Studia
Ecologiae et Bioethicae
2/2004

Bożena SOSAK-ŚWIDERSKA*

Co odróżnia ekotoksykologię od ekologii?

Termin „ekotoksykologia" został wprowadzony do terminologii naukowej pod koniec lat siedemdziesiątych XX. wieku przez francuskiego toksykologa Rhene Truhauta i powstał ze złożenia słów: „ekologia" i „toksykologia". Jeśli zaś mielibyśmy analizować, kto w istocie rzeczy był pierwszym ekotoksykologiem, doszlibyśmy do wniosku, że był to człowiek pierwotny trudniący się zbieractwem, testujący na sobie pokarm o najlepszej przydatności konsumpcyjnej i zdrowotnej.

Z kolei, analizując definicję ekologii, wiemy, że zajmuje się ona oddziaływaniem środowiska na organizmy i *vice versa*. W związku z tym, nie powinny do niej należeć badania prowadzone przez ostatnie 30 lat, a dzisiaj uważane za klasyczne, nad rozmieszczeniem metali ciężkich w tkankach organizmów żywych, czy też badania wewnątrz komórkowych struktur wiążących metale ciężkie. A zatem obiektem badań ekotoksykologicznych nie powinny być obserwacje wkraczające w obręb pojedynczego organizmu, a już zwłaszcza w granice jego tkanek, komórek, czy struktur subkomórkowych.

Gdyby zaś sięgnąć do historii teorii ekologicznych, to istotną rolę w podwalinach ekotoksykologii odegrałoby prawo tolerancji sformułowane przez Shelforda (Laskowski, 1997), które podaje, że każdy czynnik środowiskowy występujący w nadmiarze może obniżać dostosowanie organizmu. Rozglądając się zaś wokół, dochodzimy do przekonania, że czynników szkodliwych – wręcz trujących i toksycznych, mamy w środowisku coraz więcej i choćby z tego powodu ekotoksykologia powinna rozwijać się dynamicznie, nie lekceważąc przede wszystkim gazowych utleniaczy czy niezwykle trwałych i kumulujących się w organizmach metali ciężkich. Znaczna część tych czynników traktowana jest jako zanieczyszczenia środowiska, które przyjęło uważać się za pochodzące z naturalnej promieniotwórczości skał lub erupcji wulkanów. Jednak większa część zagrożeń dla organizmów i ekosystemów to skażenia antropogeniczne, o charakterze chemicznym lub fizycznym. Jednak w ekotoksykologii za zagrożenia dla organizmów i ekosystemów przyjmuje się wszyst-

* Katedra Podstaw Ochrony Środowiska, UKSW w Warszawie.

kie czynniki zarówno „skażenia" (ang. pollutants) jak i „zanieczyszczenia środowiska" (ang. environmental contaminants), których obecność przekracza poziom uznawany za normalny dla danego ekosystemu.

Najliczniejszą grupę spośród takich czynników stanowią ksenobiotyki (gr. ksenos oznacza obcy), które mogą być gazami, cieczami i ciałami stałymi. Najczęściej są gazowymi utleniaczami (ozon, tlenki azotu, siarki, węgla), organicznymi związkami (fenole, kwasy, zasady, polichlorbifenyle) lub odpadami na wysypiskach (tworzywa sztuczne, baterie zawierające metale, wraki samochodów). Większość ksenobiotyków uwalniana jest do środowiska w sposób zaplanowany: w rolnictwie poprzez stosowanie nawozów i pestycydów; w przemyśle w procesach technologicznych oraz w gospodarstwie domowym – podczas zabiegów higienicznych. Znaczna część ksenobiotyków wkracza też do środowiska w sposób całkiem przypadkowy, np.: podczas katastrof w zakładach chemicznych, podczas awarii tankowców lub w trakcie awarii w elektrowniach atomowych.

Ksenobiotyki są zatem czynnikami chemicznymi lub fizycznymi, których szkodliwe działanie oceniane powinno być bardzo wnikliwie w stosunku do organizmów lub ekosystemów. Ocena ich szkodliwego działania rozpatrywana powinna być w zależności od stopnia nagromadzenia czyli koncentracji (stężenia) czynnika oraz od czasu działania i wielkości przestrzeni, na którą ksenobiotyk oddziaływuje. Zatem czas i stężenie czynnika decydować powinno o efekcie działania i odpowiedzi organizmu lub ekosystemu. Miarą jego działania może być efekt natychmiastowy lub długotrwały, szkodliwy, toksyczny, trujący lub zabójczy (śmiertelny). Tego typu rozważania stanowią podstawy ekotoksykologii jako nauki o bezpośrednim wpływie czynników szkodliwych na organizmy, populacje i biocenozy i o wpływie pośrednim ujawniającym się w ekosystemach podczas przechodzenia czynników szkodliwych w procesach przepływu energii i obiegu materii. Dlatego też ekotoksykologia traktowana jest często jako narzędzie do poznawania mechanizmów rządzących losami zanieczyszczeń w środowisku i ich skutkami dla funkcjonowania ekosystemów.

Jednakże przed ekotoksykologami stawia się również proste i zasadnicze zadanie, w którym musi być sformułowana odpowiedź na reakcję organizmu na substancje toksyczne. Ważne jest w tym zadaniu czy wybrany organizm jako gatunek testowy jest reprezentatywny dla ekosystemów, aby odpowiedź organizmu w teście dawała jasną i jednoznaczną odpowiedź. Tymczasem ekolodzy wiedzą doskonale, że dla wielu gatunków takiej prostej odpowiedzi nie można podać i na tej podstawie nie można wnioskować o problemach ekosystemów. Dlatego też w testach ekotoksykologicznych wykorzystuje się standardowe gatunki i standardowe metody aby wyniki były porównywalne i mogłyby być wykorzystywane w procedurach legislacyjnych. W związku z tym przez ostatnie

lata wysiłek został skierowany na wybór najodpowiedniejszych organizmów i metod oraz ich standaryzację. Wiodącą rolę w tych wysiłkach odegrał belgijski profesor ekotoksykologii Guido Persoone, twórca mikorbiotestów typu „toxkit."

Wiele badań ekotoksykologicznych z ostatnich dwudziestu pięciu lat posłużyło do przygotowania standardowych testów zalegalizowanych przez organizacje międzynarodowe ISO, ASTM i komisje OECD. Są to badania przypisane ekotoksykologii stosowanej zaliczanej do inżynierii środowiska. Jednak w ciągu ostatnich kilku lat nastąpił zwrot ku ekotoksykologii teoretycznej. Wpłynęły na to badania biomolekularne i nad energetyką organizmów. Kiedy w latach 80. większość badań uważanych za podstawowe w ekotoksykologii dotyczyła prac nad przepływem substancji toksycznych w łańcuchach troficznych (Hunter i Johnson 1982), to obecnie wielu badaczy pracuje nad poznaniem wpływu substancji toksycznej na podstawowe parametry historii życiowych. Czołowe prace w tym kierunku to: (Sibly i Calow 1989, van Straalen 1989). Autorzy ci zwracają uwagę na koszty energetyczne organizmu (koszty syntezy i metabolizmu białek wynoszą około 15% metabolizmu podstawowego) skierowane na obronę przed działaniem stresogennych czynników środowiskowych, w tym substancji toksycznych.

Wiadomym jest, że w procesach detoksykacyjnych organizmów bierze udział znaczna liczba enzymów i białek wiążących substancje toksyczne. Przy założeniu stałej dostępności organizmów do zasobów energii, oznacza to, że wzrost kosztów obrony w procesach detoksykacyjnych pociąga za sobą spadek produkcji organizmu, a więc może prowadzić do skrócenia życia organizmu. Sibly i Calow (1989) sformułowali teorię stresu wyjaśniającą optymalizację strategii życiowej organizmu w warunkach zagrożeń antropogenicznych. Stąd od ponad 25 lat przedmiotem badań w ekotoksykologii podstawowej są takie parametry populacyjne, jak tempo produkcji i śmiertelności oraz sposoby dostosowywania organizmów do środowiska, w którym są obecne substancje toksyczne.

Interesujące są badania nad dostosowaniem się organizmów do środowiska stresogennego. W środowisku takim organizm dokonuje pewnego kompromisu (ang. trade-off) między inwestowaniem energii w rozród, a przyrost biomasy i obronę. W związku z tym pojawił się termin: hormeza (ogólnie dostosowanie organizmu do obecności niskich dawek substancji toksycznych). Zjawisko hormezy stwierdzane powszechnie do dziś pozostało niewyjaśnione. Należy wyjaśnić hipotezę większej podatności na trucizny niektórych pasożytów niż ich gospodarzy. Drugi przykład hormezy to wzmożenie tempa reprodukcji na skutek wykrycia przez osobniki zagrożenia w momencie, gdy następuje wzrost śmiertelności w populacji. Trzeci przykład: obecność mikroelementów w środowisku w stężeniach suboptymalnych.

Upraszczając, można określić, że ekotoksykologia zajmuje się wpływem wybranych czynników abiotycznych, mających charakter szkodliwy, na czynniki biotyczne w całej biologicznej hierarchii, począwszy od organizmów jednokomórkowych po wielogatunkowe skupiska w biocenozach. Przy wnikliwej ocenie stopnia szkodliwości danego czynnika na wybrany stopień organizacji biologicznej zachodzi konieczność prześledzenia efektu działania i wtedy ekolog w swoich badaniach wnika w głąb obiektu swoich badań (często organizm jednokomórkowy np. glon lub pierwotniak) i wykracza poza obszar badań ekologa, śledząc mechanizmy detoksykacyjne organizmu. Budzi to kontrowersje ekologów, czy ekotoksykologia powinna być dziedziną ekologii w zakresie badań podstawowych. Czy w przypadku oceny efektu szkodliwości czynnika środowiskowego na organizm nie powinna przynależeć do inżynierii środowiska? Takie dylematy zawsze pojawiają się w momentach tworzenia podstaw nowych dziedzin nauki i wymagają dyskusji, co do określenia zakresu badań i zdefiniowania nowych pojęć służących sformułowaniu i uporządkowaniu wiedzy.

Wiadomym jest, że ekotoksykolgia jest nauka multidyscyplinarną, łączącą wiedzę z dziedziny ekologii, toksykologii, chemii, fizyki, biochemii, genetyki i innych nauk. W naukach biologicznych jest aktualnie najbardziej kontrowersyjną dziedziną wiedzy z szeregiem wielu pojęć zaczerpniętych z toksykologii klasycznej, z ekologii, matematyki, chemii i biochemii. Jest nauką kontrowersyjną z punktu widzenia ekologa, dla którego obszarem badań jest wszystko wokół organizmów czy ich zespołów.

Ekolog klasyczny nie ma podstaw do wnikania w obszar składu organizmu, niezależnie czy jest on jednokomórkowy czy złożony z tkanek, narządów lub układów z mniej lub bardziej skomplikowanymi procesami biochemicznymi. Zajmuje się zależnościami organizmu ze środowiskiem i oddziaływaniem środowiska na organizm i jednostki wyższe typu populacja lub biocenoza. Gdybyśmy jednak mieli analizować definicję ekosystemu, jednostki złożonej z biocenoz powiązanych czynnikami abiotycznymi, do których zanieczyszczenia należą jako substancje występujące w środowisku, znaleźlibyśmy wiele obszarów badań dla ekologów klasycznych. Zapewne weszlibyśmy wtedy w obszar ekologii ekosystemowej z rozwiniętą wiedzą na temat cykli biogeochemicznych i przemieszczaniem się substancji przez sieci troficzne. Gdybyśmy z kolei zaczęli badać dostosowania organizmów czy też populacji i biocenoz do zmian zachodzących w środowisku, dotarlibyśmy do obszaru badań ekologii ewolucyjnej, który dotyczy powiązań biologii z genetyką. W takim układzie ekologia ewolucyjna powinna wejść w skład biologii molekularnej i tym samym przetrzeć drogę dla ekotoksykologii aby otworzyć w niej nowy dział pod nazwą ekotoksykokinetyki czyli przemieszczania się substancji toksycznych przez ekosystemy.

Ważnym kierunkiem badań w ekotoksykologii stosowanej są prace nad tzw. QSAR „quantitative structure-activity relationships", czyli nad zależnościami, które pozwalają wnioskować o aktywności ekologicznej (toksyczności, biokoncentracji, biomagnifikacji) danej substancji na podstawie znajomości samej tylko struktury chemicznej. Najwięcej danych na ten temat dotyczy związków organicznych, chociaż metodę QSAR dla innych związków potencjalnie szkodliwych. Do tej pory najwięcej badań przeprowadzono dla ekosystemów wodnych. Interesujące są badania z ostatnich lat w ekosystemach lądowych na temat oddziaływania związków antropogenicznych z naturalnymi substancjami chemicznymi np. związkami humusowymi.

Ważne są w ekotoksykologii prace Kammengi i współpracowników (1995, 1996), w których podają, że fałszywe jest założenie, że podatność organizmów na substancje toksyczne jest determinowana przez najbardziej wrażliwe cechy historii życiowej organizmu. Udowodniono, że organizmy charakteryzują się znaczna plastycznością fenotypową cech historii życiowych i że nawet duże zmiany np. tempa śmiertelności pod wpływem substancji toksycznych nie muszą prowadzić do wielkich zmian w ogólnym dostosowaniu. Zgodnie z ogólną teorią stresu, kompromis między inwestycjami w produkcję i obronę jest tak optymalizowany, aby w danych warunkach maksymalizować ogólne dostosowanie. W praktyce stawia to pod znakiem zapytania sensowność wielu testów standardowych, które opierają się na pomiarach najwrażliwszych reakcji organizmów.

Ekotoksykologia jest zatem nauką kontrowersyjną i interdyscyplinarną. W nowych ekologicznie sensownych testach staje się konieczne poznanie historii życiowych organizmów testowych i przeprowadzenie analizy wrażliwości organizmu pod wpływem stresu, w odniesieniu do zmian jego poszczególnych cech.

Na początku lat 90. zaproponowane zostało przez Van Straalena i Van Gestela (1993) pojęcie stężenia HCp (ang. Hazard Concentration for p%) – stężenia, poniżej którego znajdują się wartości NOEC tylko dla nielicznych (< p%) gatunków. Za standardowy % liczby gatunków zaproponowano dla praktyków wartość 5 i wartość tę określono jako HC5, co oznaczało, że równe lub mniej 5% gatunków jest narażonych na stężenie substancji chemicznej.

Oszacowane dla 5% gatunków stężenie substancji toksycznej zachowuje pewien „margines bezpieczeństwa", ponieważ za HCp przyjmujemy nie bezpośrednio stężenie, od którego NOEC jest niższe dla p% gatunków, lecz dolną granicę przedziału ufności tego stężenia. Pojawiają się problemy, bo nie znamy wartości NOEC dla wszystkich substancji i gatunków, po drugie statystyczne i biologiczne podstawy wyznaczania NOEC są dość wątpliwe (Laskowski 1995b). Obliczone w ten sposób

wartości HCp mają niskie wartości i jak wskazuje Hopkin (1993), trudno byłoby znaleźć ekosystemy, w których nie byłyby one przekroczone. W metodzie tej zaniedbywane są różnice w znaczeniu poszczególnych gatunków dla funkcjonowania ekosystemów, chroniąc skutecznie 95% gatunków i pozostawiając margines wyginięcia 5% gatunków, wśród których mogłyby się znaleźć gatunki najbardziej cenne, chronione dzisiaj w programie NATURA 2000.

HCp oblicza się współcześnie dużo łatwiej ze względu na poznane już dla większości organizmów standardowych wartości NOEC dla najbardziej toksycznych substancji chemicznych. Wartość HCp, gdzie p oznacza frakcje gatunków podlegających ochronie (van Straalen i van Gestel, 1993).

Przykład HCp doskonale obrazuje niemal wszystkie problemy współczesnej ekotoksykologii stosowanej: niejasność celu (chronić konkretne gatunki, wybrane w oparciu o ich znaczenie dla funkcjonowania ekosystemu, czy też pewną frakcję wszystkich gatunków?), kłopoty z aparatem statystycznym (jak precyzyjnie wyznaczyć wartość HCp, by jej przedział ufności nie obejmował absolutnie wszystkich ekosystemów – taka informacja jest bowiem zupełnie bezużyteczna), brak wiarygodnych danych i ogólnie zbyt uboga baza danych (nie dość, że podstawy wyznaczania NOEC są wątpliwe, to na dodatek wartości te są znane tylko dla nielicznych gatunków i substancji chemicznych). Jak tym problemom zaradzić, tymczasem nie wiadomo. Wydaje się, że najpilniejszą potrzebą dziś to opracowanie doskonalszych metod statystycznych dla określenia stopnia zagrożenia poszczególnych organizmów (gatunków) oraz po prostu bardziej ekologiczne podejście do ekotoksykologii.

Wśród ostatnich osiągnięć w materii analizy danych należy odnotować metodę pozwalającą nie tylko wyznaczać wartości EC50 wraz z ich przedziałami ufności, ale pozwalającą także na uwzględnienie efektu hormezy (Lokke 1995). Metoda ta opiera się na przesłankach podobnych do tych wykorzystywanych w farmakologii przy szacowaniu EC50 za pomocą tzw. modelu „Half Maximal Response" (CSS-Statistica 1991). Model ten, choć stosowany także w ekotoksykologii, częstokroć okazuje się tu mniej przydatny właśnie ze względu na niemożność uwzględnienia hormezy.

Współczesne kierunki w ekotoksykologii stosowanej utożsamianej z inżynierią środowiska, zmierzają przede wszystkim do opracowywania zestawów testów ekologicznych do badania antropegenicznych zagrożeń środowiska i wykorzystywania ich potem w praktyce, w pracach badawczych. Cechą charakterystyczną ekotoksykologii jest i to, że stosując podejście badawcze: od organizmów do ekosystemów, analizuje zabiegi eksperymentalne na najszerszej płaszczyźnie. I chociaż jest nauką interdyscyplinarną, to w praktyce – jako dyscyplina – ma swój własny, odrębny charakter odpowiadający aktualnym przedmiotom społecznej troski o środowisko.

Literatura

CALOW P., 1993 – *Handbook of Ecotoxicology*, vol.1 Oxford: Blackwell Science.
CALOW P., 1994 – *Handbook of Ecotoxicology*, vol.2. Oxford: Blackwell Science.
DELL'OMO G. 2000 – *Behaviour in Ecotoxicology*. Chichester: John Wiley & Sons.
HOPKIN S.P., 1993 – *Ecological implications of '95% protection levels" for metals in soil.* Oikos, 66: 137-141.
HUNTER B.A., JOHNSON M.S., 1982 – *Food chain relationships of cooper and cadmium in contaminated grassland ecosystems.* Oikos, 38: 108-117.
LOKKE K. VAN GESTELL, 1998 – (C.A.M. eds) *Handbook of Soil Invertebrate Toxicity tests.* Chichester: John Wiley & Sons.
SIBLY R., CALOW P., 1989 – *A life-cycle theory of responses to stress.* Biol. J. Linn. Soc.37: 101-116.
SIBLY R.M., 1996 – *Effects of populations on individual life histories and population growth rates.* In Newman M.C., Jagge C. (eds) Quantitative Ecotoxicology: a Hierarchical Approach. Chelsea, N.I. Lewis
LASKOWSKI R., 1995 – *Some good reasons to ban the NOEC, LOEC and related concepts in ecotoxicology.* Oikos, 73:140-144
LASKOWSKI R., 1997 – *Ekotoksykolgia '97 – problemy i kierunki badawcze.* Wiadomości Ekol. tom XLIII, 4: 277-291.
VAN STRAALEN N.M., KAMMENGA J.E., 1998 – *Assessment of ecotoxicity at the population level using demographic parameters. In Schuurmann*, G., Markert B. (eds) Ecotoxicology, pp 621-644. Chichester: John Wiley.
VAN STRAALEN N.M. LOKKE H. EDS, 1997 – *Ecological Risk Assessment of Conatminations in Soil London*: Chapman & Hall.

„What is ecological relevance of ecotoxicology?"

SUMMARY

Ecotoxicology is concerned with the toxic effects of chemical and physical agents on living organisms, especially on populations and communities within defined ecosystems; it includes the transfer pathways of those agents and their interactions with the environment. Rene Truhaut, a French toxicologist coined the term ecotoxicology – a new branch of toxicology which defined as the study of the adverse effects of xenobiotics (foreign substances).

Both toxicology and ecology are well established. Ecological studies do not typically deal with the organism itself but stress the relation of organisms to their environments. On the contrary toxicological effects occur at many scales: at the cellular or tissue level and and enzymes are induced.

The most difficult question it seems in ecotoxicology is the choice of endpoint. Environmentally appealing endpoints such as NOEC (no observable effects concentrations) are diffcult to justify.

Ecotoxicology implies the interfacing of the fields of ecology and environmental toxicology at the population level, there is mortality and selection; at the community level, there is replacement of species. Most ecotoxicological research to present has used previously existing methods that were expanded into this new field of research, rathed than developing new or integrated practices. Research into the transport and chemical transformation of substances has become the field of environmental chemistry, which makes use of analitical techniques (for example QSAR).

Ecotoxicology or environmental toxicology and ecology have distinct research programs identify differnet problems and that take different things for granted. In addition are there the differences in tools, methods, theories, and concepts, scientists in each of the two disciplines view them as two different fields. Ecotoxicology is multidisciplinary science and still has not been able to establish iteself.