

## Ekotoksykologia: najważniejsze zagadnienia i cele

### Czym zajmuje się ekotoksykologia?

Choć nazwa „ekotoksykologia” jest używana zaledwie około 30 lat, a prawdziwą karierę zaczęła robić dwadzieścia-dwadzieścia pięć lat temu, to można powiedzieć, iż zagadnienia uznawane dziś za główny nurt ekotoksykologii są badane właściwie już od wczesnych dekad minionego wieku. Czymże innym były prace Shelforda nad tolerancją organizmów żywych na czynniki środowiskowe? Sformułowane przezeń „prawo tolerancji” można by dziś uznać za koncepcję, na której opiera się znaczna część współczesnej ekotoksykologii. Niezależnie bowiem od tego, czy dana substancja chemiczna jest po prostu trucizną, czy też niezbędnym do życia pierwiastkiem lub związkem chemicznym, w nadmiarze na ogół bywa szkodliwa (co notabene znajduje odzwierciedlenie w starej ludowej mądrości, że „co za dużo, to niezdrowo”, lub – jeśli wolimy autorytety poważniejsze od mądrości ludowych – w cytacie z Paracelsusa<sup>1</sup>: *Sola dosis fecit venenum* – sama dawka czyni truciznę).

Jeśli mielibyśmy przedstawić przedmiot zainteresowania ekotoksykologii w jak najbardziej zwięzłej postaci, to moglibyśmy sformułować go tak: *ekotoksykologia jest nauką o oddziaływaniu substancji toksycznych na organizmy żywe i konsekwencjach tych oddziaływań ujawniających się na poziomach organizacji wyższych niż pojedynczy organizm*. Podobnie jak w wielu innych dziedzinach wiedzy, tak i w ekotoksykologii można wyróżnić badania podstawowe i stosowane. Jeśli mówimy o ekotoksykologii w sensie nauki podstawowej, to w centrum naszego zainteresowania będzie leżała nie ochrona środowiska, lecz mechanizmy, jakie kryją się za oddziaływaniem rozmaitych toksycznych substancji (także pochodzenia naturalnego!) na populacje, zespoły, ekosystemy. Sytuacja jest zatem analogiczna do tej, z jaką mamy do czynienia w samej ekologii, która zajmuje się oddziaływaniami zachodzącymi między organizmami a ich nieożywionym środowiskiem oraz pomiędzy samymi organizmami, nie zajmując się definiowaniem tego, co służy ochronie środowiska, a co nie (szanujący się ekolog unika nawet takich zwrotów jak „szkodniki” czy „zwierzęta pożyteczne”!). Poznanie jest tu celem samym w sobie i problemy badawcze powinny być tak formułowane, a metody tak dobierane, by jak najszybciej do tego celu podążać. Obowiązują tu zatem wszelkie zasady odnoszące się do nauk ścisłych i do eksperymentu naukowego: stawianie falsyfikowalnych hipotez i planowanie eksperymentów, które mogą pozwolić na ich testowanie.

<sup>1</sup> Teophrastus Bombastus von Hohenheim (1493–1451) – twórca podstaw toksykologii; chemik, lekarz i filozof; profesor medycyny i lekarz miejski w Bazylei.

W ekotoksykologii stosowanej zadania są zgoła inne: nie chodzi tu o poznanie samo w sobie, lecz o praktyczne działania mające na celu ochronę środowiska i przyrody. Często zdarza się, że sytuacja zmusza nas do podejmowania radykalnych działań jeszcze na długo przed tym, zanim poznamy prawdziwe mechanizmy kryjące się za toksycznym działaniem substancji chemicznych. Jeżeli tylko uda się znaleźć przyczynowo-skutkowe związki między obserwowanymi niekorzystnymi zjawiskami (degradacją środowiska) a obecnością w środowisku określonych substancji chemicznych, to jeśli nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie tych substancji ze środowiska, bez wdawania się w szczegóły, należy podjąć próbę oceny ryzyka i wyznaczenia granic bezpieczeństwa (np. bezpiecznych stężeń w wodzie, glebie, powietrzu). To właśnie są niezwykle ważne zadania ekotoksykologii stosowanej – rozumianej jako dział ochrony przyrody i środowiska, ale nie ekologii. W ekotoksykologii stosowanej często musimy zatem zrezygnować z dogłębnego poznania i zrozumienia zjawiska na rzecz doraźnych działań. Częstokroć jedynym pytaniem, na jakie trzeba tu znaleźć odpowiedź, jest pytanie o to, przy jakim stężeniu (dawce) konkretnej substancji chemicznej zaczynają ginąć organizmy żywe. W tym celu stosuje się niezwykle uproszczone metody, rezygnując ze szczegółowych, długotrwałych i uciążliwych badań nad oddziaływaniem danej substancji na przedstawicieli rozmaitych grup taksonomicznych, troficznych, reprezentujących różne historie życiowe.

Jeśli zgodzimy się na potraktowanie ekologii jako nauki nadrzędnej względem ekotoksykologii, to zadania, jakie przed ekotoksykologią stawiamy, nie będą się wiele różniły od tych, jakimi od lat zajmuje się ekologia. Skoro ekologia interesuje się oddziaływaniami pomiędzy organizmami oraz między organizmami i ich środowiskiem, to ekotoksykologia winna zajmować się tym szczególnym przypadkiem, gdy wśród czynników środowiskowych znajdują się substancje toksyczne. Jeśli zrezygnowalibyśmy z podkreślania, że substancje toksyczne muszą być pochodzenia antropogenicznego (bo przecież nie muszą!), wówczas z trudem daje się ekotoksykologię w ogóle wydzielić jako osobną naukę.

Istnieje cały szereg naturalnych substancji toksycznych, jak np. wszystkie najdawniej stosowane pestycydy, alkaloidy, mykotoksyny, czy też metale ciężkie, które w niektórych rejonach występują naturalnie w wysokich stężeniach etc. Wiele z tych naturalnych toksyn jest produkowanych przez organizmy celowo, dla zabezpieczenia się przed innymi organizmami. Rośliny produkują całą gamę substancji toksycznych, które chronią je przed mikroorganizmami i roślinożercami. Z kolei mikroorganizmy i roślinożercy, żeby korzystać z pokarmu roślinnego, zmuszone są do detoksykacji tych substancji.

Gra ewolucyjna polega na bezustannym „wyścigu zbrojeń” między roślinami i roślinożercami – dobór preferuje z jednej strony genotypy dające swym nosicielom obronę w postaci coraz bardziej skutecznych substancji toksycznych, z drugiej wymusza u roślinożerców coraz lepsze adaptacje do radzenia sobie z tymi substancjami. Organizmy zawsze musiały więc zmagać się z detoksykacją rozmaitych substancji chemicznych, a ekotoksykologię można uznać po prostu za dział ekologii, tak jak mówimy np. o ekologii ewolucyjnej, fizjologicznej, populacyjnej czy ekosystemowej.

Ekotoksykologia ma jednak tę szczególną cechę, że przedmiotem jej zainteresowania są wszystkie poziomy organizacji reprezentowane w ekologii. Jest więc swego rodzaju nauką przekrojową, zajmującą się ekologicznym kontekstem procesów zachodzących na poziomie organizmu, poprzez populacje, sieci troficzne, po zespoły i ekosystemy. Każdy z tych działów stosuje nieco odmiennie metody doświadczalne i analityczne.

Jeśli ekotoksykologia ma zajmować się procesami zachodzącymi na tych wszystkich poziomach organizacji, to musi zaadoptować wiele z metod stosowanych w odpowiednich działach ekologii. Wydaje się zatem, że z praktycznych względów warto podzielić ekotoksykologię zgodnie z najważniejszym podziałem w samej ekologii: na ekotoksykologię populacyjną i ekotoksykologię ekosystemową. Ze względu na specyfikę przedmiotu badań ekologia populacyjna i ekosystemowa posługują się odmiennym warsztatem badawczym.

W kręgu zainteresowań ekotoksykologii populacyjnej znajdują się te zagadnienia, które obserwuje się na poziomie organizacji, jakim jest populacja, oraz te, które bezpośrednio z tego poziomu potrafimy wywieść. Centralnym zagadnieniem jest tu więc wpływ zanieczyszczeń na *dostosowanie*<sup>2</sup> organizmów, czyli na to, jak dobrze organizmy radzą sobie w swoim środowisku. Dostosowanie organizmu zależy zarówno od oddziaływania abiotycznych czynników środowiska (a więc między innymi rozmaitych substancji chemicznych), jak i od interakcji z innymi osobnikami tego samego i innych gatunków.

Skoro tak, to w obszarze zainteresowania ekotoksykologii populacyjnej, poza efektami bezpośredniego działania substancji toksycznych, znajdują się także pośrednie oddziaływania, wynikające ze zmiany oddziaływań międzyosobniczych wskutek działania substancji toksycznej. Zmiany we względnym dostosowaniu poszczególnych osobników pod wpływem substancji chemicznych mogą z kolei prowadzić do ewolucji odporności na te substancje. Zagadnienie to jest drugim z podstawowych problemów ekotoksykologii populacyjnej, o ogromnym znaczeniu praktycznym w przypadku ewolucji odporności na pestycydy.

Ekologia ekosystemowa zajmuje się tradycyjnie takimi procesami, jak: przepływ energii i materii przez kolejne poziomy troficzne, produktywność ekosystemów, procesy dekompozycji martwej materii organicznej, tempo i drogi obiegu pierwiastków w ekosystemach. Wszystkie te procesy mogą się znaleźć w sferze zainteresowań ekotoksykologii ekosystemowej, jeśli tylko są modyfikowane przez obecność substancji toksycznych.

Jednym ze zjawisk zaprzających od kilkudziesięciu lat umysły i laboratoria ekotoksykologów jest przepływ substancji toksycznych w łańcuchach troficznych. Już

<sup>2</sup> Dostosowanie jest jednym z najważniejszych pojęć ekologii ewolucyjnej i populacyjnej. Ogólnie wyjaśniając, dostosowanie mówi o względnym sukcesie reprodukcyjnym osobnika (będącego nosicielem określonego genotypu) w stosunku do innych osobników w populacji. Najwyższe dostosowanie ma więc osobnik, który w określonych warunkach środowiskowych wyda na świat najwięcej zdolnego do przeżycia i rozmnażania się potomstwa – czyli pozostawi najwięcej kopii swojego genotypu. Nie istnieje jedna uniwersalna miara dostosowania; za najlepsze uważa się wewnętrzne tempo wzrostu populacji lub dominującą wartość własną macierzy projekcji populacji.

w latach sześćdziesiątych XX w. zaobserwowano bowiem, że najpowszechniej używany wówczas pestycyd – DDT, może doprowadzić do dramatycznych efektów ubocznych w postaci ekstynkcji populacji rozmaitych drapieżników właśnie wskutek specyficznego mechanizmu przemieszczania się w łańcuchu troficznym, wiążącego się z akumulacją coraz wyższych stężeń na kolejnych poziomach troficznych. Powodowało to, że nawet przy stosowaniu niewielkich dawek DDT u drapieżników szczytowych osiągał on często letalne stężenia. Ten wzrost stężenia DDT (i pokrewnych substancji) wzdłuż łańcucha troficznego nazwano *biomagnifikacją* lub *biokoncentracją* i przypuszczano, iż może dotyczyć wszelkich substancji toksycznych. Nic więc dziwnego, że biomagnifikacja stała się jednym z głównych problemów ekotoksykologicznych na co najmniej dwa dziesięciolecia.

Procesy takie, jak biokoncentracja i biomagnifikacja oraz bezpośrednie oddziaływanie substancji toksycznych na populacje, mogą prowadzić do zmian w strukturze zespołów – spadku liczby gatunków zamieszkujących skażone chemicznie rejony, zaburzeń w strukturze troficznej i strukturze dominacji itp. Mamy więc poważne powody, by przypuszczać, że zanieczyszczenia przyczyniają się do spadku różnorodności gatunkowej.

Kolejnym zagadnieniem pod względem popularności w literaturze naukowej, a zarazem wagi z punktu widzenia ochrony środowiska, jest wpływ substancji toksycznych, głównie zanieczyszczeń przemysłowych, na procesy dekompozycji materii organicznej w ekosystemach. Istnieją obecnie niezbita dowody na to, że wiele zanieczyszczeń, a szczególnie metale ciężkie i dwutlenek siarki lub kwaśne deszcze mogą hamować procesy rozkładu, a przez to spowalniać obieg biogenów w ekosystemach.

Wreszcie, substancje toksyczne mogą oddziaływać bezpośrednio na producentów, obniżając produktywność, a w skrajnych przypadkach doprowadzając do całkowitego zniszczenia ekosystemu. Przypuszcza się, że przynajmniej po części to właśnie bezpośrednie toksyczne oddziaływanie substancji chemicznych na rośliny stało się powodem zaobserwowanego w latach siedemdziesiątych tzw. *osobliwego zamierania lasów* (ang. *novel forest decline*) w Europie i na znacznych obszarach Stanów Zjednoczonych i południowej części Kanady.

### **Substancje chemiczne a organizmy żywe**

Substancje chemiczne można dzielić i systematyzować według rozmaitych kryteriów. Najbardziej ogólnym rozróżnieniem jest podział na dwie wielkie grupy: substancje organiczne i nieorganiczne (mineralne). Podział ten ma fundamentalne znaczenie zarówno dla toksykologii, jak i ekotoksykologii, te dwie grupy oddziałują bowiem na organizmy w całkowicie odmienny sposób i odmiennie zachowują się w ekosystemach. Z kolei substancje mineralne to zarówno pierwiastki chemiczne, jak i związki chemiczne. Pierwiastki dzieli się zazwyczaj na kilka grup, zależnie od powszechności ich występowania w biosferze.

Jeśli dla określenia częstości występowania posłużymy się stężeniami pierwiastków chemicznych w oceanie światowym, to dają się one podzielić w przybliżeniu na następujące grupy: (1) pierwiastki główne (C, O, N, H), których zawartość w środowisku wyraża się w procentach, (2) pierwiastki podrzędne, występujące w stężeniach rzędu kilku  $\text{mg}/\text{dm}^3$  (S, P, Cl, Ca, Mg, Na, K) i (3) pierwiastki śladowe, występujące w stężeniach poniżej  $10^{-3} \text{ mg}/\text{dm}^3$  (Sr, B, Si, F, Li, Al, Fe, P, Ba, I, Mo, Zn, Mn, V, Ni, Cu, Co, Sn, Se, Cr, Pb, Cd, Hg, Os, Rb, Ar, In, Ti, U, aktynowce).

Z punktu widzenia funkcjonowania organizmów wszystkie pierwiastki chemiczne można z kolei podzielić na dwie duże grupy: te, które są niezbędne w procesach życiowych (*pierwiastki biofilne, biogeny*), oraz te, które nie są przez organizmy w żaden sposób wykorzystywane (*ksenobiotyki*<sup>3</sup>). Do ksenobiotyków, poza pierwiastkami, zalicza się także wszelkie inne substancje, które są obce organizmom żywym, a mogą na nie oddziaływać. Ksenobiotyki nie występują ani jako substraty, ani jako produkty, nie biorą też udziału w metabolizmie w żadnej innej formie (np. jako katalizatory). Tak więc znajdują się tu także liczne związki chemiczne, zarówno organiczne, jak i nieorganiczne.

Zarówno niedobór, jak i nadmiar pierwiastków biofilnych prowadzi do zachwiania homeostazy organizmu i upośledzenia niektórych procesów metabolicznych. Inaczej rzecz się ma w wypadku tych pierwiastków, które nie są wykorzystywane w reakcjach biochemicznych (ksenobiotyków): tu nie można już mówić o dolnym stężeniu krytycznym, z reguły istnieje jednak pewien górny próg stężenia, powyżej którego pierwiastki te działają toksycznie. W obu wypadkach istnieje zatem specyficzny dla każdego pierwiastka zakres stężeń, w którym funkcjonowanie organizmu przebiega bez zakłóceń.

### Kompromisy w strategiach życiowych

Mamy poważne powody, by przypuszczać, że w środowisku skażonym toksycznymi substancjami wszystkie organizmy mają do dyspozycji co najwyżej taką samą ilość energii, jaką miałyby w środowisku nieskażonym. Każdy osobnik staje w takiej sytuacji przed trudnym wyborem między inwestowaniem części energii w detoksykację, co powinno wprawdzie zwiększyć jego szanse przeżycia, ale równocześnie musi zmniejszyć produkcję, a inwestowaniem całej nadwyżki energii w produkcję, nie zostawiając nic na detoksykację (oczywiście jest to antropomorfizacja dla czystej wygody: osobniki nie dokonują żadnych świadomych wyborów; wybór dokonuje się na drodze doboru, utrwalając rozwiązania w danym środowisku najkorzystniejsze). Ta druga opcja daje możliwość utrzymania chwilowego tempa produkcji na niezmiennym poziomie, ale zmniejsza prawdopodobieństwo dożycia wieku, jakiego ten sam organizm dożyłby w normalnych warunkach. To, która z tych dwu opcji jest bardziej opłacalna, zależy od tego, jaki podział zasobów pozwoli pozostawić największą liczbę zdolnego do przeżycia potomstwa. Oczywiście możliwe są także wszelkie strategie mieszane: można np. przez całe życie

<sup>3</sup> Ksenobiotyki – substancje obce organizmom żywym, od greckiego wyrazu *ksénos* – obcy.

przeznaczać pewną minimalną ilość energii na częściową detoksykację, a większość wciąż inwestować w produkcję; można ponosić zwiększone koszty detoksykacji tylko przez pewien okres życia, później zaś przeznaczać całą nadwyżkę energii na produkcję. Chodzi o znalezienie takiego kompromisu (ang. *trade-off*) w wydatkach, który zapewni trwałą przewagę nad konkurentami i pozwoli na pozostawianie jak największej liczby potomstwa. Strategia taka będzie preferowana przez dobór naturalny i jeśli skażenie środowiska trwa wystarczająco długo, to może zostać w populacji utrwalona.

Konieczność wyboru właściwego kompromisu między inwestowaniem w produkcję i te procesy życiowe, które zwiększają prawdopodobieństwo przeżycia, jest stałym elementem gospodarki zasobami każdego organizmu nie tylko w warunkach oddziaływania substancji toksycznych. Przy założeniu stałej ilości całkowitej dostępnej energii wzrost inwestycji w produkcję zawsze bowiem oznacza pomniejszenie ilości energii przeznaczanej na pozostałe koszty życia, np. obronę przed drapieżnikami, utrzymywanie sprawnego systemu immunologicznego itp. Zatem wzrostowi inwestycji w produkcję będzie nieodwołalnie towarzyszył wzrost prawdopodobieństwa śmierci.

Początkowo wzrost inwestycji w produkcję przynosi duże korzyści (szybki wzrost tempa produkcji) przy względnie małych stratach (prawdopodobieństwo śmierci rośnie powoli). W miarę dalszego wzrostu inwestycji w produkcję brak zasobów na pozostałe procesy życiowe staje się jednak coraz bardziej dotkliwy i krzywa kompromisu jest coraz bardziej stroma. Na ogół przyjmuje się, że istnieje tylko jeden taki punkt, który daje maksymalne możliwe w danych warunkach dostosowanie, czyli stanowi optymalną kombinację inwestycji w produkcję i w pozostałe procesy, zapewniającą wydanie największej możliwej liczby potomstwa w ciągu życia. Punkt ten jest wyznaczony przez biegnącą od początku układu współrzędnych styczną do trajektorii dostosowania. Gdy organizm narażony jest na oddziaływanie substancji toksycznej, położenie krzywej na układzie współrzędnych musi ulec zmianie. Dwie skrajne możliwości to: (1) utrzymanie niezmiennego prawdopodobieństwa śmierci, co wymaga przeznaczenia pewnej części energii na pokrycie kosztów detoksykacji, przy czym energia ta może być uzyskana wyłącznie kosztem produktywności, oraz (2) utrzymanie stałego tempa produkcji, co z kolei oznacza zaniedbanie detoksykacji i musi prowadzić do wzrostu prawdopodobieństwa śmierci.

Przedstawione powyżej rozumowanie opiera się na założeniu, że obrona przed intoksykacją jest energetycznie kosztowna. Dotychczas dysponujemy bardzo nielicznymi bezpośrednimi danymi na temat kosztów detoksykacji. Istnieją jednak pewne wskazówki pośrednie, które przemawiają za tym, że jest tak faktycznie. Wiadomo, że wiele procesów detoksykacyjnych wymaga syntezy rozmaitych białek, np. enzymów przeprowadzających degradację pestycydów, białek opiekuńczych (hsp) czy metalotionein u zwierząt lub fitochelatyn u roślin. Równocześnie wszelkie enzymy uszkodzone przez substancje toksyczne muszą być stale wymieniane. Koszty syntezy i metabolizmu białek ocenia się na ok. 15% metabolizmu podstawowego. Zatem wymiana i naprawa uszko-

dzonych protein oraz synteza enzymów detoksykacyjnych i białek wiążących substancje toksyczne musi pociągać za sobą dodatkowe obciążenie. Gdyby detoksykacja nie stanowiła istotnego składnika w budżecie energetycznym organizmu, wówczas należałoby oczekiwać, że raz zdobyta i utrwalona w populacji mutacja umożliwiająca szczególnie efektywną detoksykację określonej substancji będzie się w tej populacji utrzymywała nawet po ustaniu czynnika, który spowodował jej rozprzestrzenienie i utrwalenie. Tak się jednak na ogół nie dzieje i po usunięciu ze środowiska substancji chemicznej w populacjach o znacznym tempie rotacji dość szybko eliminowana jest także mutacja odpowiedzialna za jej detoksykację. Podobnie w terenach, gdzie stykają się ze sobą obszary silnie skażone i względnie niezanieczyszczone, populacje odporne na określony rodzaj substancji oraz nie posiadające tej odporności wydają się dobrze od siebie izolowane: nie obserwuje się przenikania osobników odpornych na tereny nieskażone, lecz raczej wyraźną granicę między obiema populacjami.

Jednym z klasycznych przykładów jest znany od lat siedemdziesiątych przypadek odporności na cynk w populacjach traw *Anthoxanthum odoratum* i *Agrostis tenuis* w okolicach kopalni w Trelogan w Walii. W rejonie tym występuje bardzo wyraźna granica między terenem o bardzo wysokich stężeniach cynku w glebie i przylegającym doń terenem o stężeniach tylko niewiele przekraczających naturalne. Na obszarze wysokich stężeń występują odporne na cynk populacje obu gatunków traw, jednak udział osobników odpornych w populacji spada niemal do zera na przestrzeni zaledwie 50 m od granicy między terenem skażonym i nieskażonym. Koszt tolerancji na substancje toksyczne przejawia się także wolniejszym wzrostem osobników odpornych w porównaniu z osobnikami tego samego gatunku pochodzącymi z populacji nieodpornych.

### Substancje toksyczne w łańcuchach troficznych

Zagadnienie przepływu substancji toksycznych w łańcuchach troficznych było jedną z głównych przyczyn rozwoju toksykologii środowiskowej, a w konsekwencji ekotoksykologii. Gdy okazało się, że stężenie niektórych trucizn może wzrastać na kolejnych poziomach troficznych, stało się jasne, że ostateczny skutek oddziaływania substancji toksycznych na zespoły organizmów i ekosystemy może zależeć nie tylko od stężenia tych substancji w środowisku, ale także od procesów o podłożu czysto ekologicznym. Jeśli interesuje nas ogólny wzrost stężenia ( $C$ ) substancji w organizmach dowolnego poziomu troficznego względem jej stężenia w środowisku (wodzie, glebie), mówimy na ogół o jej *biokoncentracji* ze środowiska. Stopień biokoncentracji podaje się w postaci *współczynnika biokoncentracji* (BCF; ang. *bioconcentration factor*), który mówi po prostu, ile razy stężenie substancji chemicznej w organizmach z poziomu troficznego  $n$  ( $C_n$ ) przewyższa jej stężenie w środowisku ( $C_0$ ):

$$BCF = \frac{C_n}{C_0}$$

Jeśli wzrost stężenia zachodzi pomiędzy kolejnymi poziomami troficznymi, to na ogół zjawisko takie nazywa się *biomagnifikacją*, której współczynnik (*BMF*; ang. *bio-magnification factor*) jest zdefiniowany podobnie jak współczynnik biokoncentracji, z tą różnicą, że w mianowniku i liczniku znajdują się stężenia substancji w organizmach dwóch kolejnych poziomów troficznych:

$$BMF = \frac{C_{n+1}}{C_n}$$

Rozróżnienie między biokoncentracją a biomagnifikacją ma sens o tyle, że każde ze zjawisk może zachodzić na drodze odmiennych mechanizmów i fakt, że określona substancja wykazuje tendencję do biokoncentracji, niekoniecznie jeszcze oznacza, że ta sama substancja będzie ulegała biomagnifikacji w łańcuchu troficznym. Biokoncentracja zanieczyszczeń w organizmach może zachodzić na drodze ich pasywnego wchłaniania ze środowiska, np. na drodze dyfuzji lub transportu ułatwionego. Zjawisko biomagnifikacji jest natomiast wyłącznie skutkiem określonej struktury troficznej, wynika bowiem z akumulacji w organizmie substancji konsumowanych wraz z pożywieniem.

Zjawisko biokoncentracji i biomagnifikacji zostało po raz pierwszy udokumentowane w połowie ubiegłego stulecia. Jednym z najlepiej znanych przypadków jest kalifornijskie jezioro Clear, gdzie w latach pięćdziesiątych XX w. do zwalczania komarnic *Chironomidae* z gatunku *Chaoborus astictopus* zastosowano rotan (DDD) – pestycyd pokrewny DDT. Wykazano tam aż 2500-krotny wzrost stężenia DDD u drapieżników szczytowych w porównaniu ze stężeniem pestycydu w wodzie.

Biokoncentracji i biomagnifikacji podlega zarówno DDD, jak i legendarny już insektycyd – DDT. To właśnie bardzo silna biomagnifikacja tych dwóch pestycydów stała się przyczyną wymierania całych populacji ptaków drapieżnych w niektórych rejonach Ameryki Północnej i Europy, a w konsekwencji całkowitego zakazu stosowania DDT i substancji pokrewnych w Ameryce Północnej i Europie. Biomagnifikacja DDT okazała się wręcz zdumiewająca: stężenie między kolejnymi poziomami troficznymi może wzrastać o kilka rzędów wielkości.

Na podstawie późniejszych badań, którymi objęto także innego rodzaju zanieczyszczenia, przede wszystkim metale ciężkie, uznano, że proces biomagnifikacji nie jest, przynajmniej w przypadku metali, zjawiskiem uniwersalnym. Okazało się bowiem, że jeśli, średnio rzecz biorąc, można było stwierdzić wzrost stężenia Cd wzdłuż łańcucha troficznego, to dla cynku i ołowiu współczynniki biomagnifikacji były niskie, czasami nawet niższe od 1,0.

### **Wpływ substancji toksycznych na zespoły organizmów**

Wskutek zróżnicowanej wrażliwości gatunków na substancje toksyczne ich obecność w środowisku może powodować odmienne skutki w dynamice populacji poszczegól-



nych gatunków. Liczebność populacji gatunków bardziej podatnych na działanie określonych substancji chemicznych może ulec drastycznemu obniżeniu, podczas gdy gatunki mniej wrażliwe mogą się rozprzestrzenić. Choć liczba gatunków może pozostać niezmienną, to zasadniczej zmianie może ulec struktura zespołów organizmów. Gdy dla pewnych gatunków stężenie substancji toksycznej w środowisku przekroczy granice tolerancji lub gdy ekspozycja trwa zbyt długo, część gatunków może całkowicie zniknąć z ekosystemu, a ich miejsce mogą zająć gatunki mniej wrażliwe. Zmianie ulega zatem nie tylko struktura zespołu, ale także liczba tworzących go gatunków, czyli bogactwo gatunkowe, przy czym ogólna liczebność w poszczególnych grupach organizmów (np. w większych taksonach lub gildiach, czy też na różnych poziomach troficznych) może, ale nie musi, ulec zmianie. Wreszcie, w skrajnej sytuacji, miejsce pozostawione przez wymierające populacje nie jest zajmowane przez żadne inne organizmy – spada zatem nie tylko bogactwo gatunkowe, ale też ogólna liczebność osobników w poszczególnych grupach taksonomicznych czy funkcjonalnych.

Badanie wpływu substancji toksycznych na zespoły organizmów jest, niestety, dość trudne metodologicznie. Choć z reguły zespoły organizmów zamieszkujących tereny zanieczyszczone substancjami toksycznymi różnią się od zespołów z terenów kontrolnych (nieskażonych), to trudno wykryć jednoznaczne trendy towarzyszące wzrostowi poziomu skażenia. Bogactwo gatunkowe często spada wskutek skażenia, jednak równocześnie wskaźniki bioróżnorodności mogą nie ulegać zmianie, a nawet mogą wzrosnąć w stosunku do terenów niezanieczyszczonych. Dzieje się tak dlatego, że na terenach zanieczyszczonych obserwuje się często bardziej równomierny rozkład osobników pomiędzy poszczególne gatunki, a najczęściej stosowanymi wskaźnikami różnorodności są wskaźniki *de facto* jednorodności gatunkowej zespołu. Z tego powodu do celów ekotoksykologicznych szczególnie przydatne są wskaźniki sumujące informację o bogactwie gatunkowym i jednorodności rozkładu frekwencji poszczególnych gatunków w zespole. Nie ma jednak jednego idealnego wskaźnika tak rozumianej bioróżnorodności. W celu uzyskania jak najbardziej kompletnej informacji o zespole należy więc stosować kilka wskaźników, z których każdy jest miarą innej cechy zespołu.

### **Wpływ substancji toksycznych na procesy zachodzące w ekosystemach**

Najważniejszym poza produkcją procesem zachodzącym w każdym ekosystemie jest dekompozycja martwej materii organicznej, niezbędna dla ponownego uwalniania do obiegu pierwiastków biogenych. Zahamowanie tego procesu jest niewątpliwie zjawiskiem niepożądanym, mogącym prowadzić do spadku produktywności i – być może – innych negatywnych zjawisk. Nic więc dziwnego, że rozkład ściółki znajduje się w centrum uwagi ekotoksykologii, a badania nad skutkami zanieczyszczenia ekosystemów dla procesów dekompozycji prowadzono, zanim jeszcze ekotoksykologia wyodrębniła się dobrze jako osobna dziedzina wiedzy.

W wyniku licznych badań nad tym zagadnieniem stwierdzono ponad wszelką wątpliwość, że zanieczyszczenie metalami może prowadzić do znacznego obniżenia tempa dekompozycji poprzez wyhamowanie aktywności mikroorganizmów glebowych. Długotrwałe spowolnienie tempa rozkładu prowadzi do nagromadzenia nierozłożonej materii organicznej na powierzchni gleby, a tym samym zwiększa się pula biogenów związanych w postaci niedostępnej. Metalami, które ze względu na powszechność występowania w zanieczyszczeniach antropogenicznych uważa się za najpoważniejsze zagrożenie dla procesów dekompozycji, są: cynk, kadm, miedź i ołów.

Powyższy tekst stanowi jedynie pobieżny przegląd najważniejszych problemów, jakimi zajmuje się ekotoksykologia. Więcej informacji, w tym wiele ciekawych przykładów badań, a także skutków oddziaływania substancji toksycznych na organizmy i ekosystemy, można znaleźć w podręcznikach ekotoksykologii.

### Zagadnienia/pytania problemowe

- Co to jest ekotoksykologia?
- Wpływ substancji chemicznych na organizmy żywe.
- „Trudny wybór”, czyli o kompromisach w strategiach życiowych organizmów.
- Wpływ substancji toksycznych na zespoły organizmów oraz na procesy zachodzące w ekosystemach.

### Literatura polecana

- Laskowski R., Migula P. 2004. *Ekotoksykologia od komórki do ekosystemu*. PWRiL, Warszawa.
- Walker C.H., Hopkin S.P., Sibly R.M., Peakall D.B. 2002. *Podstawy ekotoksykologii*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.