Zintegrowana ochrona roślin jako system zarządzania ryzykiem biologicznym w świetle publikacji Insect-Plant Interactions Volume 2 Jamina Aliego

AUTOR

Fundacja Dobre Państwo

STRESZCZENIE / ABSTRACT

Artykuł przedstawia koncepcję integrowanej ochrony roślin (IPM) nie jako prosty zestaw zabiegów, lecz jako złożony system zarządzania ryzykiem biologicznym i ekonomicznym. Autor podkreśla konieczność przejścia od molekularnego rozpoznania mechanizmów obrony roślin do praktycznego zarządzania agroekosystemem. Kluczowym elementem IPM jest rozróżnienie między samą obecnością fitofaga a rzeczywistym zagrożeniem prowadzącym do strat finansowych. System ten opiera się na monitorowaniu naturalnych procesów regulacji populacji szkodników oraz stosowaniu interwencji chemicznych jedynie w uzasadnionych ekonomicznie przypadkach. Podejście to uwzględnia fizjologię roślin, zdolność do kompensacji uszkodzeń oraz rynkową wartość produktów, dążąc do utrzymania równowagi biologicznej przy jednoczesnym zapewnieniu trwałości i efektywności produkcji rolnej.

The article presents the concept of Integrated Pest Management (IPM) not as a simple set of treatments, but as a complex system for managing biological and economic risk. The author emphasizes the need to move from the molecular recognition of plant defense mechanisms to the practical management of the agroecosystem. A key element of IPM is the distinction between the mere presence of a phytophage and an actual threat leading to financial losses. This system is based on monitoring natural pest population regulation processes and applying chemical interventions only in economically justified cases. This approach takes into account plant physiology, the ability to compensate for damage, and the market value of products, aiming to

maintain biological balance while ensuring the sustainability and efficiency of agricultural production.

Artykuł analizuje ewolucję Integrowanej Ochrony Roślin (IPM) jako przejście od naiwnego dążenia do całkowitej eliminacji szkodników ku zaawansowanemu systemowi zarządzania ryzykiem biologicznym i ekonomicznym. Autor stawia tezę, że skuteczna ochrona roślin nie jest prostym przeniesieniem wyników laboratoryjnych na pole, lecz syntezą wiedzy molekularnej, ekologicznej i gospodarczej. Kluczowym elementem tego paradygmatu jest odrzucenie utożsamiania obecności fitofaga z koniecznością interwencji; zamiast tego IPM proponuje operowanie w ramach progów ekonomicznej szkodliwości (EIL i ET), gdzie decyzja o zabiegu zapada jedynie wtedy, gdy koszt potencjalnych strat przewyższa nakłady na ochronę. Tekst szczegółowo omawia rolę precyzyjnego monitoringu, cyfrowej diagnostyki oraz wykorzystania infrastruktury ekologicznej (np. systemy push-pull), wskazując, że trwałość agroekosystemów zależy od zachowania równowagi między interwencją techniczną a naturalnymi procesami regulacyjnymi. W efekcie IPM jawi się nie jako zestaw procedur, lecz jako nauka o rezyliencji, która uczy, jak utrzymać produktywność rolnictwa w warunkach dynamicznej zmienności środowiskowej i ewolucyjnej adaptacji szkodników.

SŁOWA KLUCZOWE

zintegrowana ochrona roślin | IPM | zarządzanie ryzykiem biologicznym | ekonomiczny próg interwencji | economic injury level | agroekosystemy | monitoring cyfrowy | progi ekonomicznej szkodliwości | rezyliencja agroekosystemów | dyrektywa 2009/128/WE | naturalni wrogowie fitofagów | modele fenologiczne | statystyka sekwencyjna | barkodowanie DNA | bezpieczeństwo żywnościowe

IPM jako system zarządzania ryzykiem biologicznym i ekonomicznym

OD GENOMU DO POLA UPRAWNEGO. ZINTEGROWANA OCHRONA ROŚLIN JAKO NAUKA O ZARZĄDZANIU RYZYKIEM BIOLOGICZNYM, PROGACH EKONOMICZNEJ SZKODLIWOŚCI, OCHRONIE NATURALNYCH WROGÓW FITOFAGÓW, MONITORINGU CYFROWYM I TRWAŁOŚCI AGROEKOSYSTEMÓW

Przejście od molekularnego rozpoznania mechanizmów obrony roślin do praktycznego zarządzania produkcją rolną stanowi jeden z najtrudniejszych problemów współczesnych nauk biologicznych i gospodarczych. Wymaga ono bowiem powiązania procesów zachodzących w skali nanometrów z decyzjami podejmowanymi w przestrzeni obejmującej całe gospodarstwa, regiony produkcyjne i krajobrazy rolnicze. Znajomość sekwencji genu kodującego enzym uczestniczący w biosyntezie glukozynolanów, mechanizmu degradacji represorów JAZ czy struktury białka receptorowego odpowiedzialnego za wrażliwość owada na toksynę Bt dostarcza wiedzy o konkretnych komponentach relacji między organizmami, lecz nie rozstrzyga, czy interwencja doprowadzi do ekonomicznie uzasadnionego ograniczenia strat. Ostateczny rezultat zależy od zagęszczenia populacji fitofagów, dynamiki ich reprodukcji, pogody, właściwości odmiany, wartości handlowej produktu oraz aktywności naturalnych wrogów szkodników. Istotne jest przy tym, że każdy zabieg ochronny może wpłynąć na przyszłą strukturę populacji i zmienić skuteczność kolejnych działań.

Ochrona roślin nie może być zatem rozumiana jako proste przeniesienie skuteczności substancji lub mechanizmu biologicznego z laboratorium na pole uprawne. Jest to raczej problem zarządzania złożonym systemem ekologicznym, którego właściwości wynikają z interakcji międzyorganizmowych, dynamiki środowiska i ekonomicznych decyzji człowieka. Tutaj kluczową rolę odgrywa integrowana ochrona roślin (integrated pest management, IPM), której istotą jest wykorzystanie wiedzy o funkcjonowaniu agroekosystemu do ograniczania rzeczywistych szkód przy racjonalnym doborze interwencji. Historyczne podstawy tego podejścia sięgają czasu, gdy rosnąca intensywność stosowania chemicznych środków owadobójczych obnażyła ograniczenia strategii dążących do jak najszybszego zredukowania liczebności wszystkich organizmów uznawanych za szkodliwe. W 1959 roku Vernon Stern, Ray Smith, Robert van den Bosch i Kenneth Hagen opublikowali w czasopiśmie "Hilgardia" pracę dotyczącą koncepcji integrated control, wskazując, że chemiczne i biologiczne metody ograniczania populacji szkodników nie muszą się wzajemnie wykluczać.

Autorzy podkreślili znaczenie naturalnych procesów regulujących liczebność organizmów oraz potrzebę stosowania interwencji chemicznych dopiero wtedy, gdy znajduje to rzeczywiste

uzasadnienie ekonomiczne. Kluczowym elementem tej koncepcji było rozróżnienie między samą obecnością fitofaga a zagrożeniem prowadzącym do strat uzasadniających koszty zwalczania. Powstała w ten sposób podstawa naukowa systemu, w którym zadaniem ochrony nie jest bezwarunkowa eliminacja organizmów roślinożernych, lecz utrzymywanie ich oddziaływania poniżej poziomu prowadzącego do gospodarczo nieakceptowalnych strat. Z punktu widzenia teorii ekologicznej był to istotny zwrot: szkodnik przestał być traktowany jako organizm funkcjonujący niezależnie od otoczenia, a stał się składnikiem populacji podlegającej naturalnym procesom regulacji, takim jak konkurencja, drapieżnictwo, pasożytnictwo czy wpływ warunków abiotycznych. Koncepcja ta stworzyła fundamenty współczesnego IPM, który z czasem włączył coraz szerszy zakres metod hodowlanych, agrotechnicznych, biologicznych i informacyjnych.

Zasadnicze znaczenie tego paradygmatu wynika z odrzucenia utożsamienia biologicznej obecności organizmu z ekonomiczną koniecznością jego zwalczania. Każda roślina uprawna funkcjonuje w środowisku, w którym część jej tkanek może być wykorzystywana przez konsumentów, jednak wielkość uszkodzenia nie zawsze przekłada się bezpośrednio na wielkość plonu. W określonych fazach rozwoju roślina potrafi kompensować utratę części powierzchni asymilacyjnej poprzez zwiększenie aktywności pozostałych liści, uruchomienie pąków lub zmianę alokacji zasobów.

W innych sytuacjach nawet niewielkie uszkodzenie organu reprodukcyjnego może prowadzić do poważnych strat jakościowych lub ilościowych. Niezbędne jest więc rozróżnienie między intensywnością żerowania, stopniem uszkodzenia, rzeczywistą utratą zdolności produkcyjnej a ekonomiczną wartością tej straty. Z punktu widzenia fizjologii roślin odpowiedź na uszkodzenie zależy od gatunku, genotypu, stadium ontogenetycznego oraz zasobów, natomiast w ekonomice rolnictwa decydują dodatkowo cena produktu, wymagania jakościowe i możliwości alternatywnej sprzedaży. W rezultacie identyczny poziom uszkodzeń liści może być mało istotny w uprawie na biomasę paszową, a jednocześnie generować wysokie straty w produkcji warzyw liściowych, gdzie wartość rynkowa zależy od wizualnej jakości organu.

IPM jako system decyzji osadzony w ramach prawnych

IPM wymaga zatem odrębnej charakterystyki biologicznej i ekonomicznej dla każdej relacji uprawa-szkodnik-środowisko. Współczesne znaczenie tej koncepcji utrwalono w prawie europejskim, gdzie podstawowym punktem odniesienia jest dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/128/WE ustanawiająca ramy wspólnotowego działania na rzecz zrównoważonego stosowania pestycydów. Akt ten nie sprowadza integrowanej ochrony do wyboru odpowiedniego środka chemicznego, lecz traktuje ją jako system podejmowania decyzji. Obejmuje on zapobieganie

występowaniu organizmów szkodliwych, monitorowanie ich populacji, wykorzystanie naukowo uzasadnionych progów interwencji, preferowanie metod niechemicznych, ograniczanie oddziaływań na organizmy nietarczowe oraz przeciwdziałanie ewolucji odporności.

Załącznik III dyrektywy ustanawia osiem ogólnych zasad, które obejmują także ocenę skuteczności wcześniej podjętych działań na podstawie odpowiednich zapisów i wyników monitoringu. System prawny uznaje ekonomiczne i ekologiczne uzasadnienie interwencji za element definicyjny ochrony integrowanej, a nie wyłącznie za dodatkowy postulat środowiskowy. Prawidłowe wykonywanie ochrony roślin wymaga więc uwzględniania informacji o rzeczywistym zagrożeniu i odpowiedniego doboru metody, zamiast automatycznego stosowania zabiegów w z góry ustalonych odstępach czasu. Istotne jest również preferowanie trwałych metod biologicznych, fizycznych i innych niechemicznych w sytuacjach, gdy zapewniają one zadowalające ograniczenie szkód. Nie oznacza to całkowitego zakazu stosowania środków chemicznych, lecz wymaga ich osadzenia w szerszym systemie zarządzania ryzykiem.

W polskim systemie prawnym obowiązek stosowania zasad integrowanej ochrony roślin przez profesjonalnych użytkowników funkcjonuje od 1 stycznia 2014 roku. Jego podstawę stanowią między innymi ustawa z 8 marca 2013 roku o środkach ochrony roślin, przepisy prawa unijnego oraz wynikające z nich obowiązki dotyczące bezpieczeństwa stosowania preparatów. Państwowa Inspekcja Ochrony Roślin i Nasiennictwa wskazuje na znaczenie ochrony zdrowia ludzi, zwierząt i środowiska oraz przeciwdziałania znoszeniu substancji poza obszar objęty zamierzonym zabiegiem. Autor podkreśla, że integrowana ochrona roślin nie powinna być traktowana jako deklaracja ideowa niezwiązana z codzienną praktyką gospodarstwa, lecz jako zbiór zasad wpływających na sposób obserwowania upraw, dokumentowania zagrożeń, wyboru terminu interwencji i doboru odpowiedniego produktu. Istotą tych rozwiązań jest wprowadzenie do działalności produkcyjnej procedury, w której decyzja zostaje poprzedzona identyfikacją problemu, oceną jego znaczenia i porównaniem alternatywnych sposobów postępowania. Odpowiednia dokumentacja umożliwia natomiast analizę skuteczności zabiegów i doskonalenie przyszłych decyzji, tworząc podstawy organizacyjnego uczenia się gospodarstwa.

W praktyce kluczowe znaczenie ma współpraca producentów z doradcami posiadającymi wiedzę entomologiczną i agronomiczną. Interpretacja obserwacji terenowych często wymaga bowiem odróżnienia gatunków o podobnym wyglądzie, lecz odmiennym znaczeniu gospodarczym i różnej wrażliwości na stosowane metody ochronne.

Ekonomiczne progi interwencji jako narzędzia decyzji

W teorii decyzji kluczowym elementem IPM jest rozróżnienie pomiędzy ekonomicznym poziomem szkodliwości (economic injury level, EIL) a ekonomicznym progiem interwencji (economic threshold, ET), zwanym również progiem działania. Ekonomiczny poziom szkodliwości definiuje zagęszczenie populacji lub natężenie uszkodzeń, przy których wartość oczekiwanej straty zrównuje się z kosztem skutecznego ograniczenia zagrożenia. Próg działania natomiast wyznacza moment, w którym należy rozważyć interwencję, aby zapobiec osiągnięciu poziomu EIL. Rozróżnienie to ma istotne znaczenie dynamiczne: między rozpoznaniem zagrożenia a pełnym skutkiem zabiegu upływa czas, w którym populacja fitofaga nadal rośnie i wyrządza szkody. Dlatego w klasycznym modelu próg działania jest niższy od EIL, choć jego wartość zależy od tempa przyrostu populacji, przewidywanego czasu reakcji oraz skuteczności dostępnej metody.

Warto podkreślić, że progi te nie są biologicznymi stałymi właściwymi dla danego gatunku szkodnika. Zmieniają się one wraz z ceną produktu, kosztami ochrony, fazą rozwoju uprawy i potencjalnymi stratami plonu. Wykorzystanie progów wymaga zatem odniesienia do aktualnych warunków produkcyjnych, a nie automatycznego przenoszenia wartości opracowanych dla innych regionów czy systemów uprawy.

W klasycznym ujęciu ekonomiczny poziom szkodliwości można przedstawić za pomocą modelu \(EIL=C/(V\cdot I\cdot D\cdot K)\), gdzie \(C\) oznacza koszt interwencji na jednostkę powierzchni, \(V\) wartość jednostki produktu, \(I\) przeciętną intensywność uszkodzenia powodowaną przez jednego konsumenta, \(D\) wielkość straty plonu przypadającą na jednostkę uszkodzenia, a \(K\) proporcję strat możliwą do uniknięcia dzięki zastosowanej metodzie. Zaletą tego modelu jest rozdzielenie biologicznych i gospodarczych komponentów decyzji, jednak jego poprawne zastosowanie wymaga zgodności jednostek oraz zrozumienia założeń dotyczących liniowości zależności.

W rzeczywistych układach przyrost strat nie zawsze jest proporcjonalny do zagęszczenia konsumentów, gdyż rośliny mogą wykazywać ograniczoną tolerancję uszkodzeń lub nieliniowe zmiany zdolności kompensacyjnych. Jednostkowa wartość uszkodzenia może wzrastać w określonej fazie rozwoju organów użytkowych, a skuteczność zabiegu spadać wraz z wiekiem larw lub pojawieniem się populacji odpornych. Model należy więc interpretować jako narzędzie porządkowania rachunku decyzyjnego, którego parametry wymagają empirycznej kalibracji.

Z punktu widzenia ekonomiki rolnictwa istotne jest to, że wzrost ceny produktu może obniżyć ekonomiczny poziom szkodliwości – nawet mniejsza strata ilościowa staje się wtedy bardziej dotkliwa finansowo. Odwrotnie, wzrost kosztów interwencji może podnieść próg uzasadniający jej

zastosowanie, o ile nie towarzyszy mu wyższa skuteczność. Decyzja ochronna jest zatem funkcją zmiennej relacji między warunkami biologicznymi a ekonomicznymi. Głównym ograniczeniem klasycznych progów pozostaje ich częste traktowanie jako statycznych wartości liczbowych, podczas gdy populacje fitofagów i zdolność roślin do tolerowania uszkodzeń pozostają procesami dynamicznymi.

Precyzyjna diagnostyka i dynamika populacji jako fundament decyzji o interwencji

Współczesne podejście powinno uwzględniać rzeczywiste tempo rozwoju populacji, jej strukturę wiekową, prognozowane warunki meteorologiczne oraz prawdopodobną aktywność naturalnych wrogów. Szczególnie istotne jest rozróżnienie między aktualnym zagęszczeniem larw a liczbą osobników, które mogą pojawić się po wylęgnięciu wcześniej złożonych jaj. Podobnie obecność dużej liczby dorosłych nie musi oznaczać proporcjonalnego wzrostu presji larwalnej, jeśli warunki środowiskowe ograniczają płodność lub przeżywalność potomstwa. W świetle ekologii populacji decyzja powinna zatem dotyczyć nie tylko aktualnej liczebności, lecz także prawdopodobnej trajektorii przyszłego rozwoju. Właśnie dlatego ekonomiczny próg działania można traktować jako punkt na granicy ryzyka, którego położenie zależy od czasu potrzebnego do osiągnięcia poziomu strat gospodarczo istotnych.

W przypadku szkodników o krótkim cyklu rozwojowym i wysokim potencjale reprodukcyjnym kluczowa staje się częstotliwość monitoringu, gdyż między kolejnymi obserwacjami mogą zajść gwałtowne zmiany liczebności. Prowadzenie kontroli według stałego kalendarza, bez uwzględnienia temperatury i stadium rozwoju szkodnika, może zatem nie odpowiadać rzeczywistej dynamice zagrożenia. Zasadniczym warunkiem skuteczności systemu pozostaje wiarygodna identyfikacja gatunków odpowiedzialnych za uszkodzenia; podobieństwo morfologiczne owadów często prowadzi bowiem do błędnych decyzji o interwencji. W przypadku tantnisia krzyżowiaczka Plutella xylostella rozpoznanie opiera się zwykle na analizie cech larw i osobników dorosłych, choć w niektórych regionach wymaga odróżnienia go od spokrewnionych przedstawicieli rodzaju Plutella. Jest to tym ważniejsze, że gatunki o zbliżonym wyglądzie mogą różnić się historią odporności na insektycydy, biologią reprodukcji i zakresem gospodarzy.

W badaniach taksonomicznych wykorzystuje się analizę narządów kopulacyjnych oraz narzędzia barkodowania DNA, obejmujące między innymi fragment mitochondrialnego genu oksydazy cytochromu c (COI). Nie należy jednak utożsamiać identyczności krótkiego fragmentu sekwencji z niepodważalnym rozstrzygnięciem przynależności gatunkowej, gdyż interpretację tę mogą

utrudniać introgresja mitochondrialna, niepełna separacja linii ewolucyjnych oraz ograniczenia baz referencyjnych. Niezbędne jest więc łączenie danych morfologicznych i molekularnych z informacjami o roślinie żywicielskiej oraz miejscu występowania populacji. W praktyce produkcyjnej identyfikacja gatunku stanowi pierwszy etap zarządzania ryzykiem – dopiero po niej możliwe jest stosowanie odpowiednich modeli fenologicznych, progów szkodliwości i metod ochrony. Błąd diagnostyczny może prowadzić nie tylko do zbędnego zabiegu, lecz również do wyboru interwencji, której mechanizm pozostaje niewłaściwy wobec rzeczywistego organizmu antagonistycznego.

Monitoring jako proces redukcji niepewności decyzyjnej

W metodyce monitoringu kluczowe jest rozróżnienie pomiędzy badaniem występowania szkodnika a ilościowym szacowaniem jego zagęszczenia w obrębie całej uprawy. Pułapki feromonowe dostarczają informacji o aktywności lotnej określonych osobników dorosłych, jednak liczba odłowionych samców nie przekłada się automatycznie na liczebność samic składających jaja ani przyszłe zagęszczenie larw.

Skuteczność pułapki zależy od składu i ilości atraktantu, jego trwałości, lokalizacji urządzenia, warunków przepływu powietrza oraz zachowania owadów. Istotny wpływ na odpowiedź samców i wynik odłowu – niezależnie od rzeczywistej liczebności populacji – może mieć nasycenie środowiska naturalnymi sygnałami feromonowymi. Z tego względu dane feromonowe należy interpretować w powiązaniu z bezpośrednimi obserwacjami liści, oceną występowania jaj i larw oraz pomiarami aktualnych uszkodzeń. W określonych systemach pułapki służą przede wszystkim do ustalania początku aktywności sezonowej, natomiast decyzję o interwencji opiera się na odrębnych próbach pobieranych z reprezentatywnej części pola. Z punktu widzenia statystyki ekologicznej należy pamiętać, że rozmieszczenie owadów może być skupiskowe; niewielka liczba obserwacji w przypadkowo wybranej części uprawy może zatem prowadzić do istotnie zniekształconego oszacowania zagęszczenia. Właściwy schemat próbkowania powinien uwzględniać strukturę przestrzenną pola, jego brzegi, zróżnicowanie mikroklimatu i obecność miejsc sprzyjających koncentracji konsumentów.

Warto rozważyć wykorzystanie metod statystyki sekwencyjnej, w których liczba pobieranych prób nie jest ustalana sztywno na początku doświadczenia, lecz zależy od informacji uzyskiwanych podczas kolejnych obserwacji. Jeśli pierwsze pomiary jednoznacznie wskazują na bardzo niski poziom zagrożenia, wykonywanie rozbudowanego zestawu kolejnych oznaczeń ma niewielką wartość decyzyjną. Jeżeli natomiast wynik znajduje się blisko granicy interwencji, konieczne może

być zwiększenie liczby obserwacji, aby ograniczyć ryzyko błędnej klasyfikacji. Monitoring przestaje być wtedy jedynie procedurą gromadzenia danych, a staje się procesem stopniowego redukowania niepewności związanej z konkretną decyzją. Kluczowe znaczenie mają tutaj błędy pierwszego i drugiego rodzaju, które w kontekście IPM wiążą się odpowiednio z nieuzasadnionym uruchomieniem zabiegu oraz zaniechaniem interwencji mimo rzeczywistego zagrożenia przekroczeniem progu szkodliwości. Oba błędy mają odmienny profil kosztów: niepotrzebny zabieg generuje wydatki, potencjalne szkody środowiskowe i dodatkową presję selekcyjną na populację szkodnika, podczas gdy opóźniona interwencja może prowadzić do nieodwracalnych strat plonu.

Optymalny schemat monitoringu powinien zatem uwzględniać nie tylko dokładność statystyczną, lecz również asymetrię następstw różnych rodzajów błędów. W ekonomice informacji wartość kolejnej obserwacji zależy od jej zdolności do zmiany decyzji oraz od kosztu pobrania i analizy próbki. Nie istnieje więc jeden uniwersalny poziom intensywności monitoringu odpowiedni dla wszystkich upraw i stadiów rozwoju organizmów antagonistycznych.

Współczesne systemy prognozowania zagrożeń coraz częściej wykorzystują modele fenologiczne oparte na temperaturze, zakładające zależność tempa rozwoju owada od warunków termicznych. W klasycznej postaci określa się sumę temperatur efektywnych (degree-days), obliczaną jako skumulowana nadwyżka temperatury środowiska ponad ustalony próg rozwojowy. Należy jednak zauważyć, że proste modele liniowe są poprawnym przybliżeniem głównie w określonym zakresie temperatur; w pobliżu dolnej i górnej granicy rozwoju reakcja fizjologiczna może wykazywać wyraźną nieliniowość.

Przy wysokiej temperaturze tempo rozwoju nie musi stale wzrastać ze względu na możliwe zaburzenia enzymatyczne, zwiększoną śmiertelność i ograniczenie reprodukcji. Model oparty wyłącznie na średniej temperaturze dobowej może zatem nie uwzględniać następstw krótkotrwałego przegrzewania się roślin oraz larw znajdujących się na ich powierzchni. Istotne jest także rozróżnienie pomiędzy temperaturą mierzoną przez standardową stację meteorologiczną a mikroklimatem rzeczywiście doświadczanym przez owada. W gęstym łanie warunki termiczne i wilgotnościowe mogą znacząco różnić się pomiędzy dolnymi a górnymi częściami roślin, a bezpośrednie nasłonecznienie określonych organów może prowadzić do temperatur wyższych niż w otaczającym powietrzu. Z tego względu zaawansowane modele fenologiczne wymagają kalibracji dla lokalnych warunków, uwzględniającej biologię konkretnej populacji oraz rozkład temperatur w rzeczywistym środowisku jej rozwoju.

Cyfrowy monitoring jako wsparcie, a nie substytut diagnozy biologicznej

Rozwój cyfrowych systemów monitorowania pozwala na integrację danych z pułapek feromonowych, kamer, czujników meteorologicznych oraz obserwacji terenowych producentów. Duży potencjał drzemie w wykorzystaniu analizy obrazu i metod uczenia głębokiego do automatycznego rozpoznawania owadów znajdujących się na powierzchni pułapek.

Systemy te mogą ograniczyć koszty rutynowego liczenia organizmów i zwiększyć częstotliwość pomiarów, jednak ich wiarygodność zależy od reprezentatywności danych wykorzystanych do trenowania modeli. Algorytm wykazujący wysoką trafność klasyfikacji w warunkach laboratoryjnych może okazać się znacznie mniej skuteczny w środowisku o innym oświetleniu, kolorze tła, stopniu zanieczyszczenia pułapki czy składzie gatunkowym owadów. W badaniu opublikowanym w "Pest Management Science" Song-Quan Ong i Toke Thomas Høy przeanalizowali wpływ barwy powierzchni lepowych na skuteczność modeli rozpoznających gatunki owadów, wskazując, że wizualne właściwości samego urządzenia pomiarowego mogą silnie oddziaływać na system klasyfikacyjny. Jest to kluczowe dla informatyki stosowanej w biologii, gdyż algorytm może opierać się na korelacjach między obiektem a tłem, które stają się niestabilne po zmianie warunków pracy. Właściwa walidacja wymaga zatem testowania systemu na danych pochodzących z różnych pól, sezonów i urządzeń niż te użyte podczas uczenia modelu.

Należy przy tym odróżnić automatyczną identyfikację obrazu owada od rzeczywistej diagnozy ryzyka biologicznego. Model komputerowy może poprawnie rozpoznawać gatunek na fotografii, lecz nie posiada informacji o liczbie jaj na roślinach, lokalnej aktywności parazytoidów czy zdolności uprawy do kompensowania uszkodzeń. Możliwe są również błędy wynikające z nierównomiernej liczebności gatunków w danych uczących; algorytm może osiągać wysoką średnią trafność, jednocześnie systematycznie myląc gatunki rzadkie, lecz gospodarczo istotne. Z tego względu ocena powinna uwzględniać nie tylko ogólny procent poprawnych klasyfikacji, ale także czułość, precyzję i charakterystykę błędów dla konkretnych kategorii biologicznych. Istotny jest również sposób interpretacji prawdopodobieństw generowanych przez model – wynik wskazujący 90-procentową pewność nie musi odpowiadać rzeczywistemu prawdopodobieństwu poprawnej identyfikacji, jeśli system nie został odpowiednio skalibrowany.

Cyfrowy monitoring powinien zatem stanowić narzędzie wspomagania decyzji, a nie autonomiczny substytut obserwacji biologicznej i profesjonalnej interpretacji danych. W praktyce wartościowe są systemy przekazujące przypadki niejednoznaczne do oceny eksperta oraz stopniowo doskonalące modele na podstawie zweryfikowanych obserwacji terenowych. Prowadzi to do konieczności

integracji danych fenologicznych, populacyjnych i genetycznych, gdyż sama liczebność szkodników nie dostarcza pełnej informacji niezbędnej do wyboru skutecznej interwencji. W przypadku Plutella xylostella kluczowa jest możliwość występowania populacji odpornych na różne grupy substancji czynnych, których rozpoznanie wymaga badań diagnostycznych obejmujących mutacje w receptorach rjanodynowych, napięciozależnych kanałach sodowych albo białkach uczestniczących w działaniu toksyn Bt. Badania molekularne mogą ujawniać zwiększoną aktywność genów odpowiedzialnych za detoksykację, w tym cytochromów P450 i transferaz glutationowych, choć należy pamiętać, że obecność wariantu genetycznego lub podwyższona ekspresja nie zawsze przekłada się na identyczny poziom odporności fenotypowej.

Wymagana jest zatem walidacja wyników metodami bioanalitycznymi, obejmującymi pomiar przeżywalności owadów po ekspozycji na substancje i porównanie reakcji z liniami referencyjnymi. Z punktu widzenia zarządzania gospodarstwem kluczowe staje się wykrywanie narastania odporności przed wystąpieniem całkowitej nieskuteczności zabiegów, co pozwala dostosować strategię ochronną i ograniczyć presję selekcyjną.

Nie oznacza to jednak, że pełne sekwencjonowanie genomu każdej lokalnej populacji jest ekonomicznie uzasadnione; w wielu sytuacjach wystarczające mogą być odpowiednio dobrane testy molekularne i fenotypowe. Właściwa organizacja diagnostyki wymaga dopasowania precyzji badania do wartości decyzji, którą jego wynik może zmienić.

Krajobraz i biologiczna kontrola jako systemy regulacji

Kluczowe jest rozpoznawanie zależności pomiędzy strukturą krajobrazu a przestrzennym rozmieszczeniem populacji szkodników, ponieważ pole uprawne nie stanowi biologicznie izolowanego układu. Owady przemieszczają się między sąsiadującymi gospodarstwami, siedliskami półnaturalnymi, plantacjami roślin pokrewnych oraz obszarami przechowywania materiału rozmnożeniowego.

Dynamika zagrożenia na pojedynczym polu może zatem zależeć od procesów zachodzących poza granicami gospodarstwa, których nie da się w pełni zrozumieć, analizując wyłącznie lokalne dane. W ramach ekologii przestrzennej interesujące są modele metapopulacyjne, według których określone płaty siedlisk są zasiedlane i opuszczane w wyniku migracji, lokalnego rozmnażania oraz wymierania populacji. W takim systemie niektóre obszary pełnią funkcję źródeł osobników, podczas gdy inne są siedliskami, w których lokalna reprodukcja nie wystarcza do utrzymania liczebności bez ciągłego napływu nowych jednostek. Rozróżnienie to jest kluczowe dla projektowania ochrony regionalnej; intensywna interwencja na jednym polu może przynieść

ograniczony efekt długoterminowy, jeśli sąsiednie obszary stale dostarczają dużą liczbę szkodników. Jednocześnie właściwie zaprojektowane siedliska półnaturalne mogą zwiększać dostępność naturalnych wrogów fitofagów, których migracja do uprawy pozwala ograniczyć presję owadów. Struktura krajobrazu staje się więc jednocześnie czynnikiem sprzyjającym zagrożeniom i zasobem umożliwiającym ich biologiczną regulację.

W obszarze biologicznej kontroli niezbędne jest rozróżnienie pomiędzy klasyczną introdukcją naturalnego wroga, jego okresowym uwalnianiem a ochroną już istniejących populacji organizmów pożytecznych. Pierwsze podejście polega na wprowadzaniu wybranego organizmu do środowiska, by ograniczał on liczebność konkretnego antagonisty – najczęściej w przypadku gatunków inwazyjnych lub takich, które wcześniej nie miały skutecznych regulatorów. Drugie obejmuje produkcję i uwalnianie organizmów w celu zwiększenia ich lokalnej aktywności w odpowiednim okresie produkcyjnym. Trzecie, określane jako conservation biological control, polega na kształtowaniu warunków sprzyjających przeżywaniu, rozmnażaniu i skuteczności naturalnych wrogów już występujących w agroekosystemie. Każde z tych rozwiązań wiąże się z odmiennym profilem kosztów, ryzyka i wymagań ekologicznych.

Introdukcja organizmu do nowego środowiska wymaga starannej oceny jego zakresu gospodarzy oraz możliwych oddziaływań na organizmy nietarczowe, gdyż efekt ten może utrzymywać się długo po zakończeniu zabiegu. Uwalnianie organizmów pożytecznych wymaga natomiast synchronizacji z dostępnością gospodarzy lub ofiar oraz zapewnienia warunków umożliwiających ich skuteczne działanie. Ochrona istniejących populacji bywa mniej kosztowna pod względem zakupu organizmów, lecz wymaga właściwego zarządzania siedliskami, substancjami czynnymi i zasobami pokarmowymi. W każdym z tych przypadków kluczowa staje się ocena rzeczywistego ograniczenia strat, a nie jedynie wykazanie obecności danego naturalnego wroga w środowisku.

Biologiczna kontrola szkodników wymaga analizy dynamiki interakcji

W przypadku tantnisia krzyżowiaczka kluczową rolę odgrywają parazytoidy larwalne, m.in. z rodzajów Cotesia i Diadegma, których aktywność ogranicza przeżywalność poszczególnych stadiów rozwojowych szkodnika. Cotesia vestalis (znana również jako Cotesia plutellae) jest endoparazytoidem związanym z larwami tantnisia, natomiast Diadegma semiclausum, choć wykorzystuje podobną grupę gospodarzy, cechuje się odmiennymi właściwościami ekologicznymi w zakresie wymagań klimatycznych i zachowań poszukiwawczych.

Wysoka intensywność parazytyzmu obserwowana w niektórych doświadczeniach nie może być jednak bezpośrednio przenoszona na wszystkie regiony i systemy uprawowe. Choć w określonych warunkach udział larw spasożytowanych bywa bardzo wysoki, rzeczywista wartość tej interakcji dla ochrony roślin zależy od tego, czy szkodnik zostaje unieszkodliwiony przed wyrządzeniem znaczących szkód. Istotne jest, że rozwój parazytoida wewnątrz gospodarza nie zawsze przerywa żerowanie w sposób natychmiastowy – larwa może nadal pobierać pokarm przez pewien czas przed śmiercią lub przepoczwarczeniem. Z punktu widzenia IPM konieczne jest zatem analizowanie nie tylko procentu spasożytowania, lecz także dynamiki konsumpcji tkanek i końcowego wpływu na plon. Dodatkowo skuteczność poszczególnych gatunków zależy od temperatury i wilgotności, co sprawia, że rozwiązania efektywne w jednym klimacie mogą okazać się mniej trwałe w innym.

Właściwa ocena naturalnych wrogów wymaga odwołania do teorii odpowiedzi funkcjonalnych i liczebnościowych, których podstawy sformułował C. S. Holling. Odpowiedź funkcjonalna opisuje zależność między zagęszczeniem ofiar a liczbą organizmów wykorzystywanych przez pojedynczego drapieżnika w określonym czasie, natomiast odpowiedź liczebnościowa dotyczy zmian populacji drapieżników w zależności od dostępności zasobu.

W klasycznych modelach wyróżnia się odpowiedzi typu I, II i III, które odzwierciedlają różne mechanizmy ograniczające tempo konsumpcji. Szczególne znaczenie ma odpowiedź typu II, w której wzrost liczby wykorzystywanych ofiar spowalnia z powodu ograniczeń czasowych związanych z ich wyszukiwaniem, chwytaniem i przetwarzaniem. Z kolei odpowiedź typu III przyjmuje często formę sigmoidalną; niska intensywność konsumpcji przy małym zagęszczeniu ofiar może wynikać ze zmiany preferencji pokarmowych lub trudności w wykryciu rzadkiego zasobu. Modele matematyczne nie stanowią jednak pełnego opisu rzeczywistych interakcji, gdyż zachowania drapieżników i parazytoidów zależą także od struktury siedliska, obecności alternatywnych ofiar oraz konkurencji między naturalnymi wrogami. W kontekście biologicznej kontroli należy pamiętać, że organizm skuteczny w doświadczeniach przy dużym zagęszczeniu ofiar nie musi równie efektywnie ograniczać populacji w warunkach polowych, gdzie szkodniki są rozproszone w złożonym środowisku przestrzennym. Dlatego ochrona naturalnych wrogów wymaga odpowiedniego kształtowania dostępności zasobów i siedlisk, co wykracza poza samą obecność organizmu szkodliwego.

Warto dodać, że wiele błonkówek parazytoidalnych w stadium dorosłym wykorzystuje nektar lub inne źródła cukrów, podczas gdy ich larwy rozwijają się kosztem owadów gospodarzy.

Funkcjonalna infrastruktura ekologiczna a realne usługi regulacyjne

Dostępność odpowiednich kwiatów w pobliżu uprawy może wpływać na przeżywalność osobników dorosłych, ich aktywność reprodukcyjną oraz zdolność poszukiwania gospodarzy. Kluczowa jest jednak budowa kwiatu i dostępność zasobów dla aparatów gębowych konkretnych organizmów, gdyż nie każda roślina kwitnąca dostarcza tak samo użytecznego pokarmu wszystkim parazytoidom. Podobnie roślinność półnaturalna może zapewniać schronienie oraz alternatywne źródła pokarmu dla drapieżnych chrząszczy, pająków i złotooków, lecz jej rzeczywisty wpływ na kontrolę szkodników zależy od zdolności tych organizmów do przemieszczania się do uprawy i skutecznego wykorzystywania występujących tam ofiar. Z punktu widzenia biologii wspólnot należy zauważyć, że zwiększenie liczebności naturalnych wrogów nie musi automatycznie prowadzić do proporcjonalnego wzrostu presji drapieżniczej na konkretny gatunek szkodnika. Organizmy te mogą zmieniać preferencje pokarmowe, wykorzystywać inne zasoby albo oddziaływać konkurencyjnie na pozostałych drapieżników. Efektywność infrastruktury ekologicznej powinna zatem być mierzona przez rzeczywiste usługi regulacyjne, a nie jedynie przez liczbę gatunków albo osobników stwierdzanych w jej obrębie.

Istotne dane w tym zakresie dostarczyła opublikowana w 2020 roku w "Ecology Letters" metaanaliza Matthiasa Albrechta i współpracowników, obejmująca 35 badań oraz dane z kilkuset lokalizacji rolniczych. Autorzy przeanalizowali wpływ pasów kwietnych i żywopłotów na biologiczną kontrolę szkodników, zapylanie i wielkość plonów w sąsiadujących uprawach. Wykazano, że pola położone w pobliżu pasów kwietnych charakteryzowały się przeciętnie o około 16% większą intensywnością usług biologicznej kontroli szkodników niż pola kontrolne; efekt żywopłotów był natomiast bardziej zmienny i nie uzyskał tak jednoznacznego potwierdzenia statystycznego. Warto zauważyć, że skuteczność wspierania zapylania zależała od różnorodności gatunkowej roślin kwiatowych i czasu funkcjonowania określonych nasadzeń. Jednocześnie autorzy nie wykazali stabilnego, istotnego statystycznie zwiększenia plonu we wszystkich analizowanych systemach. Wynik ten jest cenny, ponieważ obnaża różnicę pomiędzy poprawą konkretnej funkcji ekosystemowej a końcowym rezultatem gospodarczym.

Zwiększona aktywność naturalnych wrogów może ograniczać presję szkodników, ale nie musi prowadzić do wyższego plonu, jeśli zagrożenie było pierwotnie niewielkie albo jeśli produktywność ograniczają inne czynniki, takie jak niedobór wody, składników mineralnych czy niekorzystne warunki termiczne. Właśnie dlatego projektowanie pasów kwietnych powinno uwzględniać ich funkcjonalną zgodność z rzeczywistymi potrzebami agroekosystemu, zamiast przyjmować, że każda

dodatkowa powierzchnia roślinności kwitnącej automatycznie przekłada się na wzrost korzyści ekonomicznych.

Synergia ekologiczna i systemy push-pull jako alternatywa dla prostych interwencji

Kluczową kwestią są interakcje pomiędzy naturalnymi wrogami, gdyż zwiększanie różnorodności drapieżników i parazytoidów nie musi prowadzić do prostego sumowania ich skuteczności. W określonych układach możliwe jest występowanie drapieżnictwa wewnątrz gildii (intraguild predation), polegającego na tym, że jeden naturalny wróg konsumuje innego organizma uczestniczącego w ograniczaniu populacji tego samego szkodnika. Równocześnie niektóre gatunki mogą konkurować o dostęp do ofiar lub zmieniać zachowania konsumentów, co wywołuje pośrednie efekty – korzystne lub niekorzystne dla rośliny. Zjawisko to jest szczególnie istotne w przypadku hiperparazytoidów, których obecność może ograniczać skuteczność pierwotnych parazytoidów rozwijających się w organizmach szkodliwych. Tym samym zwiększenie różnorodności organizmów pożytecznych w sensie taksonomicznym nie zawsze oznacza równoczesny wzrost natężenia funkcji ochronnej.

Warto zwrócić uwagę na komplementarność nisz naturalnych wrogów, których poszczególne gatunki mogą wykorzystywać odmienne stadia rozwojowe szkodnika albo polować w różnych częściach rośliny. Jeżeli jeden drapieżnik ogranicza liczebność jaj, a inny skutecznie eliminuje larwy, ich wspólne działanie zapewnia szerszą ochronę niż w przypadku dwóch organizmów konkurujących o identyczny zasób. Rzeczywiste potwierdzenie tej komplementarności wymaga jednak doświadczeń pozwalających rozdzielić efekty poszczególnych gatunków od efektów ich współwystępowania. Ta złożoność wskazuje na ograniczenia prostych programów ochronnych, opartych wyłącznie na maksymalizowaniu liczby introdukowanych organizmów.

Praktycznym rozwinięciem ekologii chemicznej i teorii organizacji przestrzennej agroekosystemów jest technologia push-pull. Jej zasadnicza koncepcja polega na jednoczesnym ograniczaniu atrakcyjności uprawy głównej dla określonych szkodników oraz zwiększaniu prawdopodobieństwa ich przemieszczania się do wybranych obszarów alternatywnych. Mechanizm odpychający (push) może wykorzystywać substancje lotne, właściwości powierzchniowe roślin lub inne bodźce wpływające na zachowania konsumentów, natomiast komponent przywabiający (pull) opiera się na zastosowaniu roślin pułapkowych o wyższej atrakcyjności reprodukcyjnej lub pokarmowej.

Skuteczność całego systemu nie wynika wyłącznie z działania jednego metabolitu, lecz z organizacji przestrzennej kilku gatunków roślin, których rozmieszczenie wpływa na decyzje podejmowane przez owady podczas lokalizowania gospodarza. W ramach ekologii sensorycznej należy zauważyć, że szkodnik porusza się w środowisku zawierającym wiele sygnałów, których względna atrakcyjność zależy od stężenia, odległości i wcześniejszego doświadczenia osobnika. Dlatego właściwości substancji uznawanej za odstraszającą w prostym doświadczeniu laboratoryjnym nie muszą prowadzić do identycznego rezultatu w rzeczywistym łanie, gdzie obecność innych roślin i zmienny przepływ powietrza modyfikują orientację konsumenta. Technologia push-pull powinna być zatem analizowana jako system ekologiczny, którego skuteczność wymaga wykazania w warunkach polowych, a nie jako prosta suma dwóch zjawisk: chemicznego przywabiania i odstraszania.

Jednym z najbardziej znanych przykładów tego podejścia są systemy uprawy kukurydzy rozwijane w Afryce Wschodniej. Wprowadza się w nich odpowiednie gatunki rodzaju Desmodium pomiędzy rzędami roślin uprawnych, natomiast na obrzeżach pola wykorzystuje się wybrane trawy pełniące funkcję komponentu pułapkowego. W klasycznych rozwiązaniach kluczowa była ochrona przed określonymi gatunkami motyli uszkadzających łodygi zbóż; późniejsze badania objęły również przeciwdziałanie presji inwazyjnej sówce Spodoptera frugiperda.

Z punktu widzenia rolnictwa system ten posiada więcej niż jedną korzystną funkcję: rośliny z rodzaju Desmodium mogą wiązać azot atmosferyczny dzięki symbiozom bakteryjnym, dostarczać materii organicznej i ograniczać rozwój niektórych chwastów. Istotna jest tu kwestia zarazy z rodzaju Striga, której nasiona kiełkują w odpowiedzi na sygnały chemiczne pochodzące od gospodarza. W niektórych systemach obecność Desmodium może wpływać na procesy zachodzące w ryzosferze i ograniczać skuteczność pasożytniczego zasiedlania roślin zbożowych. Technologia ta może zatem poprawiać produkcyjność nie tylko przez ograniczanie owadów, lecz również przez zmianę struktury biologicznej i chemicznej gleby. W ujęciu ekonomiki produkcji kilka funkcjonalnie powiązanych korzyści zwiększa opłacalność interwencji, choć jednocześnie utrudnia jednoznaczne przypisanie wzrostu plonu do konkretnego mechanizmu biologicznego. Ważnych danych dostarczyły badania Charlesa Midegi, Jimmy'ego Pittchara, Zeyaura Khana i współpracowników z 2018 roku (opublikowane w "Crop Protection"), w których analizowano klimatycznie zaadaptowany system push-pull w gospodarstwach rolnych Kenii, Ugandy i Tanzanii.

W badaniu obejmującym 250 producentów porównywano pola kukurydzy prowadzone w systemie współrzędnym z uprawami monokulturowymi, uwzględniając liczebność larw Spodoptera frugiperda, odsetek uszkodzonych roślin i wielkość plonu. W analizowanych warunkach stwierdzono przeciętnie o 82,7% mniejszą liczbę larw na roślinę oraz o 86,7% mniejszą

intensywność uszkodzeń w systemach push-pull, natomiast plony ziarna były około 2,7 razy wyższe niż na polach monokulturowych.

Skuteczność praktyczna nie zawsze wynika z prostych mechanizmów

Wyniki te dostarczyły istotnego potwierdzenia potencjału technologii w warunkach produkcyjnych, a kluczowe okazało się wykorzystanie odmian roślin towarzyszących przystosowanych do środowisk o ograniczonej dostępności wody. Nie należy jednak traktować uzyskanych wartości jako uniwersalnej gwarancji ograniczenia strat w każdym regionie, gdyż wielkość efektu zależy od presji szkodnika, zasobności gleby, klimatu i sposobu prowadzenia uprawy. Ponadto wyraźna przewaga plonowania może być rezultatem współdziałania kilku procesów: ograniczenia uszkodzeń, zwiększenia dostępności składników mineralnych oraz zmniejszenia konkurencji ze strony niektórych chwastów. Badanie potwierdza zatem wartość określonego systemu agronomicznego, lecz samo w sobie nie rozstrzyga kwestii molekularnej i behawioralnej podstawy uzyskanego efektu. W imię rygoru naukowego warto zauważyć, że późniejsze badania zakwestionowały część wcześniejszych interpretacji mechanizmu działania Desmodium wobec Spodoptera frugiperda.

W 2024 roku Anna Erdei, Aneth David i współpracownicy opublikowali w "eLife" badanie analizujące emisję substancji lotnych oraz zachowania owadów wobec kukurydzy w odpowiednim otoczeniu chemicznym. Autorzy nie stwierdzili w swoich warunkach eksperymentalnych intensywnej emisji wcześniej wskazywanych terpenoidów, a w doświadczeniach nad wyborem miejsca składania jaj nie wykazali jednoznacznego działania odstraszającego zapachu Desmodium. Jednocześnie zidentyfikowali inny mechanizm: młode larwy S. frugiperda mogą wykazywać zainteresowanie rośliną towarzyszącą, lecz nie uzyskują na niej odpowiednich warunków rozwoju.

Istotne okazały się również struktury epidermalne wzmacniane krzemionką, których właściwości mechaniczne mogły prowadzić do unieruchamiania starszych larw. Zjawisko to wskazuje na możliwość występowania funkcjonalnej pułapki ekologicznej, w której organizm antagonistyczny podejmuje zachowanie korzystne pod względem rozpoznawania zasobu, lecz prowadzące do niekorzystnych następstw rozwojowych. Wynik ten stanowi ważne przypomnienie, że skuteczność całego systemu ochronnego nie gwarantuje poprawności każdego szczegółu wcześniejszego wyjaśnienia jego działania.

Dalsze badania opublikowane w 2025 roku ponownie wykazały emisję określonych substancji lotnych przez Desmodium intortum i Desmodium incanum, wskazując, że ich profile chemiczne

mogą zawierać związki o potencjalnym znaczeniu dla zachowań fitofagów i naturalnych wrogów. Jednak wyniki doświadczeń behawioralnych dostarczyły jedynie ograniczonego i niejednoznacznego wsparcia dla hipotezy silnego odstraszania samic Spodoptera frugiperda przez samą mieszaninę substancji lotnych. Niezbędne jest zatem rozróżnienie trzech poziomów twierdzeń: skuteczności systemu uprawowego w ograniczaniu uszkodzeń, istnienia określonych bodźców chemicznych oraz wykazania, że właśnie te bodźce stanowią główną przyczynę efektu ochronnego. Pierwszy poziom może być dobrze udokumentowany w określonych warunkach polowych nawet wtedy, gdy trzeci pozostaje przedmiotem sporu naukowego. Właśnie taka sytuacja występuje w przypadku części badań nad Desmodium, których wyniki wskazują na złożoność mechanizmów obejmujących emisję substancji lotnych, interakcje podziemne, właściwości mechaniczne roślin i zachowania larw.

W kontekście metodologicznym kluczowe jest to, że naukowa rewizja wyjaśnienia mechanistycznego nie jest równoznaczna z automatycznym odrzuceniem wartości praktycznej technologii. Stanowi ona natomiast podstawę jej bardziej precyzyjnego doskonalenia, którego celem może być zwiększanie udziału tych komponentów, których korzystne działanie uzyskało mocne potwierdzenie eksperymentalne.

Agrotechnika i rośliny pułapkowe jako narzędzia zarządzania populacją

Doświadczenia te stanowią cenną podstawę do rozróżnienia rośliny odstraszającej od pułapkowej, której działanie polega na przywabianiu organizmu do środowiska nieodpowiedniego dla jego dalszego rozwoju. W klasycznym ujęciu pułapkowość opiera się na większej atrakcyjności określonego gospodarza w porównaniu z rośliną chronioną; biologiczny rezultat zależy jednak od tego, czy szkodnik może skutecznie rozmnażać się na roślinie alternatywnej.

Jeśli organizm składa na niej jaja, lecz rozwijające się larwy nie osiągają dojrzałości, powstaje mechanizm ograniczający przyszłą liczebność populacji. Jeżeli natomiast roślina pułapkowa umożliwia efektywny rozwój kolejnych pokoleń, może stać się źródłem wtórnej presji na główną uprawę. Kluczowe jest zatem rozpoznawanie wartości konkretnego gatunku rośliny zarówno dla zachowań reprodukcyjnych dorosłych owadów, jak i dla przeżywalności ich larw. Właściwe projektowanie technologii wymaga analizy całego cyklu życiowego konsumenta, a nie wyłącznie jego chwilowej reakcji na zapach czy barwę.

Istotne znaczenie ma również rozmieszczenie roślin pułapkowych, gdyż ich lokalizacja wpływa na zachowania przelotowe dorosłych osobników oraz mobilność larw. Z punktu widzenia gospodarki przestrzennej agroekosystemu celem staje się tworzenie odpowiednich gradientów atrakcyjności oraz ograniczanie niepożądanego transferu szkodników pomiędzy poszczególnymi elementami systemu. Równie ważne są metody agrotechniczne, których funkcja ochronna wynika ze zmiany warunków funkcjonowania roślin i ich konsumentów, a nie z bezpośredniego zastosowania substancji toksycznej. Płodozmian może ograniczać dostępność gospodarzy dla organizmów silnie związanych z konkretnymi uprawami, choć jego skuteczność zależy od mobilności szkodnika, zdolności wykorzystywania innych roślin i możliwości przetrwania w niekorzystnym okresie. Zmianowanie bywa zatem szczególnie użyteczne wobec gatunków o ograniczonej zdolności przemieszczania się lub wymagających specyficznego środowiska przez znaczną część cyklu życiowego; w przypadku owadów silnie migrujących jego efektywność może być znacznie mniejsza. Podobnie odpowiedni termin siewu pozwala przesunąć wrażliwą fazę rozwoju rośliny poza okres największej aktywności fitofaga, choć wymaga to uwzględnienia temperatury gleby, dostępności wody i innych ograniczeń fizjologicznych.

Ważne jest także usuwanie resztek pożniwnych, które mogą stanowić siedliska przetrwania szkodników, przy czym zakres tych działań powinien być dostosowany do biologii gatunku oraz zasad ochrony gleby i zachowania materii organicznej. Metody agrotechniczne nie mogą być zatem traktowane jako zbiór zabiegów automatycznie korzystnych w każdej sytuacji. Ich wartość ochronna zależy od lokalnego układu biologicznego, a skutki należy oceniać łącznie z wpływem na żyzność gleby, bilans wody i produkcyjność gospodarstwa. Odrębny wymiar stanowi wykorzystanie odmian odpornych i tolerancyjnych, co pozwala ograniczać straty bez konieczności każdorazowego stosowania dodatkowych zabiegów ochronnych. Odporność genetyczna pozostaje jednak właściwością zróżnicowaną, obejmującą mechanizmy antyksenozy, antybiozy i tolerancji, których rezultaty nie są identyczne.

Mechanizmy odporności roślin i chemia w kontekście presji selekcyjnej

Antyksenoza może ograniczać skłonność owada do zasiedlania konkretnej odmiany, lecz nie musi wpływać na jego przeżywalność po rozpoczęciu żerowania. Antybioza z kolei potrafi spowolnić wzrost i reprodukcję konsumenta, choć jej skuteczność zależy od zdolności detoksykacyjnych szkodnika oraz struktury pokarmu. Tolerancja natomiast pozwala ograniczać straty w plonie mimo

wystąpienia uszkodzeń, co niekoniecznie prowadzi do redukcji liczebności samego organizmu antagonistycznego.

W kontekście zarządzania odpornością mechanizmy te wywołują odmienne rodzaje presji selekcyjnej. Silna antybioza wobec konkretnego metabolitu może sprzyjać rozpowszechnianiu wariantów umożliwiających jego neutralizację, podczas gdy tolerancja rośliny pozwala utrzymać produktywność bez tak intensywnego ograniczania przeżywalności fitofaga. Nie oznacza to jednak, że odmiany tolerancyjne zawsze wywierają słabszą presję ewolucyjną; ich wpływ na dostępność zasobów i strukturę populacji może prowadzić do bardziej złożonych następstw.

Właściwy program hodowlany powinien zatem uwzględniać biologiczny sposób działania odporności oraz jego wpływ na długoterminową dynamikę populacji szkodnika. Kluczowym elementem zintegrowanej ochrony jest stosowanie preparatów chemicznych w sposób ograniczający ryzyko przyspieszonej ewolucji odporności. Klasyfikacja opracowana przez Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) pozwala grupować substancje według ich molekularnych miejsc oddziaływania, co stanowi podstawę do planowania rotacji. Należy pamiętać, że naprzemienne stosowanie preparatów o różnych nazwach handlowych nie jest równoznaczne ze zmianą mechanizmu działania, jeśli ich substancje czynne należą do tej samej grupy IRAC. W takim przypadku presja selekcyjna wobec określonych wariantów odpornościowych pozostaje podobna, mimo formalnej zmiany produktu. Z punktu widzenia genetyki populacyjnej istotne jest rozróżnienie między odpornością wynikającą ze zmiany miejsca docelowego a odpornością metaboliczną, gdyż niektóre enzymy detoksykacyjne mogą oddziaływać na substancje z różnych grup mechanistycznych. Oznacza to, że nawet rotacja między formalnie odmiennymi grupami nie musi całkowicie eliminować ryzyka odporności krzyżowej.

Wytyczne IRAC podkreślają znaczenie organizowania zabiegów w odpowiednich oknach czasowych, dostosowanych do biologii szkodnika i jego kolejnych pokoleń, zamiast wielokrotnego oddziaływania tym samym mechanizmem na następujące po sobie generacje. Ważne jest przy tym uwzględnienie trwałości substancji i rzeczywistego okresu ekspozycji owadów, który nie zawsze kończy się w dniu wykonania zabiegu. W przypadku tantnisia krzyżowiaczka kluczowe staje się przeciwdziałanie wielokrotnemu stosowaniu tej samej klasy środków w kolejnych okresach intensywnego rozwoju populacji. Gatunek ten wykazuje wysoką zdolność do ewolucji odporności, co opisano w odniesieniu do wielu grup insektycydów, m.in. pyretroidów, diamidów oraz produktów pochodzenia mikrobiologicznego.

Diagnostyka błędów i zgodność prawna jako filary zarządzania ryzykiem

Należy pamiętać, że brak oczekiwanej skuteczności zabiegu nie musi automatycznie oznaczać odporności genetycznej populacji. Może on wynikać z nieodpowiedniego terminu zastosowania, niewystarczającego pokrycia powierzchni liści, niesprzyjających warunków meteorologicznych lub obecności stadiów rozwojowych wykazujących mniejszą wrażliwość na dany preparat. Właściwa diagnostyka wymaga więc rozdzielenia błędu agrotechnicznego od rzeczywistego zmniejszenia wrażliwości organizmu. Z drugiej strony powtarzanie zabiegu tą samą substancją po wcześniejszym niepowodzeniu, bez rozpoznania przyczyny, może dodatkowo zwiększać presję selekcyjną i prowadzić do dalszego pogorszenia skuteczności. W zaleceniach IRAC dotyczących tantnisia podkreśla się znaczenie odpowiedniego monitoringu, ograniczania zbędnych aplikacji oraz stosowania substancji o odmiennych mechanizmach działania. W konkretnych warunkach kluczowe jest także zachowanie populacji naturalnych wrogów, gdyż ich zniszczenie może spowodować wzrost zagęszczenia szkodników po ustąpieniu bezpośredniego działania preparatu.

W toksykologii środowiskowej istotne jest rozróżnienie pomiędzy selektywnością fizjologiczną substancji a selektywnością wynikającą ze sposobu i czasu jej zastosowania. Preparat może wykazywać względnie niską toksyczność wobec określonego parazytoida w standardowej ekspozycji laboratoryjnej, jednak jego rzeczywiste oddziaływanie w polu zależy od miejsca aplikacji, obecności kwiatów, czasu aktywności owadów pożytecznych i trwałości pozostałości na powierzchni roślin. Równocześnie substancja o szerokim zakresie toksyczności może w określonych warunkach prowadzić do mniejszej całkowitej ekspozycji organizmów nietarczowych, jeśli zostanie zastosowana w sposób ściśle ograniczony przestrzennie i czasowo. Nie oznacza to jednak, że selektywność aplikacyjna może zawsze zastępować korzystniejszy profil toksykologiczny preparatu. Właściwa ocena wymaga uwzględnienia obu tych komponentów oraz ich współdziałania.

Ważne są również skutki subletalne; owady mogą przeżyć kontakt z substancją, a jednocześnie wykazywać zmiany w aktywności reprodukcyjnej, zachowaniach poszukiwawczych lub zdolności lokalizowania gospodarzy. W przypadku parazytoidów nawet niewielkie ograniczenie efektywności poszukiwania larw może prowadzić do znaczących następstw populacyjnych, jeśli zmniejsza liczbę skutecznie zaatakowanych gospodarzy w trakcie życia samicy. Z tego względu badania kompatybilności chemicznej i biologicznej ochrony powinny obejmować nie tylko bezpośrednią śmiertelność, lecz także długoterminowe funkcjonowanie organizmów pożytecznych.

Zasadnicze znaczenie dla polskiej praktyki rolniczej posiada odpowiedzialne korzystanie z informacji o dopuszczeniu konkretnych produktów do stosowania. Nie każdy preparat opisany w

międzynarodowej literaturze naukowej posiada aktualne zezwolenie na stosowanie w Polsce, a dopuszczenie określonej substancji czynnej na poziomie Unii Europejskiej nie jest automatycznie równoznaczne z autoryzacją każdego produktu i zastosowania w krajowym systemie prawnym.

Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi publikuje aktualizowany rejestr środków ochrony roślin, umożliwiający weryfikację ich statusu, przy czym szczegółowe warunki stosowania wynikają z właściwych zezwoleń i etykiet. Wersja rejestru z 23 września 2026 roku stanowi punkt odniesienia dla badania dostępności preparatów, lecz w praktyce konieczne pozostaje sprawdzenie obowiązującego zezwolenia konkretnego produktu i odpowiedniego zastosowania. Kluczowe są tu ograniczenia dotyczące gatunku uprawy, organizmu zwalczanego, dawki, maksymalnej liczby zabiegów i okresu karencji. Nawet przekonujące wyniki badań nad skutecznością danej substancji nie stanowią podstawy do jej dowolnego stosowania poza warunkami przewidzianymi w krajowej dokumentacji rejestracyjnej. W kontekście odpowiedzialności zawodowej i zarządzania ryzykiem zgodność prawna stanowi odrębny warunek prawidłowego działania, którego nie zastępuje sama biologiczna skuteczność technologii.

Ekonomiczna i technologiczna optymalizacja decyzji o interwencji

Zagadnienie to prowadzi do szerszego problemu oceny ekonomicznej strategii ochronnych, której nie można ograniczać do prostego porównania cen preparatów. Właściwy rachunek powinien uwzględniać koszt materiału, zabiegu, monitoringu i ewentualnych kolejnych interwencji, a także wpływ na jakość produktu, organizację pracy oraz prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych następstw. Korzyść wynikająca z określonego działania jest zmienną losową, gdyż rzeczywista presja szkodnika może okazać się niższa lub wyższa niż przewidywana w momencie podejmowania decyzji.

Racjonalność wyboru nie powinna być zatem oceniana wyłącznie na podstawie wyniku osiągniętego w jednym sezonie, lecz przez pryzmat informacji i prawdopodobieństw dostępnych w chwili decydowania o działaniu. Kluczowe jest tu rozróżnienie pomiędzy wartością oczekiwaną dochodu a ryzykiem wystąpienia szczególnie niekorzystnego rezultatu. Dwa warianty ochrony mogą charakteryzować się podobną opłacalnością oczekiwaną, lecz znacząco różnić się prawdopodobieństwem poważnych strat, co ma fundamentalne znaczenie dla gospodarstw o ograniczonej płynności finansowej. Producenci mogą przykładać większą wagę do uniknięcia potencjalnej katastrofy niż do maksymalizowania przeciętnego wyniku. Nie oznacza to automatycznej nieracjonalności takiego postępowania; ograniczenia kapitałowe i konsekwencje

nieudanych zbiorów uzasadniają strategie bardziej ostrożne niż te wynikające z prostego dążenia do średniego dochodu. Rozwinięciem klasycznych progów ekonomicznej szkodliwości są modele decyzyjne wykorzystujące rachunek prawdopodobieństwa i bayesowską aktualizację wiedzy.

W takim układzie producent dysponuje początkowym oszacowaniem prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia, opartym na historii wcześniejszych sezonów, warunkach meteorologicznych i biologii szkodnika. Kolejne wyniki monitoringu pozwalają aktualizować to oszacowanie, a decyzja o interwencji zapada na podstawie oczekiwanych kosztów i korzyści dostępnych wariantów działania.

Warto zauważyć, że brak stwierdzenia szkodnika podczas pojedynczej obserwacji nie oznacza jego całkowitej nieobecności, gdyż prawdopodobieństwo wykrycia zależy od metody próbkowania i rzeczywistego zagęszczenia populacji. Wynik negatywny zmniejsza zatem ocenę ryzyka tylko w stopniu zależnym od czułości zastosowanej metody. Podobnie wykrycie pojedynczego osobnika może istotnie zwiększyć ocenę prawdopodobieństwa przyszłego zagrożenia w systemie, w którym szkodnik występuje rzadko, lecz nie musi uzasadniać natychmiastowej interwencji, jeśli jego rozwój ograniczają warunki środowiskowe.

W informatyce rolniczej kluczowa jest możliwość stopniowego integrowania różnych źródeł informacji przy zachowaniu odpowiednich miar niepewności. Dzięki temu system wspomagania decyzji może dostarczać nie tylko prognozy liczebności, lecz także informacji o wiarygodności przewidywania i potencjalnym koszcie błędnego wyboru.

Istotne miejsce w rozwoju IPM zajmują technologie precyzyjnej aplikacji, umożliwiające ograniczanie interwencji do konkretnych fragmentów pola lub organów roślinnych. Ich wartość wynika z przestrzennej niejednorodności presji szkodników – zabieg całopowierzchniowy obejmuje bowiem często obszary niewymagające ochrony. Z punktu widzenia ekologii przestrzennej niezbędne jest jednak rozpoznanie dynamiki przemieszczania się konsumentów, gdyż niewielkie skupisko owadów może stać się źródłem późniejszego zasiedlenia sąsiednich części uprawy. Właściwa strategia lokalnej interwencji wymaga więc nie tylko aktualnej mapy zagęszczenia, lecz także przewidywania rozprzestrzeniania się populacji. Cennym narzędziem stają się tu dane z dronów i kamer wielospektralnych, które identyfikują zmiany właściwości optycznych roślin związane z utratą chlorofilu, uszkodzeniem tkanek lub zaburzeniami gospodarki wodnej.

Nie można jednak przyjmować, że każdy sygnał stresowy rozpoznany zdalnie dowodzi obecności konkretnego gatunku fitofaga. Podobne zmiany widmowe mogą wynikać z suszy, niedoborów pokarmowych, infekcji czy uszkodzeń mechanicznych, a ich właściwa interpretacja wymaga weryfikacji terenowej. Zdalne obrazowanie powinno być zatem traktowane jako narzędzie

identyfikowania obszarów wymagających dodatkowej diagnostyki, a nie uniwersalny substytut entomologicznego rozpoznania przyczyn uszkodzeń.

Synergia zasobów, klimatu i koordynacji regionalnej w IPM

Dla trwałości produkcji rolnej kluczowa jest integracja IPM z gospodarowaniem zasobami glebowymi i wodnymi, gdyż odporność roślin silnie zależy od ich ogólnego stanu fizjologicznego. Niedobór azotu, fosforu lub potasu może ograniczać wzrost i zdolność regeneracji, natomiast nadmierne nawożenie konkretnym składnikiem bywa przyczyną zmian w jakości pokarmowej tkanek, co sprzyja części fitofagów. Intensywna dostępność azotu może zwiększać zawartość wybranych związków o wysokiej wartości pokarmowej dla niektórych konsumentów, jednocześnie wpływając na zdolność rośliny do produkcji określonych metabolitów obronnych. Nie istnieje jednak uniwersalna zależność, według której zwiększenie nawożenia azotowego zawsze prowadziłoby do wzrostu szkodliwości owadów; następstwa te zależą od rodzaju gospodarza, konsumenta i warunków środowiskowych. Podobnie deficyt wody może zmieniać stężenie metabolitów w tkankach, lecz nie musi automatycznie zwiększać odporności, gdyż może jednocześnie ograniczać zdolność uruchamiania odpowiedzi indukowanych.

Dlatego praktyczna ochrona roślin powinna być powiązana z zasadami racjonalnego nawożenia i nawadniania. Ich celem jest utrzymanie optymalnych warunków wzrostu bez nieuzasadnionego zwiększania atrakcyjności uprawy dla organizmów antagonistycznych. Oznacza to konieczność wspólnej analizy decyzji dotyczących nawożenia, gospodarki wodnej i ochrony, ponieważ każda z tych sfer wpływa na skuteczność pozostałych.

Istotny jest również wpływ zmian klimatycznych na relacje pomiędzy roślinami, konsumentami i naturalnymi wrogami, których odpowiedzi fenologiczne nie muszą być jednakowo szybkie. Wzrost temperatury może przyspieszać rozwój konkretnego fitofaga, ale jednocześnie zmieniać termin aktywności parazytoida lub drapieżnika, co prowadzi do czasowego rozdzielenia ich cykli życiowych. Skuteczność biologicznej kontroli zależy bowiem od dostępności odpowiedniego stadium gospodarza w okresie aktywności naturalnego wroga. Jeśli wzrost temperatury przesunie fenologię konsumenta silniej niż okres aktywności parazytoida, może dojść do osłabienia kontroli, mimo obecności obu gatunków w krajobrazie. Z drugiej strony niektóre organizmy pożyteczne potrafią dostosować tempo swojej fenologii tak, by utrzymać odpowiednie nakładanie się ich aktywności z cyklem szkodnika. W kontekście ekologii zmian klimatycznych kluczowe staje się zatem analizowanie nie tylko prognozowanej liczebności pojedynczego gatunku, lecz zgodności

czasowej całej relacji trójtroficznej. Podobny problem dotyczy systemów push-pull, których skuteczność zależy od jednoczesnego rozwoju uprawy głównej i roślin towarzyszących.

Zmiany długości sezonu wegetacyjnego i rozkładu opadów mogą modyfikować względne tempo wzrostu roślin, wpływając na przestrzenną organizację całego systemu ochronnego. W wymiarze instytucjonalnym ważna staje się możliwość regionalnej koordynacji działań ochronnych, gdyż migracja owadów i rozprzestrzenianie się wariantów odpornościowych tworzą zależności wykraczające poza granice pojedynczych gospodarstw.

Producent ograniczający liczbę zbędnych zabiegów zmniejsza presję selekcyjną na lokalne populacje szkodników, jednak korzyści te mogą być niwelowane przez intensywne stosowanie tych samych środków w sąsiednich gospodarstwach. W ten sposób powstaje problem wspólnego zasobu, którego przedmiotem nie jest wyłącznie czystość środowiska lub dostępność wody, lecz utrzymywanie biologicznej wrażliwości populacji antagonistycznych na istniejące środki ochronne. Z punktu widzenia ekonomii instytucjonalnej istotna jest możliwość tworzenia regionalnych systemów monitoringu i wymiany danych, które dostarczają producentom informacji o zmianach presji szkodników i występowaniu odporności. Nie oznacza to jednak konieczności pełnej centralizacji decyzji, gdyż lokalne warunki produkcyjne mogą wymagać odmiennych sposobów postępowania. Właściwy model powinien łączyć wspólne rozpoznawanie zagrożeń i zasady zarządzania odpornością z możliwością dostosowania interwencji do specyfiki gospodarstwa. Skuteczna koordynacja może ponadto zmniejszać koszty indywidualnego monitoringu poprzez wspólne finansowanie diagnostyki i dostęp do regionalnych prognoz, o ile system zapewnia wysoką jakość danych i przejrzystość ich wykorzystania.

W wymiarze socjologicznym i organizacyjnym rozwój IPM wymaga również uwzględnienia sposobu podejmowania decyzji przez producentów, doradców i podmioty odpowiedzialne za dystrybucję technologii.

Ekonomiczne i behawioralne bariery wdrażania metod biologicznych

Nawet bardzo dobra metoda biologiczna może nie zostać szeroko zastosowana, jeżeli wymaga znacznych nakładów pracy, trudno dostępnych materiałów lub umiejętności diagnostycznych, których uzyskanie nie pozostaje ekonomicznie uzasadnione dla konkretnego gospodarstwa. Równocześnie technologie łatwe w implementacji bywają preferowane mimo wyższych kosztów

długoterminowych – dzieje się tak zwłaszcza wtedy, gdy ich efekty są bardziej bezpośrednio widoczne lub gdy producenci dysponują ograniczoną wiedzą o alternatywach.

W tym kontekście kluczowe stają się procesy uczenia się, doświadczenia wynikające z wcześniejszych strat oraz sposób komunikowania informacji o niepewności skuteczności. Nie należy przy tym zakładać, że niechęć do wprowadzania określonej innowacji zawsze wynika z braku wiedzy; może ona bowiem stanowić racjonalną reakcję na ryzyko produkcyjne, niepewność dostępności komponentów i ograniczenia finansowe.

Adaptacyjne zarządzanie i funkcjonalna ocena środków ochrony

Właściwy program wdrożeniowy powinien obejmować nie tylko przekazanie informacji o skuteczności biologicznej, lecz także zapewnienie możliwości praktycznej weryfikacji rozwiązania, odpowiedniego doradztwa oraz porównania rezultatów ekonomicznych. Cenne są doświadczenia demonstracyjne prowadzone w warunkach rzeczywistych gospodarstw; ich wyniki zwiększają wiarygodność technologii i pozwalają dostosować ją do lokalnych potrzeb. Tu kluczową rolę odgrywa koncepcja adaptacyjnego zarządzania (adaptive management), w której praktyka gospodarcza staje się procesem ciągłego uczenia się na podstawie rzetelnie dokumentowanych interwencji. Producent lub grupa gospodarstw formułuje hipotezę dotyczącą skuteczności danego rozwiązania, wdraża je w warunkach umożliwiających porównanie z kontrolą, a uzyskane dane wykorzystuje do modyfikacji przyszłych działań.

Należy wyraźnie rozróżnić naturalną zmienność warunków produkcyjnych od rzeczywistego efektu technologii. Wyższy plon w jednym sezonie nie musi bowiem wynikać z nowego rozwiązania, lecz może być efektem korzystniejszej pogody lub właściwości gleby. Dlatego wysoką wartość mają doświadczenia oparte na odpowiedniej randomizacji, powtórzeniach przestrzennych i pomiarach prowadzonych w kolejnych latach. W przypadku rozwiązań działających w skali krajobrazu konieczne jest dostosowanie jednostki eksperymentalnej do rzeczywistego zasięgu oddziaływania; porównywanie niewielkich, sąsiadujących poletek może bowiem prowadzić do wzajemnego przenikania się efektów i utrudniać interpretację przyczynową. Metodologicznie sposób projektowania doświadczenia powinien wynikać z biologii analizowanego mechanizmu, a nie wyłącznie z organizacyjnej wygody prowadzenia pomiarów. Taka praktyka umożliwia stopniowe budowanie wiarygodnej wiedzy o skuteczności technologii w warunkach rzeczywistego gospodarowania.

Przyszłość integrowanej ochrony roślin wymaga również precyzyjnego określenia granic wykorzystywania substancji biologicznie aktywnych pochodzących z naturalnych źródeł. Preparaty zawierające metabolity roślinne, produkty mikroorganizmów czy syntetyczne analogi semiochemikaliów mogą być wartościowymi narzędziami ograniczania szkód, jednak ich pochodzenie nie gwarantuje automatycznie bezpieczeństwa ekotoksykologicznego. Niektóre substancje naturalne wykazują silną aktywność biologiczną, a ich wpływ na organizmy nietarczowe zależy od dawki, sposobu ekspozycji i metabolizmu odbiorcy. Z kolei substancja syntetyczna może cechować się wysoką selektywnością i korzystnym profilem środowiskowym w określonych warunkach. Klasyfikowanie technologii wyłącznie według pochodzenia substancji nie jest zatem wystarczającym kryterium ich wartości.

Ważne jest uwzględnienie trwałości preparatu, możliwości jego rozprzestrzeniania się w środowisku oraz rzeczywistego sposobu oddziaływania na organizmy. Z punktu widzenia ekologii chemicznej interesujące są technologie wykorzystujące bardzo niskie stężenia substancji wpływających na zachowania owadów, gdyż mogą one ograniczyć potrzebę bezpośredniego zabijania dużej liczby organizmów. Takie rozwiązania również wymagają jednak oceny skuteczności i bezpieczeństwa – trwała zmiana zachowań reprodukcyjnych lub żerowych może bowiem wpływać na strukturę populacji i całych wspólnot ekologicznych. Racjonalna ocena powinna zatem dotyczyć funkcji i następstw substancji, a nie wyłącznie jej chemicznego pochodzenia.

IPM jako wielokryterialny proces rozstrzygania kompromisów

Kluczową kwestią jest problem bezpieczeństwa żywnościowego, który wymaga rozróżnienia pomiędzy bezpieczeństwem podaży, bezpieczeństwem zdrowotnym a trwałością systemów produkcyjnych. Skuteczna ochrona roślin może zmniejszać straty ilościowe i jakościowe, przyczyniając się do utrzymania dostępności żywności, jednak jej rezultaty muszą być zgodne z wymogami ochrony zdrowia konsumentów oraz pracowników. Jednocześnie ograniczenie zużycia określonych środków chemicznych nie musi prowadzić do proporcjonalnego wzrostu produkcyjności, jeśli alternatywne rozwiązanie okaże się nieskuteczne wobec dominującego zagrożenia. W obszarze zarządzania publicznego priorytetem staje się zatem poszukiwanie metod jednocześnie biologicznie skutecznych, ekonomicznie dostępnych i bezpiecznych. Integrowana ochrona roślin może tu pełnić funkcję łącznika pomiędzy postępem biotechnologicznym a praktyką gospodarczą, umożliwiając wykorzystanie nowych narzędzi w sposób dostosowany do

rzeczywistych potrzeb i ograniczeń środowiskowych. Nie oznacza to jednak, że wszystkie cele można zawsze maksymalizować jednocześnie.

W niektórych sytuacjach konieczny jest wybór pomiędzy wyższym kosztem interwencji a ograniczeniem ryzyka strat, pomiędzy krótkoterminową skutecznością a długofalowym utrzymywaniem wrażliwości szkodników lub pomiędzy intensyfikacją produkcji a zachowaniem określonych funkcji ekologicznych. Właśnie dlatego IPM należy traktować jako proces racjonalnego rozstrzygania wielokryterialnych problemów, a nie jako technologię gwarantującą brak jakichkolwiek kompromisów. Z punktu widzenia interdyscyplinarnego istotne jest, że integrowana ochrona roślin wymaga jednoczesnego wykorzystania trzech rodzajów wiedzy, których nie można wzajemnie zastępować.

Pierwsza obejmuje rozpoznanie mechanizmów biologicznych, dzięki którym określona substancja, odmiana albo naturalny wróg wpływa na funkcjonowanie konsumenta. Druga dotyczy dynamiki populacji i struktury ekosystemu, co pozwala przewidzieć, czy lokalna interwencja doprowadzi do trwałego ograniczenia szkód. Trzecia wiąże się z ekonomicznymi i instytucjonalnymi warunkami zastosowania technologii, które decydują o jej dostępności i rzeczywistej wartości dla producenta. W metodologii naukowej kluczowe jest uświadomienie sobie, że poprawność twierdzenia na jednym poziomie nie gwarantuje automatycznie poprawności wniosku odnoszącego się do kolejnego. Wykazanie wysokiej aktywności określonej toksyny wobec larwy nie przesądza o ograniczeniu zagęszczenia populacji w polu, podobnie jak zmniejszenie intensywności uszkodzeń nie gwarantuje wyższego plonu, jeśli jego wielkość jest ograniczona przez inne czynniki. Właśnie dlatego pełne wyjaśnienie skuteczności IPM powinno obejmować drogę od mechanizmu molekularnego do procesu populacyjnego, a następnie od procesu populacyjnego do rezultatu gospodarczego. Takie podejście umożliwia zarówno lepsze projektowanie innowacji, jak i rozpoznawanie przyczyn ich niepowodzeń, które mogą wynikać z błędnych założeń na dowolnym etapie tego łańcucha.

IPM jako nauka o rezyliencji agroekosystemów

W wymiarze aksjologicznym szczególne znaczenie ma fakt, że celem odpowiedzialnego gospodarowania nie jest biologiczna dominacja człowieka rozumiana jako eliminowanie wszystkich organizmów konkurujących z nim o zasoby, lecz utrzymywanie takiego sposobu produkcji, który pozwala zaspokajać potrzeby społeczne przy zachowaniu zdolności środowiska do dalszego funkcjonowania. Rośliny uprawne stanowią podstawę materialnego bezpieczeństwa żywnościowego, a ich ochrona pozostaje ważnym obowiązkiem gospodarczym; realizacja tego celu

nie wymaga jednak uznania, że każda obecność owada roślinożernego jest stanem wymagającym natychmiastowej interwencji.

Progi ekonomicznej szkodliwości mają zatem znaczenie wykraczające poza techniczny rachunek kosztów, ponieważ wprowadzają zasadę proporcjonalności pomiędzy intensywnością zagrożenia a zakresem odpowiedzi. Z kolei ochrona naturalnych wrogów fitofagów odzwierciedla uznanie funkcjonalnej wartości procesów ekologicznych, które mogą wspierać produkcję bez konieczności ich całkowitego zastępowania działaniami technologicznymi. Nie oznacza to przeciwstawiania natury technice, gdyż skuteczna ochrona biologiczna może wymagać rozwiniętej infrastruktury produkcyjnej, diagnostyki i świadomego zarządzania.

Właściwy kierunek polega na integrowaniu możliwości technologicznych z biologiczną organizacją agroekosystemu w sposób uwzględniający zarówno krótkoterminową produktywność, jak i długoterminową trwałość zasobów środowiskowych. Autor książki definiuje integrowaną ochronę roślin jako szczególną postać nauki o zarządzaniu systemami żywymi, której przedmiotem jest utrzymywanie biologicznej produktywności w warunkach nieustannej zmienności środowiska. Skuteczność tak rozumianej ochrony wynika nie z maksymalizowania jednej kategorii działań, lecz z właściwego łączenia informacji o zagrożeniu, mechanizmach odporności, populacjach naturalnych wrogów i ekonomicznych następstwach dostępnych decyzji. W ujęciu biologii ewolucyjnej kluczowe jest przeciwdziałanie jednostronnej presji selekcyjnej, której długotrwałe utrzymywanie może prowadzić do powstawania populacji odpornych na określone technologie.

W kontekście ekologii wspólnot istotne jest zachowywanie funkcjonalnej różnorodności organizmów uczestniczących w regulacji liczebności fitofagów, natomiast z punktu widzenia ekonomiki produkcji zasadnicze znaczenie ma wybór interwencji, których oczekiwana korzyść przewyższa koszty i ryzyko. Właściwy program IPM wymaga zatem stałego monitoringu, odpowiednio skalibrowanych progów działania, znajomości biologii szkodnika, doboru metod zgodnych z aktualnym stanem wiedzy oraz późniejszej oceny skuteczności. Nie jest to jednorazowa procedura technologiczna, lecz dynamiczny proces uczenia się, którego jakość może wzrastać wraz z rozwojem nauki i doskonaleniem praktyki gospodarowania.

W szerszym ujęciu historii cywilizacji rozwój ochrony roślin odzwierciedla stopniową zmianę rozumienia relacji człowieka z przyrodą. Początkowo dominowały bezpośrednie obserwacje szkodników i mechaniczne metody ograniczania ich liczebności, następnie rozwój chemii umożliwił uzyskiwanie substancji o coraz większej aktywności biologicznej, a współczesna genomika i biotechnologia pozwalają oddziaływać na wybrane mechanizmy molekularne. Jednak wzrost technicznej precyzji nie wyeliminował podstawowego problemu ekologicznego: zdolności organizmów do reprodukcji, ewolucyjnej adaptacji i zajmowania nowych nisz. Dlatego najbardziej

obiecującym kierunkiem nie jest poszukiwanie kolejnego ostatecznego sposobu eliminowania biologicznego antagonisty, lecz rozwijanie systemów umożliwiających przewidywanie i ograniczanie szkód bez nieuzasadnionego zakłócania procesów podtrzymujących trwałość agroekosystemów. Integrowana ochrona roślin stanowi tu praktyczne zastosowanie wiedzy o złożoności biologicznej, której wartość polega na rozumieniu nie tylko pojedynczych mechanizmów, lecz również relacji pomiędzy nimi. W tym miejscu szczególnego znaczenia nabiera najszerszy poziom refleksji, dotyczący przyszłości relacji roślin i owadów w warunkach zmian klimatycznych, intensywnej transformacji krajobrazu i rosnącej presji na światowe systemy żywnościowe.

Rozwój metod genomicznych i informatycznych umożliwia coraz bardziej szczegółowe rozpoznawanie procesów biologicznych, ale nie eliminuje konieczności podejmowania decyzji w warunkach niepewności. Kluczowe staje się zatem pytanie o zdolność agroekosystemów do zachowywania funkcji produkcyjnych mimo zmienności warunków środowiskowych, przesuwania się zasięgów gatunków i powstawania nowych interakcji ekologicznych. W teorii odporności systemowej nie wystarczy zapewnić wysokiej skuteczności określonego zabiegu w jednym sezonie, jeżeli zastosowana strategia zwiększa podatność całego systemu na przyszłe zakłócenia. Potrzebne jest więc rozpoznanie biologicznych, gospodarczych i instytucjonalnych podstaw rezyliencji, rozumianej jako zdolność systemu do utrzymywania albo odtwarzania najważniejszych funkcji po wystąpieniu zakłóceń. Problem ten stanowi naturalne dopełnienie wcześniejszych analiz koewolucji, chemicznej obrony, adaptacji owadów i biotechnologicznego projektowania odporności, gdyż pozwala rozpoznać ich wspólne znaczenie dla przyszłości gospodarki i środowiska.

> W dobie genomicznej precyzji paradoksalnie największym wyzwaniem nie jest już znalezienie sposobu na zabicie konkretnego owada, lecz zrozumienie, kiedy pozwolić mu żyć. Czy dążenie do absolutnej kontroli nad naturą nie czyni nasze systemy żywnościowe bardziej kruchymi? Prawdziwa rezyliencja agroekosystemów może zatem tkwić nie w sile naszych interwencji, lecz w mądrości ich ograniczania.

Inspiracje

[1] **"Insect-Plant Interactions Volume 2"** Jamin Ali

Dr **Jamin Ali** jest entomologiem stosowanym i ekologiem chemicznym, specjalizującym się w interakcjach między roślinami a owadami, indukowanych mechanizmach obronnych roślin oraz zrównoważonej, zintegrowanej ochronie roślin. Ukończył studia licencjackie i magisterskie z zoologii ze specjalizacją w entomologii na Uniwersytecie Muzułmańskim Aligarh w Indiach. Następnie uzyskał stopień doktora z ekologii chemicznej i entomologii stosowanej na Uniwersytecie Keele w Wielkiej Brytanii, gdzie jego badania dotyczyły ekologii chemicznej szkodników mszyc, w szczególności mszycy brzoskwiniowo-ziemniaczanej (Myzus persicae), oraz ich interakcji z roślinami żywicielskimi i naturalnymi wrogami. Dr Ali pełnił funkcję profesora nadzwyczajnego i eksperta ds. badań zagranicznych w College of Plant Protection na Uniwersytecie Rolniczym w Jilin w Chinach. Jego program badawczy koncentruje się na sygnalizacji za pośrednictwem substancji lotnych, elicytacji mechanizmów obronnych roślin oraz wykorzystaniu semiochemikaliów do ekologicznej ochrony upraw w agroekosystemach.

*Dr. **Jamin Ali** is an applied entomologist and chemical ecologist specializing in plant-insect interactions, induced plant defenses, and sustainable integrated pest management. He completed his Bachelor of Science and Master of Science degrees in Zoology with a specialization in entomology at Aligarh Muslim University in India. He subsequently earned his Ph.D. in Chemical Ecology and Applied Entomology from Keele University in the United Kingdom, where his research investigated the chemical ecology of aphid pests, particularly the peach-potato aphid (Myzus persicae), and their interactions with host plants and natural enemies. Dr. Ali has served as an Associate Professor and Foreign Research Expert at the College of Plant Protection at Jilin Agricultural University in China. His research program centers on volatile-mediated signaling, plant defense elicitation, and the exploitation of semiochemicals for eco-friendly crop protection in agroecosystems.*

Jilin Agricultural University

Literatura uzupełniająca

Książki

Książki autora i dzieła przywołane w tekście:



[1] "The Peach Potato Aphid (Myzus persicae)"

Jamin Ali

2023 | CRC Press | ISBN: 9781000996777



[2] "Chemical Ecology"

Jamin Ali, Ri Zhao Chen

2024 | CRC Press | ISBN: 9781040184110

[3] "The Chemical Ecology of a Model Aphid Pest, Myzus Persicae, and Its Natural Enemies"

Jamin Ali

2022

Książki autorów przywoływanych i literatura pokrewna:



[4] "Integrated Pest Management"

Dharam P. Abrol

2013 | Academic Press | ISBN: 9780124017092



[5] "Economics of Integrated Pest Management"

Bruce A. McCarl

1981



[6] "Economic Thresholds for Integrated Pest Management"

Leon G. Higley, Larry P. Pedigo

1996 | U of Nebraska Press | ISBN: 9780803223639



[7] "Pest Management and Food Production"

Montague Yudelman, Annu Ratta, David F. Nygaard

1998 | Intl Food Policy Res Inst | ISBN: 9780896296299



[8] "Ecologically Based Pest Management"

National Research Council, Board on Agriculture, Committee on Pest and Pathogen Control Through Management of Biological Control Agents and Enhanced Cycles and Natural Processes

1996 | National Academies Press | ISBN: 9780309175784



[9] **"Insect Pest Management"**

Jack E. Rechcigl, Nancy A. Rechcigl

2016 | CRC Press | ISBN: 9781439822685

Artykuły naukowe

Prace autorów przywoływanych w tekście:

[1] **"Integrated Pest Management"**

J. Lawrence Apple, Ray F. Smith

1976 | Springer eBooks | DOI: 10.1007/978-1-4615-7269-5

Źródło

[2] **"The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: The integrated control concept"**

Vernon M. Stern, Ray F. Smith, Robert van den Bosch, Kenneth Sverre Hagen

1959 | Hilgardia | DOI: 10.3733/hilg.v29n02p081

Źródło

[3] **"Economic Thresholds"**

Vernon M. Stern

1973 | Annual Review of Entomology | DOI: 10.1146/annurev.en.18.010173.001355

Źródło

[4] **"Insect Colonization and Mass Production"**

Vernon M. Stern

1967 | American Journal of Tropical Medicine and Hygiene | DOI: 10.4269/ajtmh.1967.16.806

Źródło

[5] **"The Integration of Chemical and Biological Control of Arthropod Pests"**

R. van den Bosch, Vernon M. Stern

1962 | Annual Review of Entomology | DOI: 10.1146/annurev.en.07.010162.002055

Źródło

[6] **"Factors affecting egg production and oviposition in populations ofColias philodice eurythemeBoisduval (Lepidoptera: Pieridae)"**

Vernon M. Stern, Ray F. Smith

1960 | Hilgardia | DOI: 10.3733/hilg.v29n10p411

Źródło

[7] **"The Origins of Integrated Pest Management Concepts for Agricultural Crops"**

Ray F. Smith, J. Lawrence Apple, Dale G. Bottrell

1976 | Springer eBooks | DOI: 10.1007/978-1-4615-7269-5_1

Źródło

[8] **"Introduction to Integrated Pest Management"**

Mary Louise Flint, Robert van den Bosch

1981 | Springer eBooks | DOI: 10.1007/978-1-4615-9212-9

Źródło

[9] **"An Introduction to Biological Control"**

Robert van den Bosch, P. S. Messenger, Andrew Paul Gutierrez

1982 | Springer eBooks | DOI: 10.1007/978-1-4757-9162-4

Źródło

[10] **"Biological Control of Insects"**

Robert van den Bosch

1971 | Annual Review of Ecology and Systematics | DOI: 10.1146/annurev.es.02.110171.000401

Źródło

[11] **"Commercialization of Predators: Recent Lessons from Green Lacewings (Neuroptera: Chrysopidae: Chrosoperla)"**

Maurice J. Tauber, Catherine A. Tauber, Kent M. Daane, Kenneth Sverre Hagen

2000 | American Entomologist | DOI: 10.1093/ae/46.1.26

Źródło

[12] **"Kairomones and their use for management of entomophagous insects: IX. Investigations of various kairomone-treatment patterns forTrichogramma spp."**

W. JOE LEWIS, Michael H. Beevers, Donald A. Nordlund, H. R. Gross, Kenneth Sverre Hagen

1979 | Journal of Chemical Ecology | DOI: 10.1007/bf00986552

Źródło

[13] **"Ecosystem analysis : plant cultivars (HPR), entomophagous species and food supplements"**

Kenneth Sverre Hagen

1986

Źródło

[14] **"EVALUATING THE BIOLOGICAL CONVERSION OF PADDY HUSK TO HOUSE FLY, MUSCA DOMESTICA L (DIPTERA: MUSCIDAE) PUPA POWDER: A STUDY OF HOUSE FLY AS ANIMAL FEED"**

Song Quan Ong, Hamdan Ahmad

2015 | Serangga

Źródło

[15] **"Trap colour strongly affects the ability of deep learning models to recognize insect species in images of sticky traps"**

Song-Quan Ong, Toke Thomas Høye

2024 | Pest Management Science | DOI: 10.1002/ps.8464

Źródło

[16] **"Community-based mosquito surveillance: an automatic mosquito-on-human-skin recognition system with a deep learning algorithm"**

Song-Quan Ong, Gomesh Nair, Umi Kalsom Yusof, Hamdan Ahmad

2022 | Pest Management Science | DOI: 10.1002/ps.7028

Źródło

[17] **"Development of a deep learning model from breeding substrate images: a novel method for estimating the abundance of house fly (<scp>Musca domestica</scp> L.) larvae"**

Song-Quan Ong, Hamdan Ahmad, Abdul Hafiz Ab Majid

2021 | Pest Management Science | DOI: 10.1002/ps.6573

Źródło

[18] **"Resilience and Stability of Ecological Systems"**

Crawford S. Holling

1973 | Princeton University Press eBooks | DOI: 10.2307/jj.41003648.6

Źródło

[19] **"Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems"**

Brian Walker, Crawford S. Holling, Stephen R. Carpenter, Ann P. Kinzig

2004 | Ecology and Society | DOI: 10.5751/es-00650-090205

Źródło

[20] **"Some Characteristics of Simple Types of Predation and Parasitism"**

Crawford S. Holling

1959 | The Canadian Entomologist | DOI: 10.4039/ent91385-7

Źródło

[21] **"Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems"**

Crawford S. Holling

2001 | Ecosystems | DOI: 10.1007/s10021-001-0101-5

Źródło

[22] **"Specialization of Mutualistic Interaction Networks Decreases toward Tropical Latitudes"**

Matthias Schleuning, Jochen Fründ, Alexandra-Maria Klein, Stefan Abrahamczyk, Rubén Alarcón, Matthias Albrecht

2012 | Current Biology | DOI: 10.1016/j.cub.2012.08.015

Źródło

[23] **"Diverse pollinator communities enhance plant reproductive success"**

Matthias Albrecht, Bernhard Schmid, Yann Hautier, CHRISTINE B. MÜLLER

2012 | Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences | DOI: 10.1098/rspb.2012.1621

Źródło

[24] **"High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage"**

Matthias Tschumi, Matthias Albrecht, Martin H. Entling, Katja A. Jacot

2015 | Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences | DOI: 10.1098/rspb.2015.1369

Źródło

[25] **"The Swiss agri-environment scheme enhances pollinator diversity and plant reproductive success in nearby intensively managed farmland"**

Matthias Albrecht, Peter Duelli, CHRISTINE B. MÜLLER, David Kleijn, Bernhard Schmid

2007 | Journal of Applied Ecology | DOI: 10.1111/j.1365-2664.2007.01306.x

Źródło

[26] "A climate-adapted push-pull system effectively controls fall armyworm, Spodoptera frugiperda (J E Smith), in maize in East Africa"

Charles A. O. Midega, Jimmy O. Pittchar, John Anthony Pickett, Girma Hailu, Zeyaur Rahman Khan

2017 | Crop Protection | DOI: 10.1016/j.cropro.2017.11.003

Źródło

[27] "Achieving food security for one million sub-Saharan African poor through push–pull innovation by 2020"

Zeyaur Rahman Khan, Charles A. O. Midega, Jimmy O. Pittchar, Alice W. Murage, Michael A. Birkett

2014 | Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences | DOI: 10.1098/rstb.2012.0284

Źródło

[28] "Push—pull technology: a conservation agriculture approach for integrated management of insect pests, weeds and soil health in Africa"

Zeyaur Rahman Khan, Charles A. O. Midega, Jimmy O. Pittchar, John Anthony Pickett, Toby J. A. Bruce

2011 | International Journal of Agricultural Sustainability | DOI: 10.3763/ijas.2010.0558

Źródło

[29] "Managing storage pests of maize: Farmers' knowledge, perceptions and practices in western Kenya"

Charles A. O. Midega, Alice W. Murage, Jimmy O. Pittchar, Zeyaur Rahman Khan

2016 | Crop Protection | DOI: 10.1016/j.cropro.2016.08.033

Źródło

[30] "Adoption and willingness to pay for the push-pull technology among smallholder maize farmers in Rwanda"

Saliou Niassy , Michael Kidoido , Nyang'au Isaac Mbeche , Jimmy Pittchar , Girma Hailu , Rachel Owino , David Amudavi , Zeyaur Khan

2020 | International Journal of Agricultural Extension and Rural Development

Źródło

[31] "Push-Pull Farming System Controls Fall Armyworm: Lessons from Africa"

Zeyaur R. Khan, Jimmy O. Pittchar, Charles A. O. Midega, John A. Pickett

2018 | Outlooks on Pest Management | DOI: 10.1564/v29_oct_09

Źródło

[32] "Enhancing Soil System Productivity and Controlling Pests with Push-Pull Polycropping in East Africa"

Zeyaur R. Khan, Jimmy O. Pittchar, Laurie E. Drinkwater, John A. Pickett

2023 | Biological Approaches to Regenerative Soil Systems | DOI: 10.1201/9781003093718-39

Źródło

[33] "Exploiting Phytochemicals for Developing Sustainable Crop Protection Strategies to Withstand Climate Change: Example from Africa"

Zeyaur R. Khan, Charles A. O. Midega, Jimmy O. Pittchar, John A. Pickett

2014 | Advances in Plant Biopesticides | DOI: 10.1007/978-81-322-2006-0_3

Źródło

[34] "Insect chemical ecology: chemically mediated interactions and novel applications in agriculture"

Crispus M. Mbaluto, Pascal Mahukpe Ayelo, Alexandra Grace Duffy, Anna Laura Erdei, Anaïs Karine Tallon

2020 | Arthropod-Plant Interactions | DOI: 10.1007/s11829-020-09791-4

Źródło

[35] "The push–pull intercrop Desmodium does not repel, but intercepts and kills pests"

Anna Laura Erdei, Aneth David Mwakilili, Eleni C. Savvidou, Vaida Džemedžionaitė, Advaith Chakravarthy

2024 | eLife | DOI: 10.7554/elife.88695

Źródło

[36] "Essential Oil Headspace Volatiles Prevent Invasive Box Tree Moth (Cydalima perspectalis) Oviposition—Insights from Electrophysiology and Behaviour"

Magdolna Olívia Szelényi, Anna Laura Erdei, Júlia Katalin Jósvai, Dalma Radványi, Bence Sümegi

2020 | Insects | DOI: 10.3390/insects11080465

Źródło

[37] "Identification of the Female-Produced Sex Pheromone of an Invasive Greenhouse Pest, the European Pepper Moth (Duponchelia fovealis)"

Béla Péter Molnár, Csengele Bognár, Anna Laura Erdei, Takeshi Fujii, Pál Vági

2018 | Journal of Chemical Ecology | DOI: 10.1007/s10886-018-0928-2

Źródło

[38] **"The push-pull intercrop Desmodium does not repel, but intercepts and kills pests"**

Anna Laura Erdei, Aneth Bella David, Eleni C. Savvidou, Vaida Džemedžionaitė, Advaith Chakravarthy

2022 | DOI: 10.1101/2022.03.08.482778

Źródło

[39] **"Bibliometric analysis and current status of Leishmaniasis research indexed in Scopus, 2010 -2023"**

Clara Yona, Ramadhani Bakari, Sanga George, Aneth David

2024 | DOI: 10.32388/rxcfqe

Źródło

Artykuły naukowe autora:

[40] **"Lemongrass Essential Oil Components with Antimicrobial and Anticancer Activities"**

Mohammad Mukarram, Sadaf Choudhary, Mo Ahamad Khan, Palmiro Poltronieri, M. Masroor A. Khan, Jamin Ali

2021 | Antioxidants | DOI: 10.3390/antiox11010020

Źródło

[41] **"Harnessing Phytohormones: Advancing Plant Growth and Defence Strategies for Sustainable Agriculture"**

Jamin Ali, Mohammad Mukarram, James Adebayo Ojo, Nancy Naanogot Dawam, Riyazuddin Riyazuddin

2024 | Physiologia Plantarum | DOI: 10.1111/ppl.14307

Źródło

[42] **"Chitosan-induced biotic stress tolerance and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules"**

Mohammad Mukarram, Jamin Ali, Hamed Dadkhah-Aghdash, Daniel Kurjak, František Kačík

2023 | Frontiers in Plant Science | DOI: 10.3389/fpls.2023.1217822

Źródło

[43] **"Peach–Potato Aphid Myzus persicae: Current Management Strategies, Challenges, and Proposed Solutions"**

Jamin Ali, Ahmet Bayram, Mohammad Mukarram, Fanrui Zhou, Muhammad Fazal Karim

2023 | Sustainability | DOI: 10.3390/su151411150

Źródło

[44] "Insect Resistance to Insecticides: Causes, Mechanisms, and Exploring Potential Solutions"

Jiyun Liang, Feng Xiao, James Adebayo Ojo, Wu Hai Chao, Bilal Ahmad, Jamin Ali

2025 | Archives of Insect Biochemistry and Physiology | DOI: 10.1002/arch.70045

Źródło

[45] "Defense strategies and associated phytohormonal regulation in Brassica plants in response to chewing and sap-sucking insects"

Jamin Ali, Adil Tonğa, Tarikul Islam, Sajad Hussain Mir, Mohammad Mukarram

2024 | Frontiers in Plant Science | DOI: 10.3389/fpls.2024.1376917

Źródło

[46] "Effects of cis-Jasmone Treatment of Brassicas on Interactions With Myzus persicae Aphids and Their Parasitoid Diaeretiella rapae"

Jamin Ali, Anca Dafina COVACI, Joe M. Roberts, Islam S. Sobhy, William D. J. Kirk

2021 | Frontiers in Plant Science | DOI: 10.3389/fpls.2021.711896

Źródło

[47] "The Peach Potato Aphid (Myzus persicae): Ecology and Management"

Jamin Ali

2023 | CRC Press eBooks | DOI: 10.1201/9781003400974

Źródło

[48] "Exogenous Application of Methyl Salicylate Induces Defence in Brassica against Peach Potato Aphid Myzus persicae"

Jamin Ali, Dongming Wei, Mohammad Mahamood, Fanrui Zhou, Patricia Jie Hung King

2023 | Plants | DOI: 10.3390/plants12091770

Źródło

[49] "Wild potato ancestors as potential sources of resistance to the aphid Myzus persicae"

Jamin Ali, Islam S. Sobhy, Toby J. A. Bruce

2022 | Pest Management Science | DOI: 10.1002/ps.6957

Źródło

Treść tworzy Fundacja Dobre Państwo.
Redaguje i publikuje APA ONE, autorski system redakcyjny Fundacji oparty na AI.

APA ONE Publishing System
Fundacja Dobre Państwo © 2026
Article ID: dacb05d0-47f9-46f4-9cb0-fc4235c4dcc1