp. 2018; Dahiya i wsp. 2019).

Allelozwiązki można ogólnie podzielić na związki fenolowe i terpenoidy roślinne, które wykazują bardzo dużą różnorodność chemiczną oraz biorą udział w wielu procesach metabolicznych oraz ekologicznych. Zwykle mówi się o dwóch typach allelopatii: funkcjonalnej oraz prawdziwej. Typ funkcjonalny występuje wówczas, gdy wytwarzane związki stają się fitotoksyczne w wyniku działania mikroorganizmów glebowych. W allelopatii prawdziwej wydzielane do środowiska allelopatyny w bezpośredni sposób wpływają na rośliny. Sugeruje się, że allelopatię można rozpatrywać w kontekście biologicznego zwalczania. Allelochemikalia obecne w roślinach, jak również w drobnoustrojach można bezpośrednio wykorzystać do zwalczania chwastów na wzór syntetycznych herbicydów. Ich bioskuteczność można zwiększać poprzez zmiany strukturalne lub syntezę związków chemicznych opartych na nich (Sekutowski 2010).

Allelochemikalia są również uwalniane przez rozkładanie martwych tkanek roślin, wypłukiwanie i ulatnianie z części roślin. Dlatego korzyści z potencjału allelopatycznego w zwalczaniu chwastów można uzyskać stosując pozostałości roślin allelopatycznych lub poprzez uprawę roślin allelopatycznych w płodozmianie. W tym drugim przypadku rośliny allelopatyczne mogą być uprawiane jako międzyplony, a producenci roślin mogą czerpać korzyści zarówno z ich produkcji, jak i zdolności do zwalczania chwastów. Udowodniono bowiem, że wprowadzanie upraw allelopatycznych w płodozmianie istotnie zmniejsza zachwaszczenie. Uprawy z wykorzystaniem roślin allelopatycznych uwalniają allelochemikalia do gleby i w ten sposób hamują kiełkowanie niektórych gatunków chwastów. Należy zaznaczyć, że uprawa roślin allelopatycznych wymaga dokładnego planowania i rozeznania czynników agronomiczno-siedliskowych. Czasem bardziej odpowiednią opcją do wykorzystania w walce z chwastami może być stosowanie resztek roślinnych i ekstraktów zawierających związki allelochemiczne (Abbas i wsp. 2017).

Pośród związków allelopatycznych wiele uwagi poświęca się olejkom eterycznym roślin aromatycznych. Te naturalne związki wykazują zróżnicowane działanie biologiczne m.in. chwastobójcze, bakteriobójcze, grzybobójcze, owadobójcze (Taban i wsp. 2013a, 2013b, 2017). Badania wykazały, że stosowanie olejków eterycznych spowalnia

Tabela 5. Przykłady wyciągów roślinnych do zwalczania chwastów
Table 5. Examples of plant extracts for weed control

Gatunek chwastu Weed species	Czynnik Agent	Miejsce działania Site of action	Bibliografia Bibliography
<i>Amaranthus retroflexus</i>	<i>Rosmarinus officinalis</i> <i>Satureja hortensis</i> <i>Laurus nobilis</i>	korzeń – root	Hazrati i wsp. (2018)
<i>Amaranthus retroflexus</i> <i>Portulaca oleracea</i> <i>Vicia sativa</i>	olejek cytrynowy – <i>Cinnamomum</i> Scheffer, lawenda – <i>Lavandula</i> sp., mięta pieprzowa – <i>Mentha piperita</i>	korzeń – root	Cavalieri i Caporali (2010)
<i>Amaranthus retroflexus</i> <i>Centaurea cyanus</i>	olejki eteryczne: karwon – <i>Carum carvi</i> , limonen – <i>Citrus limon</i> , tymol – <i>Thymus vulgaris</i> , menton, mentol – <i>Mentha piperita</i> , tujon – <i>Tanacetum</i> sp., <i>Artemisia</i> sp., kamfora – <i>Cinnamomum camphora</i>	korzeń – root	Synowiec i wsp. (2016)
<i>Chenopodium album</i>	olejek kminkowy – <i>Carum carvi</i>	korzeń – root	Synowiec i wsp. (2016)
<i>Chenopodium album</i> <i>Solanum nigrum</i>	olejek cytrynowy – <i>Cinnamomum</i> Scheffer, olejek lawendowy – <i>Lavandula</i> sp., olejek miętowy – <i>Mentha piperita</i>	korzeń – root	Cavalieri i Caporali (2010)
<i>Echinochloa crus-galli</i>	olejek miętowy – <i>Mentha piperita</i>	korzeń – root	Synowiec i wsp. (2016)
<i>Lolium multiflorum</i> <i>Portulaca oleracea</i>	olejek imbirowy – <i>Zingiber officinale</i> , olejek z kurkumy – <i>Curcuma</i> sp.	korzeń – root	Ibanez i Blasquez (2019)
<i>Amaranthus retroflexus</i>	mączka z nasion <i>Heracleum Sosnowsky</i>	korzeń – root	Gala-Czekaj i wsp. (2018)
<i>Avena fatua</i> <i>Bidens pilosa</i>	wyciąg z <i>Parthenium hysterophorus</i>	korzeń – root	Batish i wsp. (2002)

wzrost i rozwój chwastów oraz hamuje kiełkowanie nasion. Głównym walorem wykorzystania olejków eterycznych w zrównoważonym rolnictwie ekologicznym jest ich szybkie działanie oraz szybki rozkład w środowisku (Tworowski 2002). W tabeli 5. przedstawiono możliwości wykorzystania wyciągów roślinnych do zwalczania chwastów.

Podsumowanie / Summary

Rozwój i zastosowanie biologicznego zwalczania chwastów powinny stanowić przedmiot zainteresowania każdego, kto bezpośrednio spotyka się z problemami zwalczania chwastów (rolnicy, konserwatorzy przyrody), ale także instytucji badawczych oraz firm fitofarmaceutycznych. Wycofywanie substancji czynnych herbicydów oraz w perspektywie, według unijnych zaleceń, ograniczenie zużycia środków ochrony roślin sprawia, że naukowcy oraz producenci agrochemikaliów powinny swoje wysiłki jeszcze bardziej koncentrować właśnie na tym kierunku. Badania nad biologicznym zwalczaniem chwastów są trudne i niezmiernie pracochłonne, a droga badawcza od laboratorium na pole dość długa.

Jednakże to, czy metody biologiczne są szansą czy zagrożeniem, w dużej mierze zależy od stanowiska obserwatora. Jednym z najpoważniejszych ograniczeń jest ogólny brak wiedzy na temat konkretnych owadów roślinożernych i patogenów chwastów oraz ich oddziaływań z żywicielem, za-

również w oddzielnych roślinach, jak i na poziomie populacji. Brak konkretnych zaleceń i preparatów może być korzystny wyłącznie dla producentów bioherbicydów, otwierając im drogę do opatentowania produktu i rozpoczęcia procesów wdrożeniowych (Charudattan i Walker 1982; Scheepens i wsp. 2001). Należy zdawać sobie sprawę, że może upłynąć wiele lat, zanim zauważymy skutki zniszczenia populacji chwastów metodami biologicznymi. W oparciu o konkretne badania, potrzebny jest czas, aby opracować program metody biologicznej dla pojedynczego gatunku chwastu. Obecnie w Europie zarejestrowanych jest niewiele środków biologicznych mających na celu zwalczanie chwastów. Metoda biologiczna uzależniona jest od interakcji zachodzących w środowisku, jest dynamiczna oraz zmienna. Poziomy skuteczności tej metody mogą się różnić w zależności od pory roku lub nawet lat. Zwalczanie gatunku chwastu może nie zostać w pełni osiągnięte w przypadku niekorzystnych temperatur, które mogą być zbyt niskie lub zbyt wysokie, aby czynnik biologiczny mógł zadziałać. Znajomość zmienności przestrzennej i czasowej jest kluczowa do realistycznej oceny metody biologicznej. Można powiedzieć, że stopień sukcesu biologicznej metody zwalczania chwastów jest proporcjonalny do ilości, ale także dokładności przeprowadzonych badań w tym temacie (Waterhouse i Norris 1987). Niektóre dane literaturowe podają, że w Europie zachodzi zjawisko nieplanowanego rozprzestrzeniania się czynników biologicznego zwalczania chwastów. W dużej mierze zjawisko to jest bezpośrednio związane z ocieplaniem się

klimatu. Mimo, że w większości te nieoczekiwane czynniki biologiczne są skuteczne, to niosą za sobą ryzyko braku kontroli nad tym procesem, skutkujące zachwianiem bioróżnorodności w środowisku (Shaw i wsp. 2018).

Podsumowując, można stwierdzić, że biologiczne zwalczanie chwastów to metoda o dużym potencjale, ale wciąż mało zbadana i stosowana w praktyce. Zaletą metody biologicznej jest jej wysoka skuteczność, opłacalność i bezpie-

czeństwo. Jednak należy ją rozważać wyłącznie w kontekście jednej z metod zwalczania chwastów – metody wspomagającej, a nie metody podstawowej. Wdrożenie metod biologicznych zwalczania chwastów musi być podparte solidnymi badaniami naukowymi, ale jej ostateczny sukces uwarunkowany będzie odpowiednim nastawieniem i świadomością odbiorców.

Literatura / References

- Abbas T., Zahir Z.A., Naveed M., Kremer R.J. 2017. Limitations of existing weed control practices necessitate development of alternative techniques based on biological approaches. *Advances in Agronomy* 147: 239–280. DOI: 10.1016/bs.agron.2017.10.005
- Abu-Dieyeh M., Watson A. 2007. Efficacy of *Sclerotinia minor* for dandelion control: effect of dandelion accession, age and grass competition. *Weed Research* 47 (1): 63–72. DOI: 10.1111/j.1365-3180.2007.00542.x
- Adamczewski K. 2014. Odporność chwastów na herbicydy. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 272 ss.
- Adamczewski K., Dobrzański A. 2012. Przyszłość herbologii w zmieniającym się rolnictwie. [Future for weed sciences in changing agriculture]. *Progress in Plant Protection* 52 (4): 867–878. DOI: 10.14199/ppp-2012-149
- Adetunji C.O., Oloke J.K., Bello O.M., Pradeep M., Jolly R.S. 2019. Isolation, structural elucidation and bioherbicidal activity of an eco-friendly bioactive 2-(hydroxymethyl) phenol, from *Pseudomonas aeruginosa* (C1501) and its ecotoxicological evaluation on soil. *Environmental Technology and Innovation* 13: 304–317. DOI: 10.1016/j.eti.2018.12.006
- Adetunji C.O., Oloke J.K., Mishra P., Oluyori A.P., Jolly R.S., Bello O.M. 2018. Mellein, a dihydroisocoumarin with bio herbicidal activity from a new strain of *Lasiodiplodia pseudotheobromae* C1136. *Beni-Suef University Journal of Basic Applied Sciences* 7 (4): 505–510. DOI: 10.1016/j.bjbas.2018.06.001
- Adetunji C.O., Oloke J.K., Prasad G.S., Adejumo I.O. 2017. Effect of *Lasiodiplodia pseudotheobromae* isolates, a potential bioherbicide for *Amaranthus hybridus* L. in maize culture. *Notulae Scientia Biologicae* 9 (1): 131–137. DOI: 10.15835/nsb9110018
- Anonymus 2020. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pl [dostęp: 04.03.2021].
- Bailey K.L. 2014. The bioherbicide approach to weed control using plant pathogens. s. 245–266. W: *Integrated Pest Management: Current Concepts and Ecological Perspective*. Elsevier Academic Press Inc., San Diego, CA. DOI: 10.1016/B978-0-12-398529-3.00014-2
- Bailey K.L., Boyetchko S.M., Langle T. 2010. Social and economic drivers shaping the future of biological control: a Canadian perspective on the factors affecting the development and use of microbial biopesticides. *Biological Control* 52 (3): 221–229. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2009.05.003
- Batish D.R., Singh H.P., Kohli R.K., Saxena D.B., Kaur S. 2002. Allelopathic effects of parthenin against two weedy species, *Avena fatua* and *Bidens pilosa*. *Environmental and Experimental Botany* 47 (2): 149–155. DOI: 10.1016/S0098-8472(01)00122-8
- Baudoin A.B.A.M., Abad R.G., Kok L.T., Bruckart W.L. 1993. Field evaluation of *Puccinia carduorum* for biological control of musk thistle. *Biological Control* 3 (1): 53–60. DOI: 10.1006/bcon.1993.1009
- Blossey B., Dávalos A., Simmons W., Ding J. 2018. A proposal to use plant demographic data to assess potential weed biological control agents impacts on non-target plant populations. *BioControl* 63: 461–473. DOI: 10.1007/s10526-018-9886-4
- Boczek J. 1996. Stan i perspektywy walki biologicznej z chwastami. *Postępy Nauk Rolniczych* 4: 77–89.
- Briese D.T. 2000. Classical biological control. s. 161–192. W: *Australian Weed Management Systems* (B.M. Sindel, red.). RG & FJ Richardson, Melbourne.
- Cavaliere A., Caporali F. 2010. Effects of essential oils of cinnamon, lavender and peppermint on germination of Mediterranean weeds. *Allelopathy Journal* 25 (2): 441–452.
- Charudattan R. 2001. Biological control of weeds by means of plant pathogens: Significance for integrated weed management in modern agro-ecology. *BioControl* 46: 229–260. DOI: 10.1023/A:1011477531101
- Charudattan R., Walker H.L. 1982. *Biological control of weeds with plant pathogens*. John Wiley and Sons, New York, USA, 239 ss.
- Cimmino A., Andolfi A., Zonno M.C., Avolio F., Santini A., Tuzi A., Berestetskyi A., Vurro M., Evidente A. 2013. Chenopodolin: a phytotoxic unrearranged ent-primaradiene diterpene produced by *Phoma chenopodicola*, a fungal pathogen for *Chenopodium album* biocontrol. *Journal of Natural Products* 76 (7): 1291–1297. DOI: 10.1021/np400218z
- Dahiya A., Sharma R., Sindhu S., Sindhu S.S. 2019. Resource partitioning in the rhizosphere by inoculated *Bacillus* spp. towards growth stimulation of wheat and suppression of wild oat (*Avena fatua* L.) weed. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 25 (6): 1483–1495. DOI: 10.1007/s12298-019-00710-3
- Devi N.M., Mayanglambam B., Thangjam B. 2020. Biological control of weed. *Biotica Research Today* 2 (5): 341–344.
- Dudai N., Larkov O., Putievsky E., Lerner H.R., Ravid U., Lewinsohn E., Mayer A.M. 2000. Biotransformation of constituents of essential oils by germinating wheat seeds. *Phytochemistry* 55 (5): 375–382. DOI: 10.1016/S0031-9422(00)00333-2
- Dudai N., Poljakoff-Mayber A., Mayber A.M., Putievsky E., Lerner H.R. 1999. Essential oils as allelochemicals and their potential use as bioherbicides. *Journal of Chemical Ecology* 25: 1079–1089. DOI: 10.1023/A:1020881825669
- Evans H.C. 2013. *Biological control of weeds with fungi*. W: *The Mycota (A Comprehensive Treatise on Fungi as Experimental Systems for Basic and Applied Research)* (K. Esser, red.). XI Agricultural Applications 2nd edition (F. Kempken, volume red.). Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 407 ss. ISBN 978-3-642-36820-2. DOI: 10.1007/978-3-642-36821-9
- Gala-Czekaj D., Jop B., Synowiec A. 2018. Wpływ mączki z nasion i okwiātu barszczu Sosnowskiego (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) na początkowy wzrost kukurydzy i dwóch gatunków chwastów. *Fragmenta Agronomica* 35 (1): 29–39. DOI: 10.26374/fa.2018.35.03

- Glare T., Caradus J., Gelernter W., Jackson T., Keyhani N., Kohl J., Marrone P., Morin L., Stewart A. 2012. Have biopesticides come of age? *Trends in Biotechnology* 30 (5): 250–258. DOI: 10.1016/j.tibtech.2012.01.003
- Hallet S.G. 2005. Where are the bioherbicides. *Weed Science* 53 (3): 404–415. DOI: 10.1614/WS-04-157R2
- Harding D.P., Raizada M.N. 2015. Controlling weeds with fungi, bacteria and viruses: a review. *Frontiers in Plant Science* 6: 659. DOI: 10.3389/fpls.2015.00659
- Hazrati H., Saharkhiz M.J., Moein M., Khoshghalb H. 2018. Phytotoxic effects of several essential oils on two weed species and tomato. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 13: 204–212. DOI: 10.1016/j.bcab.2017.12.014
- Ibanez M.D., Blasquez M.A. 2019. Ginger and turmeric essential oils for weed control and food crop protection. *Plants* 8 (3): 59–78. DOI: 10.3390/plants8030059
- Imazumi S., Nishino T., Miyabe K., Fujimori T., Yamada M. 1997. Biological control of annual bluegrass (*Poa annua* L.) with a Japanese isolate of *Xanthomonas campestris* pv. *poae* (JT-P482). *Biological Control* 8 (1): 7–14. DOI: 10.1006/bcon.1996.0475
- Jasienuik M., Brule-Babel A.L., Morrison I.N. 1996. The evolution and genetics of herbicide resistance in weeds. *Weed Science* 44 (1): 176–193. DOI: 10.1017/S0043174500093747
- Julien M.H., Griffiths M.W. 1998. Biological control of weeds: a world catalogue of agents and their target weeds. CABI International, Wallingford, 223 ss.
- Kennedy A.C., Elliott L.F., Young F.L., Douglas C.L. 1991. Rhizobacteria suppressive to the weed downy brome. *Soil Science Society of America Journal* 55 (3): 722–727. DOI: 10.2136/sssaj1991.03615995005500030014x
- Kennedy A.C., Johnson B.N., Stubbs T.L. 2001. Host range of a deleterious rhizobacterium for biological control of downy brome. *Weed Science* 49 (6): 792–797. DOI: 10.1614/0043-1745(2001)049[0792:HROADR]2.0.CO;2
- Kiewnick S. 2007. Practicalities of developing and registering microbial biological control agents. *Cab Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2: 1–11. DOI: 10.1079/PAVSNNR20072013
- Kim W.C., Rhee I.K. 2012. Functional mechanism of plant growth retardation by *Bacillus subtilis* IJ-31 and its allelochemicals. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 22 (10): 1375–1380. DOI: 10.4014/jmb.1207.07031
- Kremer R.J., Begonia M.F.T., Stanley L., Lanham E.T. 1990. Characterization of rhizobacteria associated with weed seedlings. *Applied and Environmental Microbiology* 56 (6): 1649–1655. DOI: 10.1128/AEM.56.6.1649-1655.1990
- Kumar A., Verma V.C., Gond S.K., Kumar V., Kharwar R.N. 2009. Bio-control potential of *Cladosporium* sp. (MCPL-461), against a noxious weed *Parthenium hysterophorus* L. *Journal of Environmental Biology* 30 (2): 307–312.
- Macdonald L.A.W., Wissel C. 1989. Costing the initial clearance of alien *Acacia* species invading fynbos vegetation. *South African Journal of Plant and Soil* 6 (1): 39–45. DOI: 10.1080/02571862.1989.10634477
- Madariaga R.B., Scharen A.L. 1985. *Septoria tritici* blotch in Chilean wild oat. *Plant Disease* 69 (2): 126–127.
- McFadyen R.E.C. 1998. Biological control of weeds. *Annual Review of Entomology* 43: 369–393. DOI: 10.1146/annurev.ento.43.1.369
- Mohan Babu R., Sajeena A., Vidhyasekaran P., Seetharaman K., Reddy M.S. 2003. Characterization of a phytotoxic glycoprotein produced by *Phoma eupyrena* – A pathogen on water lettuce. *Phytoparasitica* 31: 265–274. DOI: 10.1007/BF02980835
- Moss S.R., Rubin B. 1993. Herbicide-resistant weeds: a worldwide perspective. *Journal of Agricultural Science* 120 (2): 141–148. DOI: 10.1017/S0021859600074177
- Müller-Schärer H., Scheepens P.C., Greaves M.P. 2000. Biological control of weeds in European crops: recent achievements and future work. *Weed Research* 40: 83–98. DOI: 10.1046/j.1365-3180.2000.00170.x
- Naylor R.E.L. (red.). 2002. *Weed Management Handbook*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 423 ss.
- Neumann S., Boland G.J. 1999. Influence of selected adjuvants on disease severity by *Phoma herbarum* on dandelion (*Taraxacum officinale*). *Weed Technology* 13 (4): 675–679. DOI: 10.1017/S0890037X00042068
- Park J.M., Radhakrishnan R., Kang S.M., Lee I.J. 2015. IAA producing *Enterobacter* sp. I-3 as a potent bio-herbicide candidate for weed control: a special reference with lettuce growth inhibition. *Indian Journal of Microbiology* 55 (2): 207–212. DOI: 10.1007/s12088-015-0515-y
- Phour M. 2012. Biological control of *Phalaris minor* in wheat (*Triticum aestivum* L.) using rhizosphere bacteria. Master's thesis. Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University, Hisar, Haryana.
- Phour M., Ghai A., Rose G., Dhull N., Sindhu S.S. 2018. Role of aminolevulinic acid in stress adaptation and crop productivity. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7 (5): 1516–1524. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.705.178
- Qiming X., Haidong C., Huixian Z., Daqiang Y. 2006. Allelopathic activity of volatile substance from submerged macrophytes on *Microcystin aeruginosa*. *Acta Ecologica Sinica* 26 (11): 3549–3554. DOI: 10.1016/S1872-2032(06)60054-1
- Quail J.W., Ismail N., Pedras M.S.C., Boyetchko S.M. 2002. Pseudophomins A and B, a class of cyclic lipodepsipeptides isolated from a *Pseudomonas* species. *Acta Crystallographica Section C: Structural Chemistry* 58 (5): 268–271. DOI: 10.1107/s0108270102004432
- Radhakrishnan R., Alqarawi A.A., Abd Allah E.F. 2018. Bioherbicides: Current knowledge on weed control mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 158: 131–138. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.04.018
- Rice E.L. 1984. *Allelopathy* (Second ed.). Academic Press Inc., Orlando, FL, USA, 422 ss.
- Riddle G.E., Burpee L.L., Boland G.J. 1991. Virulence of *Sclerotinia sclerotiorum* and *S. minor* on dandelion (*Taraxacum officinale*). *Weed Science* 39 (1): 109–118. DOI: 10.1017/s0043174500057969
- Scheepens P.C. 1987. Joint action of *Cochliobolus lunatus* and atrazine on *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. *Weed Research* 27 (1): 43–47. DOI: 10.1111/j.1365-3180.1987.tb00735.x
- Scheepens P., Kempenaar C., Andreasen C., Eggers T.H., Netlabd J., Vurro M. 1997. Biological control of the annual weed *Cheopodium album*, with emphasis on the application of *Ascochyta caulina* as a microbial herbicide. *Integrated Pest Management Reviews* 2: 71–76. DOI: 10.1023/A:1018484530615
- Scheepens P., Müller-Schärer H., Kempenaar C. 2001. Opportunities for biological weed control in Europe. *BioControl* 46: 127–138. DOI: 10.1023/A:1011445721800
- Scheepens P.C., van Zon H.C.J. 1982. Microbial herbicides. s. 623–641. W: *Microbial and Viral Herbicides* (E. Kurstak, red.). Marcel Dekker, New York, 720 ss.

- Schwarzländer M., Hinz H.L., Winston R.L., Day M.D. 2018. Biological control of weeds: an analysis of introductions, rates of establishment and estimates of success, worldwide. *BioControl* 63: 319–331. DOI: 10.1007/s10526-018-9890-8
- Sekutowski T. 2010. Alleloherbicydy i bioherbicydy – mit, czy rzeczywistość. [Alleloherbicides and bioherbicides – myth or reality?]. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 55 (4): 84–90.
- Shaw R.H., Ellison C.A., Marchante H., Pratt C.F., Schaffner U., Sforza R.F.H., Deltoro V. 2018. Weed biological control in the European Union: from serendipity to strategy. *BioControl* 63: 333–347. DOI: 10.1007/s10526-017-9844-6
- Singh H.P., Batish D.R., Kohli R.K. 2003. Allelopathic interactions and allelochemicals: new possibilities for sustainable weed management. *Critical Reviews in Plant Sciences* 22 (3–4): 239–311. DOI: 10.1080/713610858
- Skrzypczak G., Pudelko J. 2003. Chwasty i ich zwalczanie – aspekty integrowanej ochrony i zrównoważonego rolnictwa. [Weeds and their control – aspects of integrated pest management and sustainable agriculture]. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 490: 227–233.
- Smith L., de Lillo E., Amrine J.W. 2010. Effectiveness of eriophyid mites for biological control of weedy plants and challenges for future research. *Experimental and Applied Acarology* 51: 115–149. DOI: 10.1007/s10493-009-9299-2
- Sobhian R., McClay A., Hasan S., Peterschmitt M., Hughes R.B. 2004. Safety assessment and potential of *Cecidophyes rouhollahi* (Acari, Eriophyidae) for biological control of *Galium spurium* (Rubiaceae) in North America. *Journal of Applied Entomology* 128 (4): 258–266. DOI: 10.1111/j.1439-0418.2004.00818.x
- Stokłosa A. 2006. Bioherbicydy i alleloherbicydy w walce z chwastami. [Bioherbicides and alleloherbicides as weed control methods]. *Postępy Nauk Rolniczych* 53 (6): 41–52.
- Synowiec A., Smęda A., Adamiec J., Kalemba D. 2016. Wpływ mikrokapsułkowanych olejków eterycznych na początkowy wzrost kukurydzy (*Zea mays*) i chwastów (*Echinochloa crus-galli* i *Chenopodium album*). [The effect of microencapsulated essential oils on the initial growth of maize (*Zea mays*) and common weeds (*Echinochloa crus-galli* and *Chenopodium album*). *Progress in Plant Protection* 56 (3): 372–378. DOI: 10.14199/ppp-2016-060
- Taban A., Rahimi M.J., Saharkhiz M.J., Hadian J., Zomorodian K. 2013a. The efficacy of *Satureja khuzistanica* essential oil treatment in reducing *Escherichia coli* O 157: H 7 load on alfalfa seeds prior to sprouting. *Journal of Food Safety* 33 (2): 121–127. DOI: 10.1111/jfs.12031
- Taban A., Saharkhiz M.J., Hadian J. 2013b. Allelopathic potential of essential oils from four *Satureja* spp. *Biological Agriculture Horticulture* 29 (4): 244–257. DOI: 10.1080/01448765.2013.830275
- Taban A., Saharkhiz M.J., Hooshmandi M. 2017. Insecticidal and repellent activity of three *Satureja* species against adult red flour beetles, *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Acta Ecologica Sinica* 37 (3): 201–206. DOI: 10.1016/j.chnaes.2017.01.001
- TeBeest D.O. 1996. Biological control of weeds with plant pathogens and microbial pesticides. *Advances in Agronomy* 56: 115–137. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60180-7
- Tisdell C.A., Auld B.A., Menz K.M. 1984. On assessing the value of biological control of weeds. *Protection Ecology* 6: 169–179.
- Tworkoski T. 2002. Herbicide effects of essential oils. *Weed Science* 50 (4): 425–431. DOI: 10.1614/0043-1745(2002)050[0425:HEOEO]2.0.CO;2
- Vogelgsang S., Watson A.K., Ditommaso A., Hurlle K. 1998. Effect of the pre-emergence bioherbicide *Phomopsis convolvulus* on seedling and established plant growth of *Convolvulus arvensis*. *Weed Research* 38 (3): 175–182. DOI: 10.1046/j.1365-3180.1998.00088.x
- Vurro M., Zonno M.C., Evidente A., Andolfini A., Montemurro P. 2001. Enhancement of efficacy of *Ascochyta caulina* to control *Chenopodium album* by use of phytotoxins and reduced rates of herbicides. *Biological Control* 21 (2): 182–190. DOI: 10.1006/bcon.2001.0933
- Waterhouse D.F.W., Norris K.R. 1987. *Biological Control: Pacific Prospects*. Inkata Press, 454 ss. ISBN 978-0909-605-506.
- Weaver M.A., Lyn M.E., Boyette C.D., Hoagland R.E. 2007. *Bioherbicides for weed control*. s. 93–110. W: *Non-Chemical Weed Management* (M.K. Upadhyaya, R.E. Blackshaw, red.). CABI International, Cambridge, MA, USA.
- Zhang W., Watson A.K. 1997. Host range of *Exserohilum monoceras*, a potential bioherbicide for the control of *Echinochloa* species. *Canadian Journal of Botany* 75 (5): 685–692. DOI: 10.1139/b97-077