Interakcje roślin i owadów w dobie antropocenu w świetle publikacji Insect-Plant Interactions Volume 2 Jamina Aliego

AUTOR

Fundacja Dobre Państwo

STRESZCZENIE / ABSTRACT

Artykuł analizuje wpływ antropocenu na ewolucyjne i ekologiczne relacje między roślinami a owadami. Autor podkreśla konieczność przejścia od analizy pojedynczych gatunków do ujęcia systemowego, uwzględniającego dynamikę sieci troficznych i usługi ekosystemowe w obliczu gwałtownych zmian środowiskowych. Kluczowym zagadnieniem jest nieliniowa reakcja owadów na wzrost temperatury, opisywana za pomocą krzywych wydajności termicznej, co ma bezpośrednie przełożenie na przewidywanie presji fitofagów i bezpieczeństwo żywnościowe. Tekst zwraca uwagę na ryzyko niedopasowania fenologicznego oraz bada granice plastyczności fenotypowej organizmów w konfrontacji z antropogenicznym przyspieszeniem zmian klimatycznych, fragmentacją siedlisk i globalnym transportem gatunków.

The article analyzes the impact of the Anthropocene on the evolutionary and ecological relationships between plants and insects. The author emphasizes the need to shift from single-species analysis to a systemic approach that considers trophic network dynamics and ecosystem services in the face of rapid environmental changes. A key issue is the non-linear response of insects to temperature increase, described using thermal performance curves, which has direct implications for predicting phytophagous pressure and food security. The text highlights the risk of phenological mismatch and examines the limits of phenotypic plasticity in organisms confronting anthropogenic climate acceleration, habitat fragmentation, and global species transport.

Artykuł stanowi krytyczną analizę relacji między roślinami a owadami w dobie antropocenu, stawiając tezę, że tradycyjne badanie pojedynczych par gatunków jest

niewystarczające wobec skali współczesnych zaburzeń środowiskowych. Autor argumentuje, że synergia zmian klimatycznych, zanieczyszczeń atmosferycznych i fragmentacji siedlisk prowadzi do nieliniowych reakcji biologicznych – od niedopasowania fenologicznego po degradację chemicznych sygnałów komunikacyjnych. Tekst wykazuje, że te systemowe zakłócenia bezpośrednio zagrażają globalnemu bezpieczeństwu żywnościowemu, wpływając na wydajność plonów i stabilność usług ekosystemowych. Kluczowym wnioskiem jest konieczność przejścia ku ujęciu systemowemu, opartemu na teorii sieci ekologicznych i koncepcji rezyliencji. Zrozumienie redundancji funkcjonalnej oraz zdolności systemów do absorpcji wstrząsów staje się jedyną drogą do projektowania odpornych agroekosystemów, które będą w stanie przetrwać gwałtowną reorganizację biosfery wywołaną działalnością człowieka.

SŁOWA KLUCZOWE

interakcje roślin i owadów | antropocen | rezyliencja agroekosystemów | niedopasowanie fenologiczne | krzywe wydajności termicznej | bezpieczeństwo żywnościowe | redundancja funkcjonalna | plastyczność fenotypowa | komunikacja chemiczna roślin | ekologia inwazji gatunków | krytyczne spowolnienie | relacje trójtroficzne | stresy abiotyczne | dynamika sieci troficznych

Konieczność systemowego ujęcia interakcji roślin i owadów w antropocenie

ROŚLINY I OWADY W ANTROPOCENIE. ZMIANY KLIMATYCZNE, PRZEKSZTAŁCENIA SIECI EKOLOGICZNYCH, BEZPIECZEŃSTWO ŻYWNOŚCIOWE, REZYLIENCJA AGROEKOSYSTEMÓW I AKSJOLOGICZNE GRANICE LUDZKIEJ INGERENCJI W EWOLUCJĘ ŻYCIA

Rekonstrukcja ewolucyjnych, biochemicznych, genetycznych i ekologicznych mechanizmów współistnienia roślin oraz owadów prowadzi do pytania o zdolność układów biologicznych do zachowania podstawowych funkcji w warunkach antropogenicznego przyspieszenia zmian

środowiskowych. Relacje kształtowane przez miliony lat ewolucji — obejmujące specjalizację pokarmową, obronę chemiczną, komunikację biologiczną, zapylanie i regulację liczebności populacji — funkcjonują obecnie w środowisku, którego parametry fizyczne, chemiczne i przestrzenne ulegają zmianom wskutek działalności człowieka. Wzrost średniej temperatury, zmiana rozkładu opadów, częstsze ekstrema klimatyczne, fragmentacja siedlisk, przemiany użytkowania ziemi oraz globalny transport organizmów oddziałują równocześnie na rośliny, ich konsumentów i naturalnych wrogów. Co istotne, zmiany te nie muszą wywoływać jednakowych reakcji u wszystkich uczestników interakcji.

Organizm roślinny może modyfikować fenologię rozwoju, skład metabolitów i właściwości tkanek, podczas gdy owad reaguje zmianą tempa rozwoju, liczby pokoleń, aktywności reprodukcyjnej albo zasięgu występowania. W efekcie dotychczasowa zgodność pomiędzy cyklami życiowymi i możliwościami metabolicznymi partnerów ekologicznych może ulec przekształceniu, którego następstwa są trudniejsze do przewidzenia niż bezpośredni wpływ pojedynczego czynnika na izolowany gatunek. Współczesne badania nad relacjami roślin i owadów wymagają zatem przejścia od klasycznej analizy par gatunków do ujęcia systemowego, w którym kluczowa staje się dynamika sieci troficznych, trwałość usług ekosystemowych oraz zdolność zbiorowisk do reorganizacji po wystąpieniu zakłóceń.

Pojęcie antropocenu, stosowane do opisu okresu wyjątkowo silnego oddziaływania człowieka na procesy ziemskie, ma w tej problematyce znaczenie przede wszystkim analityczne. Z punktu widzenia ekologii ewolucyjnej zasadnicze jest to, że człowiek przekształca jednocześnie warunki abiotyczne, rozmieszczenie gatunków, intensywność presji selekcyjnej i przestrzenną organizację siedlisk. W takim środowisku relacje pomiędzy roślinami i owadami stają się układami historycznie uwarunkowanymi, ale równocześnie poddawanymi nowym kombinacjom czynników, których współwystępowanie mogło być rzadkie albo nieobecne w ich wcześniejszej historii ewolucyjnej.

Ważne jest zatem odróżnienie naturalnej zmienności środowiska od zmian prowadzących do przekraczania zakresu warunków, w których kształtowały się określone adaptacje. Nie oznacza to, że organizmy posiadają niezmienny zestaw właściwości ani że współczesne zmiany automatycznie prowadzą do ich wymierania. Wskazuje to raczej na konieczność badania granic plastyczności fenotypowej, zdolności migracyjnych i tempa ewolucji adaptacyjnej w relacji do szybkości przekształcania środowiska. Właściwy aparat teoretyczny umożliwiający rozpoznanie tych zależności można wyprowadzić z ekologii odporności ekosystemów, biologii klimatu i teorii systemów złożonych.

Każda populacja funkcjonuje w określonym zakresie temperatur, wilgotności i dostępności zasobów, którego granice są kształtowane przez fizjologiczne możliwości organizmu. W przypadku

owadów kluczowy jest ektotermiczny charakter regulacji temperatury, ponieważ tempo procesów metabolicznych i rozwojowych pozostaje silnie uzależnione od warunków termicznych otoczenia. Nie oznacza to jednak prostej zależności, według której każdy wzrost temperatury automatycznie zwiększa zdolność reprodukcyjną.

Nieliniowa reakcja owadów na temperaturę a ryzyko strat w plonach

Rzeczywiste reakcje mają często charakter nieliniowy: wraz ze wzrostem temperatury tempo rozwoju może początkowo przyspieszać, by następnie osiągnąć zakres optymalny, a po przekroczeniu pewnych wartości ulec ograniczeniu wskutek zaburzeń enzymatycznych, wzrostu kosztów metabolicznych i zwiększonej śmiertelności. Z perspektywy matematycznej zależności te opisuje się za pomocą krzywych wydajności termicznej (thermal performance curves), których kształt różni się w zależności od gatunku, populacji czy stadium rozwojowego.

Warto zauważyć, że przystosowanie do konkretnego klimatu nie musi oznaczać posiadania najwyższej tolerancji na wszystkie temperatury. Organizm dobrze funkcjonujący w środowisku chłodnym może zyskać na umiarkowanym ociepleniu, podczas gdy populacja rozwijająca się już blisko górnej granicy tolerancji może odnotować spadek przeżywalności. Przewidywanie zmian presji fitofagów wymaga zatem analizy lokalnego położenia populacji względem jej właściwości termicznych, a nie jedynie śledzenia kierunku zmian średniej temperatury. Istotnych danych w tym zakresie dostarczyli Curtis Deutsch, Joshua Tewksbury, Michelle Tigchelaar i współpracownicy w badaniu opublikowanym w 2018 roku w czasopiśmie „Science”.

Badacze wykorzystali zależności między temperaturą, metabolizmem a dynamiką populacyjną owadów, aby prognozować zmiany strat powodowanych przez szkodniki ryżu, kukurydzy i pszenicy. W przyjętym modelu oszacowano, że globalne straty plonów tych zbóż przypisywane owadom mogą zwiększać się o około 10–25% na każdy stopień wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi. Szczególnie uderzające są prognozy dla regionów umiarkowanych, gdzie ocieplenie może jednocześnie przyspieszyć metabolizm i zwiększyć tempo wzrostu populacji części fitofagów. Interpretacja tego wyniku wymaga jednak wyraźnego rozróżnienia między projekcją modelową a bezpośrednią obserwacją przyszłych strat. Wskazany zakres nie oznacza, że każdy gatunek szkodnika wywoła o 10–25% większe szkody przy wzroście temperatury o jeden stopień ani że jest to uniwersalny wzór do obliczania strat w dowolnej uprawie.

Model opierał się na konkretnych zależnościach fizjologicznych i założeniach dotyczących reakcji populacji, podczas gdy rzeczywiste systemy produkcyjne podlegają również zmianom odmian, technologii ochronnych, organizacji zasiewów czy dostępności naturalnych wrogów. Jego zasadnicza wartość polega jednak na wykazaniu, że prognozowanie bezpieczeństwa żywnościowego wyłącznie na podstawie bezpośredniej reakcji fizjologicznej roślin na klimat może prowadzić do niedoszacowania strat wynikających ze zmiany aktywności konsumentów.

Wpływ temperatury na cykle życiowe owadów i stabilność produkcji żywności

Z perspektywy biologii populacji szczególnie interesujące jest to, że wzrost temperatury może zmieniać liczbę pokoleń rozwijających się w jednym sezonie wegetacyjnym, choć efekt ten zależy od długości okresu dostępności gospodarza oraz mechanizmów diapauzy. U organizmów wielopokoleniowych, takich jak tantniś krzyżowiaczek, skrócenie czasu rozwoju może umożliwić pojawienie się kolejnej generacji w czasie, gdy wcześniej warunki klimatyczne lub fenologiczne uniemożliwiały zakończenie cyklu reprodukcyjnego. Kluczowe jest tu rozróżnienie pomiędzy liczbą potencjalnych pokoleń wynikającą z sumy temperatur efektywnych a liczbą generacji, które rzeczywiście i skutecznie reprodukują się w środowisku. Osiągnięcie odpowiedniej sumy temperatur nie gwarantuje bowiem dostępności pokarmu, przeżycia wszystkich stadiów ani obecności partnerów reprodukcyjnych. Ponadto rozwój może być regulowany przez fotoperiod, który nie zmienia się wraz z ociepleniem klimatu; prowadzi to do rozbieżności między temperaturą sprzyjającą rozwojowi a mechanizmami inicjującymi diapauzę.

Poszczególne populacje mogą zatem reagować na ocieplenie odmiennie, zależnie od ich pochodzenia geograficznego i historii adaptacyjnej. Istotne są również okresy zimowe – wzrost temperatury może zwiększać przeżywalność niektórych stadiów przetrwalnych, ale jednocześnie wpływa na stabilność pokrywy śnieżnej, dostępność wilgoci i częstotliwość epizodów mrozu następujących po wcześniejszym ociepleniu. Dlatego prognoza presji fitofaga powinna obejmować cały roczny cykl życiowy, a nie tylko tempo wzrostu larw w okresie letnim.

Zależności te nabierają dodatkowego znaczenia w świetle szóstego raportu oceniającego Międzyrządowego Zespołu do spraw Zmian Klimatu (IPCC), którego druga grupa robocza przedstawiła w 2022 roku rozbudowaną analizę wpływu ocieplenia na produkcję żywności, rozmieszczenie organizmów i stabilność systemów rolnych. Autorzy raportu wskazują z wysokim poziomem pewności, że zmiany klimatyczne oddziałują na geograficzne rozmieszczenie gatunków, terminy kwitnienia i aktywność owadów, a także na przydatność określonych regionów dla upraw.

Szczególnie ważne jest rozróżnienie między wyższymi szerokościami geograficznymi, gdzie ocieplenie może zwiększać dostępność obszarów produkcyjnych, a regionami, w których temperatury coraz częściej przekraczają górne progi tolerancji fizjologicznej roślin. Rozszerzenie potencjalnego areału upraw nie musi jednak automatycznie kompensować strat ponoszonych w innych częściach świata, gdyż produktywność zależy również od jakości gleb, dostępności wody, infrastruktury oraz możliwości gospodarczego wykorzystania nowych terenów.

Kluczowe pozostają także ekstremalne zdarzenia klimatyczne, których następstwa mogą prowadzić do gwałtownego spadku podaży produktów rolnych, niezależnie od długoterminowego trendu średniej temperatury. Bezpieczeństwo żywnościowe należy zatem analizować zarówno przez pryzmat przeciętnej produktywności systemu, jak i jego podatności na zdarzenia rzadkie, lecz generujące straty o bardzo dużej skali.

Niedopasowanie fenologiczne a realne straty funkcjonalne

Szczególnie interesującym następstwem zmian termicznych jest zjawisko niedopasowania fenologicznego (phenological mismatch). Występuje ono wtedy, gdy organizmy uczestniczące w danej interakcji zmieniają czas swojej aktywności w różnym tempie, co prowadzi do zmniejszenia funkcjonalnego nakładania się kluczowych faz ich cykli życiowych. W klasycznym układzie roślina-owad może dojść do przesunięcia terminu rozwoju młodych liści względem okresu występowania larw wyspecjalizowanego fitofaga lub zmiany terminu kwitnienia w stosunku do aktywności odpowiedniego zapylacza.

Kluczowe jest tutaj odróżnienie zwykłego przesunięcia kalendarzowego od rzeczywistego niedopasowania ekologicznego. Jeśli dwa gatunki rozpoczynają aktywność wcześniej, ale stopień ich wzajemnego nakładania się pozostaje bez zmian, nie ma podstaw do stwierdzenia utraty synchronizacji. Podobnie ograniczenie czasowej zgodności nie musi oznaczać istotnego spadku sukcesu reprodukcyjnego, o ile roślina posiada alternatywnych zapylaczy, a owad może korzystać z innych zasobów pokarmowych.

W przeglądzie opublikowanym w 2018 roku w "Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics" Marcel Visser i Christian Both podkreślili konieczność szczegółowego badania skutków fenologicznego rozdzielenia interakcji, zamiast samego rejestrowania zmian terminów występowania gatunków. Z kolei systematyczna synteza badań z 2025 roku wskazała, że choć przesuwanie fenologii roślin i zapylaczy obserwuje się w wielu biomach, bezpośrednie dowody na

szeroko rozpowszechnione niedopasowanie prowadzące do strat funkcjonalnych pozostają ograniczone i nierównomiernie rozmieszczone geograficznie. Wyniki te przemawiają za ostrożnością wobec katastroficznych uogólnień, choć nie eliminują ryzyka lokalnego zaniku wyspecjalizowanych relacji.

W kontekście obrony roślin przed owadami kluczowa staje się czasowa zgodność między występowaniem najbardziej podatnych organów a okresem największej aktywności konsumentów. Młode liście często charakteryzują się dużą zawartością substancji odżywczych, słabszą lignifikacją i inną organizacją mechanizmów chemicznych niż tkanki dojrzałe. W określonych układach ich szybki rozwój może prowadzić do krótkotrwałego wzrostu dostępności pokarmu, zwłaszcza jeśli konsument potrafi zsynchronizować składanie jaj z odpowiednią fazą ontogenezy gospodarza.

Zmiana klimatu może tę zgodność zarówno zwiększyć, jak i zmniejszyć – zależnie od tego, czy rozwój rośliny i owada jest regulowany przez podobne bodźce. Szczególnie interesujące są przypadki, w których termin pękania pąków zależy od kombinacji temperatury, wcześniejszego chłodzenia i fotoperiodu, podczas gdy rozwój fitofaga reaguje silniej na bieżące warunki termiczne. Wówczas ocieplenie może zmieniać względny czas pojawienia się obu uczestników interakcji, co niekoniecznie prowadzi do analogicznego przesunięcia ich pełnych cykli życiowych.

Może to oznaczać, że organizm wcześniej ograniczany przez niedostępność odpowiedniego stadium rośliny zyska korzystniejsze warunki żerowania, ale równie prawdopodobna jest sytuacja odwrotna: konsument pojawia się już po zakończeniu najbardziej wartościowej fazy rozwoju organu. Z punktu widzenia koewolucji istotne jest to, że wartość adaptacyjna fenologii nie jest cechą izolowaną, lecz wynika z interakcji między cyklem rozwoju rośliny, konsumenta i naturalnych wrogów. Prowadzi to do interesującego problemu ewolucyjnego dotyczącego możliwości rozbieżnego dostosowywania się populacji do zmieniających się warunków klimatycznych.

Złożoność adaptacji i odpowiedzi fizjologicznych na stresy środowiskowe

Rośliny wieloletnie charakteryzują się zazwyczaj długim czasem generacji, podczas gdy wiele gatunków owadów daje kilka pokoleń w roku. Teoretycznie umożliwia to konsumentom szybszą zmianę częstości odpowiednich wariantów genetycznych. Tempo adaptacji nie zależy jednak wyłącznie od długości pokolenia; kluczowe są tutaj także wielkość populacji, dostępna zmienność genetyczna, intensywność selekcji oraz zdolność do migracji. Ponadto organizmy o długim czasie generacji mogą wykazywać znaczną plastyczność fenotypową, co pozwala im reagować na zmiany

środowiska bez konieczności gwałtownej modyfikacji częstości alleli. Nie można zatem automatycznie przyjmować, że owady zawsze będą szybciej dostosowywały się do zmian klimatu niż ich gospodarze.

Presja selekcyjna nie oddziałuje bowiem na jedną cechę w izolacji, lecz na cały fenotyp organizmu. Zdolność do przetrwania wysokich temperatur może być powiązana z odpornością na odwodnienie, metabolizmem pokarmu czy reprodukcją. Z perspektywy genetyki ilościowej interesujące stają się zatem korelacje genetyczne pomiędzy cechami termicznymi a obronnymi, które mogą ograniczać lub przyspieszać określone trajektorie adaptacyjne. W badaniach nad przyszłością relacji roślina-owad konieczne jest łączenie modeli klimatycznych z danymi o strukturze dziedzicznej zmienności oraz rzeczywistą zdolnością organizmów do zmiany fenotypu.

Odrębny problem biologiczny wiąże się ze wzrostem stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Wpływa on na rośliny zarówno bezpośrednio, poprzez procesy fotosyntetyczne, jak i pośrednio, oddziałując na gospodarkę azotową, wodną i obronną. W przypadku roślin o fotosyntezie typu C3 zwiększona dostępność CO_2 może w pewnych warunkach ograniczać fotooddychanie i zwiększać asymilację węgla, choć efekt ten zależy od temperatury, dostępności składników mineralnych i innych barier wzrostu. Zwiększona intensywność asymilacji nie musi prowadzić do proporcjonalnego wzrostu plonu, jeśli rozwój organów reprodukcyjnych zostanie ograniczony przez niedobór wody lub nutrientów. Z punktu widzenia ekologii roślinożerności kluczowa jest zmiana stosunku węgla do azotu w tkankach, co wpływa na wartość pokarmową liści dla organizmów wymagających białka. W niektórych układach wyższa zawartość węglowodanów przy niższym stężeniu azotu może skłaniać do większej konsumpcji biomasy przez owada kompensującego obniżoną jakość pokarmu. W innych przypadkach zmiana metabolizmu rośliny może zwiększać ilość związków obronnych lub osłabiać niektóre odpowiedzi hormonalne. Nie istnieje zatem jedna, uniwersalna zależność między stężeniem CO_2 a odpornością na fitofagi.

Warto tu rozróżnić wpływ na organizmy gryzące tkanki od reakcji gatunków ssących soki roślinne, gdyż różnią się one sposobem pozyskiwania składników odżywczych i rodzajem oddziaływania na gospodarza.

W perspektywie biochemicznej kluczowe staje się współdziałanie dwutlenku węgla, temperatury i niedoboru wody z hormonalnymi mechanizmami obrony. Jasmoniany, kwas salicylowy, etylen i kwas abscysynowy nie są niezależnymi przełącznikami uruchamiającymi izolowane programy fizjologiczne; uczestniczą one w rozbudowanej sieci regulacyjnej, której właściwości zależą od kontekstu środowiskowego.

Podczas suszy aktywacja mechanizmów związanych z ABA może zmieniać przewodność szparkową, stymulować wzrost korzeni i regulować transport wody oraz metabolizm, wpływając jednocześnie na odporność biotyczną. Relacje między ABA, JA i SA nie są zawsze antagonistyczne – w niektórych układach mogą one współdziałać, zwiększając odporność, podczas gdy w innych jedna z nich ogranicza aktywność pozostałych szlaków.

Podobnie stres cieplny może modyfikować właściwości białek regulatorowych, organizację chromatyny i tempo przemian metabolicznych, co zmienia dynamikę odpowiedzi na późniejszy atak konsumenta. Nie należy więc wnioskować o końcowej odporności jedynie na podstawie poziomu jednego hormonu ani przenosić wyników badań nad pojedynczym stresorem na sytuacje wieloczynnikowe. Właściwa analiza wymaga eksperymentów kompleksowych, które pozwolą odróżnić efekty addytywne od synergistycznych i antagonistycznych oraz sprawdzić, czy wcześniejsza ekspozycja na jeden czynnik modyfikuje odpowiedź na kolejny.

Istotnym obszarem badań pozostaje wpływ zmian atmosferycznych na trwałość sygnałów chemicznych w komunikacji między roślinami, owadami a naturalnymi wrogami fitofagów. Lotne związki organiczne tworzą środowisko chemiczne, dzięki któremu zapylacze lokalizują kwiaty, fitofagi odnajdują gospodarzy, a parazytoidy wykrywają miejsca żerowania larw.

Antropogeniczne zanieczyszczenia i fragmentacja siedlisk zakłócają komunikację chemiczną oraz mobilność owadów

Substancje te nie są jednak biernymi nośnikami informacji, gdyż po uwolnieniu do atmosfery mogą wchodzić w reakcje z ozonem, rodnikami hydroksylowymi i innymi składnikami powietrza. Kluczowa jest tutaj struktura chemiczna metabolitu – obecność wiązań podwójnych i określonych grup funkcyjnych bezpośrednio wpływa na podatność cząsteczki na utlenianie.

Może to prowadzić do sytuacji, w której mieszanina wytwarzana przez roślinę różni się od tej docierającej do odbiorcy, zarówno pod względem całkowitego stężenia, jak i wzajemnych proporcji poszczególnych składników. Z perspektywy ekologii sensorycznej zmiana ta może skutkować utratą rozpoznawalności zapachu, nawet jeśli część pierwotnych substancji wciąż pozostaje w powietrzu. Co istotne, antropogeniczne zanieczyszczenie atmosfery może zakłócać relacje ekologiczne nie poprzez bezpośrednie zabijanie organizmów, lecz przez przekształcanie informacji chemicznej wykorzystywanej przy podejmowaniu decyzji o żerowaniu i reprodukcji. Empirycznego potwierdzenia tego mechanizmu dostarczyły badania opublikowane w 2023 roku w

"Environmental Pollution", w których analizowano wpływ ozonu i turbulentnego mieszania powietrza na przestrzenną organizację smug zapachowych powstających z mieszanin lotnych związków kwiatowych. Autorzy wykorzystali tunel aerodynamiczny, precyzyjne pomiary chemiczne oraz doświadczenia behawioralne z udziałem pszczół miodnych, które wcześniej nauczono rozpoznawania określonej mieszaniny zapachowej.

Wykazano, że reakcje ozonu prowadzą do degradacji części składników mieszaniny, przy czym intensywność tych przemian zależy również od przestrzennego położenia cząsteczek w smudze zapachowej. Zauważono, że mieszaniny odpowiadające bardziej zdegradowanemu zapachowi były gorzej rozpoznawane przez wytrenowane pszczoły. W określonych warunkach eksperymentalnych udział osobników prawidłowo rozpoznających bodziec spadał do około jednej dziesiątej badanej grupy w przypadku silniej przekształconej mieszaniny reprezentującej dalszą część smugi.

Wynik ten stanowi istotną przesłankę na rzecz mechanizmu, w którym zanieczyszczenie atmosfery ogranicza funkcjonalny zasięg komunikacji chemicznej między kwiatem a zapylaczem. Nie można jednak bezpośrednio przeliczać tych wartości na procentowy spadek zapylania wszystkich roślin, ponieważ organizmy mogą korzystać także z informacji wizualnych, pamięci przestrzennej i innych komponentów zapachowych. Istota tego odkrycia polega na wykazaniu konkretnej drogi przyczynowej prowadzącej od antropogenicznej zmiany właściwości atmosfery do osłabienia sensorycznego rozpoznawania zasobu biologicznego. Zjawisko degradacji informacji chemicznej jest równie istotne dla obrony pośredniej roślin, gdyż parazytoidy i drapieżniki wykorzystują mieszaniny HIPV podczas lokalizowania konsumentów. Jeśli wzrost temperatury lub zmiana reaktywności atmosfery modyfikują rozprzestrzenianie się lotnych metabolitów, skuteczność lokalizowania gospodarzy może ulec zmianie nawet bez istotnego ograniczenia całkowitej aktywności naturalnych wrogów. Zwiększona lotność substancji nie zawsze jednak zmniejsza jej efektywny zasięg.

Wyższa temperatura może bowiem zwiększać emisję określonych metabolitów, jednocześnie modyfikując ich trwałość i warunki transportu. Ostateczny rezultat zależy od bilansu między intensywnością produkcji, szybkością przemian atmosferycznych a zdolnością odbiorcy do wykrycia odpowiedniego stężenia. Należy zauważyć, że skład mieszaniny HIPV może zmieniać się pod wpływem stresu abiotycznego niezależnie od degradacji atmosferycznej – roślina może bowiem uruchamiać odmienne szlaki biosyntetyczne podczas żerowania występującego równocześnie z suszą lub wysoką temperaturą. W efekcie naturalny wróg może odbierać sygnał różniący się od historycznie wykorzystywanego bodźca pod względem składu, ilości i dynamiki emisji. Z perspektywy teorii koewolucji pojawia się zatem możliwość czasowego ograniczenia zgodności między właściwościami chemicznymi emitera a zdolnością ich rozpoznawania przez odbiorcę.

Warto uwzględnić przy tym możliwość uczenia się i dostosowywania zachowań owadów, co może częściowo kompensować zmianę charakterystyki zapachowej środowiska. Przekształcanie klimatu nie jest jednak jedynym ani zawsze dominującym czynnikiem wpływającym na relacje roślina-owad; ogromne znaczenie ma również sposób użytkowania powierzchni Ziemi. Rozwój rolnictwa, urbanizacji i infrastruktury transportowej doprowadził w wielu regionach do zmniejszenia powierzchni siedlisk półnaturalnych oraz podziału wcześniej połączonych zbiorowisk roślinnych na mniejsze, przestrzennie oddzielone fragmenty.

Wpływa to na możliwość przemieszczania się owadów, strukturę dostępnych zasobów pokarmowych i prawdopodobieństwo kontaktu między organizmami uczestniczącymi w określonych relacjach ekologicznych. Fragmentacja nie musi jednak prowadzić do identycznych następstw dla wszystkich gatunków.

Organizmy o dużej zdolności lotu i szerokim zakresie pokarmowym mogą wykorzystywać mozaikę siedlisk inaczej niż gatunki o ograniczonej mobilności lub silnej specjalizacji gospodarza. W rezultacie ta sama zmiana krajobrazu może sprzyjać wzrostowi liczebności niektórych generalistów, jednocześnie ograniczając występowanie wyspecjalizowanych zapylaczy i parazytoidów.

Fragmentacja siedlisk i dług wymierania niszczą sieci interakcji

Z perspektywy ekologii wspólnot kluczowa staje się nie tylko całkowita powierzchnia zachowanych siedlisk, lecz także ich jakość, stopień połączenia, struktura przestrzenna i rozmieszczenie zasobów w czasie. To właśnie te właściwości decydują o trwałości całych sieci interakcji, których funkcjonowanie wymaga kontaktu między organizmami często wykorzystującymi różne siedliska w kolejnych fazach cyklu życiowego. W ekologii krajobrazu zasadnicze jest rozróżnienie pomiędzy utratą powierzchni siedliska a jego fragmentacją, rozumianą jako zmiana przestrzennej konfiguracji zachowanych płatów. Oba zjawiska często współwystępują, jednak ich następstwa nie są tożsame.

Zmniejszenie powierzchni siedliska ogranicza całkowitą dostępność zasobów i miejsc reprodukcji, natomiast fragmentacja może dodatkowo modyfikować prawdopodobieństwo migracji, kolonizacji i lokalnego zanikania populacji. Ważna jest tutaj teoria metapopulacyjna Richarda Levinsa, rozwijana później między innymi przez Ilkkę Hanskiego; zakłada ona, że trwałość gatunku w danym krajobrazie zależy od równowagi pomiędzy procesami lokalnego wymierania a ponownym zasiedlaniem odpowiednich płatów.

W przypadku owadów wyspecjalizowanych zależność ta może być szczególnie silna, gdyż sama obecność rośliny gospodarza nie gwarantuje występowania wszystkich warunków niezbędnych do zakończenia cyklu życiowego. Organizmy dorosłe mogą wymagać innych zasobów niż larwy, a reprodukcja często zależy od dostępności odpowiednich miejsc schronienia lub mikroklimatu. W efekcie dwa płaty siedliska o podobnym składzie roślinnym mogą mieć odmienną wartość dla populacji owada, jeśli różnią się dostępnością zasobów uzupełniających i możliwością kontaktu z pozostałymi elementami krajobrazu. Z perspektywy ochrony przyrody kluczowe jest zatem zachowywanie funkcjonalnej łączności – rozumianej jako rzeczywista możliwość przemieszczania się organizmów pomiędzy siedliskami, a nie wyłącznie jako geometryczna bliskość płatów roślinności. Jeszcze głębsze znaczenie posiada koncepcja długu wymierania, extinction debt, zgodnie z którą skutki degradacji siedliska mogą ujawniać się ze znacznym opóźnieniem względem samej zmiany środowiskowej.

Populacja gatunku wyspecjalizowanego może utrzymywać się przez wiele lat w niewielkim, izolowanym płacie siedliska, mimo że jego powierzchnia i stopień izolacji nie zapewniają już warunków do długoterminowego przetrwania. Istotne jest tu rozróżnienie pomiędzy aktualną obecnością gatunku a dodatnim bilansem jego reprodukcji i migracji; sama obserwacja osobników nie stanowi bowiem wystarczającego dowodu stabilności populacji.

W układach roślina-owad problem ten zyskuje dodatkowy wymiar. Zmniejszenie liczebności określonej rośliny żywicielskiej może początkowo nie prowadzić do natychmiastowego zaniku wyspecjalizowanego konsumenta, lecz stopniowo ograniczać jego możliwości reprodukcyjne. Podobnie spadek liczebności zapylacza może przez pewien czas pozostawać słabo widoczny w strukturze populacji wieloletnich roślin, których dorosłe osobniki nadal przeżywają, choć ich zdolność tworzenia nowego pokolenia uległa istotnemu ograniczeniu. W efekcie widoczna stabilność zbiorowiska może maskować długoterminowe procesy prowadzące do jego przekształcenia.

Z punktu widzenia monitoringu kluczowe staje się zatem analizowanie procesów reprodukcji, regeneracji i wymiany osobników, a nie wyłącznie aktualnej liczby gatunków. Ochrona różnorodności biologicznej wymaga odpowiednio długich szeregów obserwacyjnych oraz uwzględnienia opóźnień pomiędzy zmianą środowiska a jej końcowymi następstwami populacyjnymi. Zagadnienie to prowadzi bezpośrednio do problemu współwymierania, coextinction, którego istota polega na możliwości zanikania organizmów pozostających w silnej zależności od innych gatunków tracących zdolność utrzymywania populacji. Szczególnie istotne są systemy o wysokim stopniu specjalizacji, w których larwa owada wykorzystuje wąską grupę roślin, a dorosły organizm ma ograniczone możliwości znalezienia alternatywnego gospodarza. W takich

warunkach zanik odpowiedniej rośliny może prowadzić do utraty niszy rozwojowej owada, nawet jeżeli warunki klimatyczne pozostają dla niego bezpośrednio korzystne. Analogicznie roślina zależna od niewielkiej liczby wyspecjalizowanych zapylaczy może doświadczać ograniczenia reprodukcji, gdy ich populacje ulegną silnemu zmniejszeniu.

Struktura sieci ekologicznych a odporność systemowa

Wyspecjalizowane relacje nie muszą jednak prowadzić nieuchronnie do współwymierania; kluczowe znaczenie ma tutaj możliwość zmiany gospodarza, obecność alternatywnych partnerów oraz zdolność organizmu do modyfikacji zachowania. Utrata jednego partnera może bowiem zainicjować przebudowę całej sieci oddziaływań, zamiast skutkować natychmiastowym zanikiem wszystkich organizmów z nim związanych.

Właściwa ocena ryzyka wymaga zatem łączenia danych o specjalizacji z analizą rzeczywistych możliwości substytucji funkcjonalnej. Podobieństwo dwóch gatunków pod względem przynależności do tej samej gildii ekologicznej nie gwarantuje bowiem, że będą one w stanie wzajemnie zastępować się w konkretnej interakcji. W tym miejscu istotna staje się teoria sieci ekologicznych, której rozwój pozwolił na precyzyjne analizowanie struktury zależności pomiędzy roślinami, owadami i innymi organizmami. W klasycznym ujęciu relacje te reprezentuje się za pomocą grafu, w którym wierzchołki odpowiadają organizmom, a krawędzie oznaczają stwierdzone oddziaływania, takie jak zapylanie, żerowanie czy pasożytnictwo. Biologiczne znaczenie sieci nie wynika jednak wyłącznie z liczby tych elementów, lecz przede wszystkim z ich rozmieszczenia, intensywności interakcji oraz zależności między poszczególnymi grupami organizmów.

W systemach zapylania często obserwuje się strukturę zagnieżdżoną, nestedness, w której gatunki bardziej wyspecjalizowane oddziałują głównie z partnerami wykorzystywanymi również przez organizmy o szerszym zakresie relacji. W innych układach kluczowa jest modularność, rozumiana jako tworzenie grup gatunków, których oddziaływania wewnątrz modułu są intensywniejsze niż te zachodzące pomiędzy modułami. Z perspektywy odporności systemowej właściwości te wpływają na sposób rozprzestrzeniania się skutków utraty konkretnego gatunku. Nie istnieje jednak uniwersalna reguła, według której większa zagnieżdżoność lub modularność zawsze zapewniałaby wyższą trwałość sieci; rezultat zależy od charakteru i siły interakcji, stopnia specjalizacji oraz rodzaju zakłócenia.

Teoria sieci ekologicznych powinna zatem służyć do formułowania hipotez dotyczących konkretnych mechanizmów stabilności, a nie do automatycznego przypisywania jednej strukturze matematycznej najwyższej wartości ochronnej. W badaniach nad relacjami mutualistycznymi

szczególnie interesujące pozostaje odróżnienie struktury obserwowanych kontaktów od rzeczywistego znaczenia biologicznego poszczególnych interakcji.

Konieczność stosowania ważonych i dynamicznych sieci ekologicznych

Sam fakt odwiedzenia kwiatu przez owada nie przesądza o skutecznym przeniesieniu pyłku czy wzroście sukcesu reprodukcyjnego rośliny. Podobnie obecność parazytoida w pobliżu larwy nie gwarantuje pomyślnego zakończenia procesu pasożytniczego, a zarejestrowane żerowanie fitofaga nie pozwala samo w sobie określić jego wpływu na końcową reprodukcję gospodarza. Z metodologicznego punktu widzenia oznacza to konieczność wykorzystywania ważonych sieci ekologicznych, których krawędzie odzwierciedlają oszacowaną intensywność i funkcjonalne następstwa oddziaływań.

Kluczowe jest uwzględnienie zmian w czasie – dostępność kwiatów, stadiów rozwojowych owadów czy organizmów naturalnych wrogów może przecież ewoluować w skali dni, tygodni i sezonów. Sieć przedstawiona jako statyczny zbiór relacji jest jedynie uproszczeniem procesu dynamicznego, w którym poszczególne oddziaływania pojawiają się i zanikają zależnie od fenologii, warunków klimatycznych oraz lokalnego zagęszczenia populacji.

Ocena stabilności wymaga zatem analizy nie tylko tego, które gatunki współwystępują, lecz także kiedy i z jaką intensywnością oddziałują oraz jakie skutki mają te interakcje dla ich przeżywalności i reprodukcji. Takie podejście pozwala realistyczniej przewidywać efekty zmian klimatycznych, gdyż uwzględnia czasową organizację zależności ekologicznych – czynnik równie istotny, co sama liczba uczestniczących gatunków. Rozpoznanie tych mechanizmów nabiera szczególnej wagi w obliczu danych o zmianach liczebności i różnorodności owadów, których interpretacja wymaga rygorystycznego oddzielania wyników lokalnych od twierdzeń o procesach globalnych. Choć w wielu regionach udokumentowano wyraźne spadki liczebności lub bogactwa gatunkowego określonych grup owadów, tempo i kierunek tych zmian pozostają zróżnicowane między siedliskami, kontynentami i taksonami.

W metaanalizie Roela van Klinka, Diany Bowler i współpracowników z 2020 roku (opublikowanej w "Science") wykazano przeciętny spadek liczebności owadów lądowych w analizowanych szeregach czasowych, przy jednoczesnym, przeciętnie dodatnim trendzie w danych dotyczących części zbiorowisk słodkowodnych. Autorzy publikacji podkreślali znaczną zmienność wyników i ograniczenia geograficzne danych; z kolei późniejsze dyskusje naukowe wskazywały m.in. na

problem interpretowania wzrostu całkowitej liczebności jako automatycznej poprawy stanu różnorodności biologicznej. W określonym środowisku bowiem wzrost liczby osobników gatunków tolerujących degradację może współwystępować z zanikiem taksonów wyspecjalizowanych i wrażliwych.

Konieczność przejścia od wskaźników ilościowych do funkcjonalnego zarządzania krajobrazem

Nie należy zatem przedstawiać jednego globalnego wskaźnika jako pełnego opisu przyszłości wszystkich owadów ani utożsamiać wzrostu biomasy z zachowaniem dotychczasowych funkcji ekologicznych. Właściwy monitoring powinien obejmować bogactwo gatunkowe, liczebność, strukturę funkcjonalną wspólnot oraz rzeczywistą zdolność organizmów do uczestniczenia w zapylaniu, rozkładzie materii i biologicznej kontroli fitofagów. Znacznie bardziej jednoznaczne dane dotyczące określonej grupy organizmów dostarczają europejskie programy monitoringu motyli dziennych, których wartością pozostaje wieloletnia ciągłość obserwacji prowadzonych według standaryzowanych metod. Europejska Agencja Środowiska wskazuje, że wskaźnik obejmujący siedemnaście charakterystycznych gatunków motyli związanych z użytkami zielonymi w Unii Europejskiej zmniejszył się o 47% pomiędzy 1991 a 2024 rokiem.

Wynik ten odnosi się do konkretnego zbioru gatunków i ustalonego sposobu obliczania wskaźnika, a nie do całkowitej liczby wszystkich owadów występujących na kontynencie. Analiza wskazuje również na zagrożenie gatunków wyspecjalizowanych, których populacje mogą być silnie zależne od utrzymywania odpowiednich roślin żywicielskich i warunków siedliskowych. Wśród istotnych czynników autor wymienia intensyfikację rolnictwa, utratę i degradację siedlisk, zanikanie bogatych gatunkowo łąk oraz zmiany sposobu ich użytkowania. Negatywne następstwa mogą wynikać zarówno z nadmiernie intensywnej eksploatacji siedlisk, jak i z zaniechania odpowiednich praktyk użytkowania, jeśli ich długoterminowe utrzymywanie jest warunkiem zachowania otwartych, bogatych florystycznie zbiorowisk. Ochrona motyli nie może być zatem sprowadzana do postulatu całkowitego wycofania człowieka z każdego siedliska; często wymaga ona świadomego zarządzania jego strukturą i dynamiką sukcesji ekologicznej. Dane te prowadzą do konieczności ponownego rozpoznania funkcjonalnej roli terenów rolniczych jako siedlisk uczestniczących w ochronie różnorodności biologicznej. Krajobraz rolniczy nie stanowi bowiem jedynie obszaru produkcji żywności, lecz może obejmować rozbudowaną mozaikę gruntów ornych, trwałych użytków zielonych, zadrzewień, miedz, cieków wodnych i fragmentów roślinności półnaturalnej.

Właściwa organizacja tych elementów może zwiększać dostępność zasobów dla zapylaczy i naturalnych wrogów fitofagów, a równocześnie ograniczać erozję gleby oraz poprawiać retencję wody. Zwiększenie liczby elementów krajobrazowych nie zawsze jednak prowadzi do proporcjonalnego wzrostu wszystkich funkcji ekologicznych.

W określonych warunkach pasy roślinności mogą stanowić również siedliska alternatywnych gospodarzy szkodników, a ich rzeczywista wartość zależy od składu gatunkowego i sposobu utrzymywania. Kluczowe pozostaje więc rozróżnienie pomiędzy różnorodnością strukturalną a funkcjonalną, ponieważ dwa krajobrazy o zbliżonej liczbie elementów mogą posiadać odmienne możliwości wspierania określonych grup organizmów.

Z perspektywy ekologii stosowanej istotne staje się projektowanie krajobrazu zgodne z lokalnym układem warunków klimatycznych i glebowych, historią użytkowania oraz potrzebami produkcyjnymi. W takim ujęciu ochrona różnorodności biologicznej nie pozostaje wyłącznie zadaniem realizowanym poza rolnictwem, lecz staje się integralnym elementem odpowiedzialnego gospodarowania przestrzenią produkcyjną. Odrębne miejsce w tej problematyce zajmują zapylacze, których funkcjonowanie tworzy jeden z najważniejszych mechanizmów łączących różnorodność biologiczną z bezpieczeństwem żywnościowym. Znaczna część roślin kwiatowych wykorzystuje zwierzęta do przemieszczania pyłku pomiędzy strukturami reprodukcyjnymi, a skuteczność tego procesu zależy od dostępności odpowiednich partnerów, ich zachowań oraz zgodności fenologicznej. W raporcie IPBES dotyczącym zapylania z 2016 roku wskazano, że ponad trzy czwarte najważniejszych rodzajów upraw żywnościowych korzysta w różnym stopniu z zapylania przez zwierzęta. Należy jednak odróżniać tę zależność od udziału zapylaczy w całkowitej masie globalnej produkcji żywności, ponieważ liczne podstawowe zboża i inne ważne rośliny rozmnażają się bez bezpośredniej zależności od owadów. Stwierdzenie, że większość rodzajów upraw korzysta z zapylania, nie oznacza zatem, że większość światowej masy żywności zniknęłaby w przypadku utraty zapylaczy.

Rzeczywiste następstwa byłyby silnie zróżnicowane pomiędzy kategoriami produktów; szczególnie odczuwalne stałyby się zmiany dostępności owadów, orzechów, nasion i innych produktów o istotnej wartości odżywczej. Z perspektywy bezpieczeństwa żywnościowego oznacza to potrzebę analizowania nie tylko całkowitej kaloryczności podaży, lecz również jej różnorodności i jakości żywieniowej.

Różnorodność funkcjonalna zapylaczy jako gwarant stabilności plonowania

Ważnym uzupełnieniem tej perspektywy są badania Lucasa Garibaldiego, Ingolfa Steffana-Dewentera, Rachael Winfree i współpracowników z 2013 roku, opublikowane w czasopiśmie „Science". Autorzy przeanalizowali w nich znaczenie dzikich zapylaczy dla zawiązywania owoców w czterdziestu jeden systemach uprawowych na świecie, wykazując dodatni związek między odwiedzinami dzikich owadów a skutecznością plonowania, niezależnie od obecności pszczoły miodnej. Co istotne, wzrost liczby wizyt dzikich zapylaczy wiązał się przeciętnie z silniejszym zwiększeniem zawiązywania owoców niż analogiczny wzrost aktywności pszczół miodnych. Wynik ten stanowi mocny argument przeciwko utożsamianiu ochrony zapylania wyłącznie z utrzymywaniem liczebnych populacji jednego gatunku wykorzystywanego gospodarczo. Pszczoła miodna może mieć ogromne znaczenie produkcyjne, lecz nie stanowi funkcjonalnego zamiennika całej różnorodności dzikich błonkówek, muchówek, motyli i innych organizmów uczestniczących w przenoszeniu pyłku.

Gatunki te różnią się bowiem aktywnością w określonych temperaturach, budową aparatu gębowego, sposobem poruszania się po kwiatach oraz zdolnością do transportu pyłku w różnych warunkach pogodowych. Utrzymanie zróżnicowanej wspólnoty zapylaczy może zatem zwiększać stabilność procesu reprodukcji roślin, zwłaszcza gdy aktywność jednego gatunku ulegnie czasowemu ograniczeniu. Nie każda jednak dodatkowa jednostka różnorodności przekłada się automatycznie na identyczny wzrost plonowania, gdyż kluczowe znaczenie ma rzeczywista komplementarność funkcjonalna poszczególnych organizmów.

Zjawisko to można interpretować w ramach hipotezy ubezpieczeniowej różnorodności biologicznej, rozwijanej m.in. przez Shigeo Yachiego i Michela Loreau. Jej podstawowa idea zakłada stabilizację funkcji ekosystemowej dzięki zróżnicowaniu reakcji gatunków na zmienne warunki środowiska. Jeśli kilka organizmów pełni podobną funkcję, lecz różni się wrażliwością na temperaturę, suszę czy dostępność zasobów, ograniczenie aktywności jednego z nich nie musi prowadzić do całkowitego zaniku danej funkcji. Stabilność ta może wynikać nie tylko z dużej liczby gatunków, ale przede wszystkim z braku pełnej synchronizacji zmian ich liczebności i aktywności. W badaniach nad ekosystemami lądowymi wykazano, że asynchronia dynamiki populacji stanowi ważny mechanizm stabilizowania zbiorowisk – szczególnie wtedy, gdy niekorzystne warunki dla jednego gatunku nie dotykają jednocześnie wszystkich pozostałych.

każdy układ bogaty gatunkowo automatycznie posiada wysoką odporność na wszelkie zakłócenia. Jeśli wszystkie organizmy pełniące określoną funkcję są podatne na ten sam czynnik, nawet

znaczna różnorodność taksonomiczna może nie zapewnić odpowiedniej ochrony. Z perspektywy rezyliencji kluczowe jest zatem zróżnicowanie funkcjonalnych reakcji na stres, a nie wyłącznie liczba gatunków stwierdzanych podczas inwentaryzacji.

Rezyliencja jako zdolność systemu do regeneracji i absorpcji zakłóceń

Pojęcie rezyliencji, którego rozwój w ekologii systemowej pozostaje silnie związany z dorobkiem Crawforda Stanleya Hollinga, wymaga jednak szczególnej ostrożności interpretacyjnej. Nie jest ono bowiem tożsame ani z odpornością pojedynczej rośliny na fitofaga, ani z prostą stabilnością liczebności populacji. W klasycznym ujęciu Hollinga z 1973 roku zasadnicze znaczenie miała zdolność systemu ekologicznego do absorbowania zakłóceń przy zachowaniu podstawowej organizacji i procesów podtrzymujących jego funkcjonowanie. Z perspektywy współczesnej teorii systemów należy zatem odróżnić odporność na zakłócenie, rozumianą jako zdolność ograniczenia bezpośredniej zmiany stanu, od możliwości odtworzenia funkcji po wystąpieniu niekorzystnego zdarzenia.

Organizmy i agroekosystemy mogą wykazywać znaczne różnice w obu tych wymiarach. Określona uprawa może cechować się wysoką odpornością na sezonowe wahania liczebności szkodnika, a jednocześnie pozostawać bardzo podatna na wyjątkowo silną suszę. Inny system z kolei może doświadczać większych, krótkotrwałych zmian produktywności, lecz posiadać wyższą zdolność regeneracji dzięki zróżnicowanej strukturze roślinności, zasobom glebowym i obecności alternatywnych organizmów pełniących podobne funkcje. Długoterminowa wartość systemu nie wynika zatem wyłącznie z maksymalnej produkcyjności w warunkach przeciętnych, lecz także z jego zachowania podczas zdarzeń odbiegających od normy oraz czasu potrzebnego do przywrócenia istotnych funkcji. Szczególnie interesujące jest powiązanie rezyliencji z teorią alternatywnych stanów stabilnych, której znaczenie ujawnia się w systemach podlegających silnym dodatnim i ujemnym sprzężeniom zwrotnym. W określonych zbiorowiskach ekologicznych stopniowe zwiększanie presji środowiskowej może początkowo prowadzić do niewielkich zmian parametrów, by po przekroczeniu odpowiedniego progu spowodować gwałtowną reorganizację całego systemu.

Z perspektywy matematycznej odpowiada to możliwości występowania bifurkacji oraz przechodzenia pomiędzy odmiennymi obszarami przyciągania w przestrzeni stanów dynamicznych. Nie każdy ekosystem posiada jednak ostro zdefiniowany próg krytyczny i nie wszystkie nagłe zmiany wynikają z istnienia alternatywnych stanów stabilnych. Właściwa identyfikacja tych zjawisk

wymaga wykazania odpowiednich sprzężeń i przebiegu dynamiki, w tym potencjalnej histerezy, czyli zależności możliwości powrotu do wcześniejszego stanu od historii przekształceń.

Redundancja funkcjonalna jako klucz do rezyliencji agroekosystemów

W agroekosystemach analogiczne procesy można rozważać w kontekście utraty naturalnej kontroli fitofagów, degradacji gleby czy zaniku zasobów niezbędnych dla zapylaczy. Jeśli wieloletnie przekształcanie siedliska ogranicza liczebność naturalnych wrogów, narastająca presja szkodników może wymuszać coraz intensywniejsze interwencje. Te z kolei mogą dodatkowo osłabiać organizmy pożyteczne, uruchamiając niekorzystne sprzężenie zwrotne. Nie można jednak automatycznie uznawać każdej takiej sekwencji za dowód osiągnięcia ekologicznego punktu krytycznego, gdyż jego identyfikacja wymaga precyzyjnych danych o dynamice systemu. Wartość tej teorii polega przede wszystkim na wykazaniu, że koszt przywrócenia utraconych funkcji może być znacznie wyższy niż koszt zapobiegania ich stopniowemu zanikowi. Z perspektywy zarządzania kluczowy staje się zatem problem wczesnych sygnałów ostrzegawczych, które pozwalają rozpoznać narastającą podatność agroekosystemu na zakłócenia.

W modelach systemów dynamicznych analizuje się m.in. zjawisko krytycznego spowolnienia, critical slowing down, polegające na wydłużeniu czasu powrotu do stanu równowagi po niewielkim zakłóceniu w momencie, gdy system zbliża się do granicy stabilności. W odpowiednich układach towarzyszyć temu może wzrost wariancji i autokorelacji obserwowanych parametrów. Praktyczne zastosowanie tych wskaźników w rolnictwie wymaga jednak ostrożności – zmienność liczebności owadów czy parametrów produkcyjnych często wynika z sezonowości, zmian fenologicznych lub czynników zewnętrznych, niepowiązanych z przejściem systemu do nowego stanu ekologicznego. Dlatego niezbędne jest łączenie statystycznej analizy zmian z rzeczywistą wiedzą mechanistyczną o funkcjonowaniu układu. W przypadku biologicznej kontroli fitofagów szczególnie istotne są dane dotyczące relacji liczebności między konsumentami a ich naturalnymi wrogami, narastania odporności na środki ochrony roślin oraz spadku różnorodności funkcjonalnej organizmów pożytecznych.

Żaden z tych wskaźników nie powinien być jednak traktowany jako uniwersalny prognostyk nieuchronnego załamania funkcji. Skuteczny system ostrzegawczy musi opierać się na kombinacji danych i być walidowany w długotrwałych badaniach terenowych. W tej perspektywie kluczowe staje się projektowanie agroekosystemów charakteryzujących się odpowiednią redundancją funkcjonalną, rozumianą jako obecność kilku organizmów lub mechanizmów zdolnych do

wzajemnego zastępowania się podczas zakłóceń. Jeśli spadek populacji jednego parazytoida prowadzi do całkowitego zaniku kontroli nad szkodnikiem, system jest zbyt silnie zależny od pojedynczego komponentu. Jeżeli natomiast regulacja liczebności fitofaga opiera się na działalności kilku drapieżników i parazytoidów o różnych właściwościach termicznych i sposobach poszukiwania gospodarza, funkcja ta może zostać utrzymana mimo czasowego ograniczenia aktywności części z nich. Nie należy jednak utożsamiać podobieństwa funkcji z całkowitą wymiennością biologiczną – organizmy mogą różnić się skutecznością w zależności od fazy rozwoju konsumenta czy strefy łanu. Istotna pozostaje tu komplementarność czasowa, umożliwiająca funkcjonowanie różnych gatunków w odmiennych okresach sezonu.

Analogicznie, różnorodność odmian uprawnych może zmniejszać podatność systemu na pojedynczy czynnik, o ile odmiany te różnią się mechanizmami odporności i reakcją na stres abiotyczny. Wprowadzenie kilku odmian o identycznym molekularnym mechanizmie obrony nie zwiększy trwałości systemu wobec szkodnika zdolnego do jego przełamania. Z perspektywy rezyliencji zasadnicze znaczenie ma zatem różnorodność funkcjonalnych mechanizmów i ich reakcji na zakłócenia, a nie tylko liczba formalnie odmiennych elementów produkcji.

Dynamika inwazji gatunków a bezpieczeństwo żywnościowe

Poważnym problemem jest globalne przemieszczanie się organizmów, którego intensywność wzrosła wraz z rozwojem handlu międzynarodowego, transportu towarowego i wymiany materiału roślinnego. W przypadku fitofagów kluczowa jest możliwość transportowania jaj, larw, poczwarek i osobników dorosłych wraz z roślinami, opakowaniami, drewnem lub produktami rolnymi. Zmiana klimatu może następnie zwiększać prawdopodobieństwo utrzymania się introdukowanej populacji w regionie, gdzie wcześniej warunki termiczne ograniczały jej przeżywalność. Należy tu wyraźnie rozróżnić wprowadzenie gatunku od jego skutecznego zadomowienia, gdyż sama obecność pojedynczych osobników nie oznacza jeszcze powstania trwałej populacji zdolnej do samodzielnego rozmnażania.

W kontekście ekologii inwazji kluczowe stają się właściwości biologiczne organizmu: szerokość zakresu gospodarzy, tempo reprodukcji, zdolność dyspersji oraz tolerancja na zmienność klimatyczną. Wpływ może mieć również brak części naturalnych wrogów występujących na obszarze pierwotnym, choć hipoteza uwolnienia od wrogów, enemy release hypothesis, nie wyjaśnia sukcesu wszystkich gatunków inwazyjnych.

Nowy organizm może bowiem napotykać lokalne drapieżniki i parazytoidy, których zdolność do wykorzystania nowego zasobu zależy od ich właściwości fizjologicznych oraz historii ewolucyjnej. Z perspektywy ochrony roślin istotne jest, że gatunek inwazyjny może wprowadzać mechanizmy żerowania i detoksykacji, wobec których lokalne rośliny nie wykształciły skutecznych strategii obronnych. Brak wspólnej historii ewolucyjnej nie zawsze jednak prowadzi do zwiększonej podatności gospodarzy, ponieważ niektóre mechanizmy odporności roślin działają szeroko wobec wielu grup fitofagów. Ponadto organizm przybyły z innego regionu może okazać się niezdolny do neutralizowania określonych metabolitów lokalnych roślin, co ogranicza jego możliwość rozszerzania zakresu gospodarzy. Zjawisko to wskazuje na konieczność uwzględniania asymetrii biologicznej nowo powstających relacji, których wynik nie może zostać przewidziany wyłącznie na podstawie pochodzenia geograficznego konsumenta.

Istotna jest także możliwość szybkiego tworzenia nowych zależności trójtroficznych; lokalne parazytoidy mogą bowiem uczyć się rozpoznawać substancje lotne emitowane przez rośliny żerowane przez nowego konsumenta. W niektórych warunkach procesy te prowadzą do stopniowego zwiększania kontroli biologicznej, podczas gdy w innych wyspecjalizowane naturalne wrogi pozostają niezdolne do skutecznego wykorzystania nowego gospodarza. Dynamika inwazji jest zatem procesem ewolucyjnym i ekologicznym, zależnym od wzajemnych możliwości adaptacyjnych wszystkich uczestniczących organizmów.

W obszarze zarządzania międzynarodowego kluczowe stają się systemy bezpieczeństwa fitosanitarnego i wczesnego wykrywania organizmów kwarantannowych. Ich funkcją jest ograniczanie prawdopodobieństwa introdukcji lub umożliwienie szybkiej reakcji przed powstaniem trwałej populacji. Koszt zapobiegania nowej inwazji może być znacznie niższy niż długoterminowe wydatki ponoszone po zadomowieniu się szkodnika, choć relacja ta zależy od gatunku, narzędzi diagnostycznych i wartości zagrożonych upraw. Rozpoznanie tego problemu stanowi istotny element współczesnej polityki bezpieczeństwa żywnościowego, w której zdrowie roślin jest ściśle powiązane z wymianą handlową, działalnością służb granicznych i systemami diagnostycznymi.

W ocenie FAO z 2021 roku podkreślono, że zmiany klimatyczne mogą zwiększać ryzyko rozprzestrzeniania się organizmów szkodliwych, szczególnie tam, gdzie ocieplenie osłabia istniejące bariery termiczne. Jako przykłady organizmów o znaczeniu międzynarodowym wskazano m.in. sówkę Spodoptera frugiperda oraz niektóre muchówki żerujące w owocach. Nie każdy przypadek zwiększania zasięgu można jednak przypisać wyłącznie ociepleniu, gdyż intensywność transportu i dostępność odpowiednich gospodarzy pozostają czynnikami równie istotnymi. Właściwa ocena wymaga zatem łączenia analizy klimatycznej z danymi dotyczącymi handlu, historii introdukcji i biologii organizmu.

> Czy potrafimy zaprojektować krajobraz rolniczy, który nie będzie jedynie sterylną fabryką kalorii, lecz żywym systemem zdolnym do samoregulacji? Prawdziwa rezyliencja naszych zasobów żywnościowych może zależeć nie od precyzji technologii, lecz od pokory wobec złożoności sieci powiązań, których nie jesteśmy w stanie w pełni kontrolować. Pozostaje pytanie: czy zdążymy odbudować funkcjonalną różnorodność natury, zanim przekroczymy progi stabilności, z których nie ma już powrotu?

Inspiracje

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

Jamin Ali jest entomologiem stosowanym i ekologiem chemicznym, specjalizującym się w interakcjach owadów i roślin oraz zintegrowanym zwalczaniu szkodników. Ukończył studia licencjackie i magisterskie z zoologii na Uniwersytecie Muzułmańskim Aligarh w Indiach, a następnie uzyskał doktorat z ekologii chemicznej i entomologii stosowanej na Uniwersytecie Keele w Wielkiej Brytanii. Ali jest związany z Uniwersytetem Rolniczym Jilin w Chinach, gdzie pracował jako ekspert ds. badań zagranicznych i adiunkt w Wydziale Ochrony Roślin. Jego główne badania dotyczą ekologii chemicznej owadów roślinożernych, w szczególności mszyc, takich jak Myzus persicae, oraz zastosowania substancji semiochemicznych w zrównoważonej ochronie upraw. Wniósł znaczący wkład w badanie indukowanych mechanizmów obronnych roślin, w szczególności reakcji pośredniczonych przez jasmonian, oraz w opracowywanie nowatorskich metod kontroli typu push-pull i biologicznej w ekosystemach rolniczych.

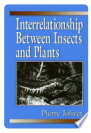
Jamin Ali *is an applied entomologist and chemical ecologist specializing in insect-plant interactions and integrated pest management. He completed his Bachelor of Science and Master of Science in Zoology at Aligarh Muslim University in India before earning his Ph.D. in Chemical Ecology and Applied Entomology at Keele University in the United Kingdom. Ali is affiliated with Jilin Agricultural University in China, where he has worked as a Foreign Research Expert and Associate Professor in the College of Plant Protection. His primary research investigates the chemical ecology of herbivorous insects, notably aphid pests such as Myzus persicae, and the application of semiochemicals in sustainable crop protection. He has contributed significantly to exploring induced plant defense mechanisms, particularly jasmonate-mediated responses, and developing novel push-pull and biological control methods for agricultural ecosystems.*

Jilin Agricultural University

Literatura uzupełniająca

Książki

Książki autorów przywoływanych i literatura pokrewna:



[1] **"Interrelationship Between Insects and Plants"**

Pierre Jolivet

1998 | CRC Press | ISBN: 9781574440522

Artykuły naukowe

Prace autorów przywoływanych w tekście:

[1] **"Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks"**

Michelle Tigchelaar, David S. Battisti, Rosamond L. Naylor, Deepak K. Ray

2018 | Proceedings of the National Academy of Sciences | DOI: 10.1073/pnas.1718031115

Źródło

[2] **"Blue food demand across geographic and temporal scales"**

Rosamond L. Naylor, Avinash Kishore, U. Rashid Sumaila, Ibrahim Issifu, Blaire P. Hunter, Michelle Tigchelaar

2021 | Nature Communications | DOI: 10.1038/s41467-021-25516-4

Źródło

[3] **"Harnessing the diversity of small-scale actors is key to the future of aquatic food systems"**

Rebecca Short, Stefan Gelcich, David C. Little, Fiorenza Micheli, Edward H. Allison, Michelle Tigchelaar

2021 | Nature Food | DOI: 10.1038/s43016-021-00363-0

Źródło

[4] **"Dialectics and Systems Theory"**

Richard Levins

2008 | Dialectics for the New Century | DOI: 10.1057/9780230583818_3

Źródło

[5] **"Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change"**

Sandra M. Díaz, Josef Settele, Eduardo S. Brondízio, Hien T. Ngo, John B. R. Agard, Lucas A. Garibaldi

2019 | Science | DOI: 10.1126/science.aax3100

Źródło

[6] "Safeguarding pollinators and their values to human well-being"

Simon Geoffrey Potts, Vera Lúcia Imperatriz-Fonseca, Hien T. Ngo, Marcelo A. Aizen, Jacobus Christiaan Biesmeijer, Lucas A. Garibaldi

2016 | Nature | DOI: 10.1038/nature20588

Źródło

[7] "How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production"

Marcelo A. Aizen, Lucas A. Garibaldi, Saul Alan Cunningham, Alexandra-Maria Klein

2009 | Annals of Botany | DOI: 10.1093/aob/mcp076

Źródło

[8] "Will a large complex system be productive?"

Shipeng Nie, Junjie Zheng, Ming-Yu Luo, M. Loreau, D. Gravel

2023 | Ecology Letters | DOI: 10.1111/ele.14242

Źródło

[9] "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

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

Crawford S. Holling

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

Źródło

[11] "Regime Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management"

Carl Folke, Steve R. Carpenter, Brian Walker, Marten Scheffer, Thomas Elmqvist, Crawford S. Holling

2004 | Princeton University Press eBooks | DOI: 10.2307/jj.41003648.9

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: 70d8479f-39a3-4a83-9b56-fca65465e7fa