



Elżbieta Bonda-Ostaszewska

POMIAR BIOKONCENTRACJI ZANIECZYSZCZEŃ W OCENIE SKAŻENIA ŚRODOWISKA, NARAŻENIA ORGANIZMÓW ORAZ PROGNOZOWANIU EKOLOGICZNYCH EFEKTÓW ZANIECZYSZCZEŃ

Elżbieta Bonda-Ostaszewska, dr – Uniwersytet w Białymstoku

adres korespondencyjny:

Instytut Biologii

ul. Świerkowa 20B, 15-950 Białystok

e-mail: elabonda@uwb.edu.pl

MEASUREMENT OF POLLUTANTS BIOCONCENTRATION IN POINT OF THE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF CONTAMINATION, EXPOSURE OF ORGANISMS AND FORECASTING THE ECOLOGICAL EFFECTS OF POLLUTION

SUMMARY: Intensive environmental contamination by chemicals caused by human activities makes the monitoring of biological systems response necessary. It is difficult to predict the effects of pollutants basing only on measuring their concentrations in the abiotic environment. Toxic effects of pollutant are determined by its bioavailability for the accumulation in the body. Measurement of bioconcentration of pollutants in organisms is one of the types of biomonitoring. This allows the tracking the distribution of pollutants in the environment, not only allowing the assessment of environmental pollution, but also the real threat posed by these pollutants for the organisms living in this environment. Monitoring of bioconcentration of pollutant in conjunction with the analysis of their physiological effects and trophic relationships in ecosystems allows the prediction of ecological effects of pollution.

KEY WORDS: biomonitoring, pollutants, ecological effects of pollution

Wstęp

Koncepcja zrównoważonego rozwoju zakłada taki sposób zaspokajania potrzeb współczesnego człowieka, który nie ogranicza możliwości zaspokojenia potrzeb przez przyszłe generacje¹. Oznacza to, że każde współczesne działanie mające na celu polepszenie jakości życia powinno odbywać się w trosce o zachowanie równowagi przyrodniczej oraz trwałości podstawowych procesów przyrodniczych. Nie da się ukryć, że rozwój gospodarczy pociąga za sobą intensywną chemizację środowiska. Rozwój komunikacji i przemysłu oznacza wzrost emisji spalin oraz wytwarzania odpadów przemysłowych, podnoszenie wydajności produkcji rolnej nieodłącznie związana jest z wprowadzaniem do środowiska substancji chemicznych w postaci nawozów sztucznych czy środków ochrony roślin. Stały wzrost populacji ludzkiej związany z podniesieniem jakości życia to dodatkowo zwiększenie ilości odpadów komunalnych. Wszystkie zanieczyszczenia mogą potencjalnie oddziaływać na organizmy bytujące w danym środowisku, co w efekcie może prowadzić do zaburzenia równowagi w ekosystemach. Aby przeciwdziałać temu zjawisku koniecznością staje się więc stałe monitorowanie wpływu zanieczyszczeń na systemy biologiczne.

Znaczenie pomiarów biokoncentracji

Zanieczyszczenia uwalniane do środowiska w pierwszym momencie trafiają do jednego z trzech przedziałów ekosystemu: atmosfery, hydrosfery lub geosfery. Wydaje się więc, że najprostszym sposobem oceny skażenia środowiska substancją zanieczyszczającą jest pomiar jej stężenia w środowisku abiotycznym (powietrzu, wodzie lub glebie). Jednak z punktu widzenia oddziaływania na środowisko jako całości taki pomiar niewiele nam mówi, bo tak naprawdę trucizna staje się trucizną w momencie, gdy wniknie do organizmu (czyli elementu biosfery) i osiągnie tam pewne stężenie krytyczne wywołujące efekty toksyczne, destabilizując w ten sposób funkcjonowanie organizmu, a w konsekwencji również populacji a nawet całego ekosystemu. Zatem stopień oddziaływania zanieczyszczenia na środowisko, będzie uwarunkowany przede wszystkim jego dostępnością biologiczną (biodostępnością), ta zaś zależy od wielu czynników. Biodostępność w dużej mierze wynika z właściwości fizykochemicznych samej substancji takich jak forma chemiczna, rozpuszczalność, lotność, wielkość cząsteczki czy zdolność

¹ D. Kietczewski, *Rozwój zrównoważony w skali regionalnej. Środowisko przyrodnicze – czynnik czy bariera rozwoju?*, w: *Zrównoważony rozwój – aspekty rozwoju społeczności lokalnych*, red. M. Skup, Fundacja Forum Inicjatyw Rozwojowych, Białystok 2009.

adsorpcji². Właściwości substancji chemicznej z kolei mogą być modyfikowane poprzez warunki środowiska takie jak ciśnienie, temperatura, światło, rodzaj gleby czy pH³. Do tego dochodzą również wzajemne oddziaływania pomiędzy zanieczyszczeniami, które mogą zarówno zwiększać jak i zmniejszać dostępność substancji chemicznej dla organizmów. Wynika z tego, że ta sama ilość zanieczyszczeń w różnych warunkach środowiska może stanowić różne zagrożenie dla organizmów tam bytujących, wynikające z różnic w biodostępności. Dlatego też dopiero pomiar koncentracji zanieczyszczeń w organizmach żywych (biokoncentracji) pozwala na pełną ocenę ryzyka wynikającego z wprowadzenia do środowiska danej substancji zanieczyszczającej. Znaczenie tego typu pomiarów bardzo wyraźnie widać na przykładzie naszych badań koncentracji kadmu w tkankach żubrów z Puszczy Białowieskiej oraz bydła z okolicznych terenów⁴. W badaniach tych stwierdzono ponad dwukrotnie większą zawartość metalu w wątrobie i nerkach żubrów w porównaniu z bydłem. Pomiar stężenia metalu w trawach, będących podstawowym źródłem pożywienia tych zwierząt, pokazał podobną zależność – w trawach z leśnych obszarów Puszczy Białowieskiej stwierdzono 2-krotnie większą koncentrację metalu w porównaniu z trawami z pastwisk, natomiast, co ciekawe, całkowita zawartość metalu w glebie nie różniła się na całym badanym obszarze. Wyjaśnienie różnic przyniosło oznaczenie frakcji metalu rozpuszczalnego w wodzie, czyli potencjalnie biodostępnego – była ona ponad 2-krotnie większa w glebach z Puszczy Białowieskiej w porównaniu z glebami z pastwisk. Stwierdzono również istotną ujemną korelację pomiędzy biodostępnym Cd a jego zawartością w trawach oraz między biodostępnym Cd a pH gleby. Okazało się zatem, że większa kwasowość gleb na leśnych obszarach Puszczy Białowieskiej czyni kadm bardziej mobilnym, a tym samym bardziej biodostępnym, zatem i potencjalnie bardziej toksycznym dla dzikich zwierząt (w tym żubrów), mimo podobnej ilości w glebie, co udało się stwierdzić właśnie poprzez pomiar biokoncentracji metalu (zarówno w tkankach roślinnych jak i zwierzęcych). Zatem analiza zanieczyszczeń przy użyciu żywych organizmów daje więcej informacji niż zwykłe pomiary, ponieważ uwzględnia stopień biodostępności zanieczyszczeń. Tradycyjna ocena ryzyka poprzez pomiar ilości zanieczyszczeń w środowisku abiotycznym nie bierze pod uwagę tego typu zależności.

Poza tym pomiar biokoncentracji zanieczyszczeń daje jeszcze jedną możliwość: na podstawie takiego pomiaru u jednego gatunku możemy z dużym prawdopodobieństwem prognozować zagrożenie dla innych gatunków na danym terenie. Wykazano na przykład, że akumulacja kadmu w tkankach ślimaka *Helix-spersa* może być prognozowana z większą precyzją ze stężenia metalu w tkankach

² *Toksykologia: podręcznik dla studentów, lekarzy i farmaceutów*, red. W. Seńczuk, Wyd. Lekarskie PZWL, Warszawa 2002.

³ C.H. Walker i in., *Podstawy ekotoksykologii*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2002.

⁴ T. Włostowski, E. Bonda, A. Krasowska, *Free-ranging European bison accumulate more cadmium in liver and kidneys than domestic cattle in north-eastern Poland*, "Science of the Total Environment" 2006 nr 364, s. 295-300.

stonogi *Oniscus asellus* ($r = 0,906$) żyjącej na tym samym terenie, niż na podstawie zawartości metalu w glebie ($r = 0,808$)⁵. Przykład ten obrazuje ogólną zasadę biomonitoringu, zgodnie z którą łatwiej jest przewidzieć reakcję gatunku A na zanieczyszczenie na podstawie reakcji gatunku B niż na podstawie zawartości zanieczyszczeń w próbach abiotycznych.

Gdzie mierzyć biokoncentrację zanieczyszczeń?

Skoro pomiar biokoncentracji zanieczyszczeń jest tak czułym wskaźnikiem w ocenie oddziaływania zanieczyszczeń na środowisko, pojawia się zatem pytanie o organizmy, które można wykorzystać w takiej ocenie. Podstawowym kryterium doboru jest oczywiście zdolność do akumulacji danej substancji zanieczyszczającej w tkankach, uwarunkowana właściwościami fizjologicznymi organizmu. Dodatkowym atutem jest również powszechność występowania gatunku, co z jednej strony daje możliwość prowadzenia analiz porównawczych zanieczyszczenia różnych terenów, ale przede wszystkim minimalizuje ryzyko naruszenia równowagi biologicznej przy pozyskiwaniu prób do oznaczeń.

Skażenie powietrza monitorowane jest na przykład przy pomocy porostów. Są one pozbawione korzeni, więc wodę i substancje pokarmowe wraz z zanieczyszczeniami pobierają całą powierzchnią plechy. Ze względu na higroskopijność plechy szybko akumulują znaczne ilości zanieczyszczeń⁶. Dobrym bio-wskaźnikiem są również mchy. Wiele gatunków ma szeroki zasięg geograficzny i występują w dużych zagęszczeniach, podobnie jak porosty są pozbawione korzeni, więc zanieczyszczenia czerpią głównie z powietrza, brak kutikuli i epidermy ułatwia wchłanianie. Na przykład skażenie środowiska leśnego w Puszczy Białowieskiej od lat monitoruje się poprzez analizę koncentracji metali w tkankach mchu rokitnika pospolitego. Na podstawie wieloletnich badań udało się na przykład stwierdzić, że teren puszczy ma relatywnie niższe zanieczyszczenie w stosunku do innych obszarów Polski, ale 2-krotnie większe niż przykładowo Norwegia, uznawana za najmniej skażony obszar Europy. Ocena zanieczyszczenia tą metodą pokazała również istotny malejący trend zawartości pierwiastków zanieczyszczających, a także pozwoliła na zidentyfikowanie lokalnych źródeł emisji zanieczyszczeń w postaci miejscowości istniejących na terenie puszczy oraz głównego szlaku komunikacyjnego przebiegającego przez puszcę⁷. Zatem pomiar biokoncentracji pozwala również na długoterminową analizę czasowych i przestrzennych zmian skażenia środowiska, a tym samym również narażenia organizmów żyjących na danym terenie.

⁵ S.P. Hopkin, *In situ biological monitoring of pollution in terrestrial and aquatic ecosystems*, w: *Handbook of Ecotoxicology*, red. P. Calaw, Blackwell, Oxford 1993, s. 397-427.

⁶ A. Kłos, *Porosty – biowskaźniki i biomonitoring zanieczyszczenia środowiska*, „Chemia, Dydaktyka, Ekologia, Metrologia” 2007 nr 12(1-2), s. 61-77.

⁷ E. Malzahn, J. Wójcik, *Metody stosowane w bioindykacji środowiska leśnego Puszczy Białowieskiej*, „Acta Agrophysica” 2012 nr 19(2), s. 355-364.

Niezwykle cennym źródłem informacji w ocenie zagrożenia skażeniem radioaktywnym jest pomiar biokoncentracji pierwiastków radioaktywnych w tkankach grzybów⁸. Na przykład monitoring biologiczny skażenia cezem (Cs) obszaru południowej Norwegii po katastrofie w Czarnobylu w 1986 roku wykazał, że biokoncentracja tego radioaktywnego pierwiastka w tkankach roślin zielonych, zwierząt roślinożernych (owiec, kóz, reniferów), a także w kozim mleku utrzymywała się na stabilnym poziomie przez cały 1986 i 1987 rok. Natomiast w połowie następnego, 1988 roku, zanotowano gwałtowny wzrost koncentracji Cs w mleku kóz i tkankach zwierząt. Okazało się, że wzrost ten był spowodowany obfitym wysypem grzybów na terenach pastwisk, w których koncentracja Cs była nawet 100-krotnie większa w porównaniu z roślinami⁹. Zatem pomiar biokoncentracji dostarcza również informacji o miejscu włączania się substancji zanieczyszczającej do łańcuchów troficznych, dzięki czemu umożliwia śledzenie losów takiej substancji w środowisku, a tym samym (poprzez analizę zależności troficznych) prognozowanie oddziaływania na organizmy. Na przykład w przypadku wspomnianego skażenia radioaktywnego największe zagrożenie istnieje w stosunku do zwierząt w skład pokarmu których mogą wejść owocniki grzybów, mających szczególnie potencjał do akumulacji pierwiastków radioaktywnych oraz zwierząt stanowiących kolejne ogniwa tego łańcucha pokarmowego (w tym również człowieka).

Również pomiar biokoncentracji zanieczyszczeń w tkankach bezkręgowców dostarcza informacji o skażeniu środowiska. Dobrym wskaźnikiem zanieczyszczenia gleby, zwłaszcza metalami, są dżdżownice, które akumulują metale proporcjonalnie do ich zawartości w glebie¹⁰. Podobnie pszczoły, które narażone są na działanie zanieczyszczeń podczas zbierania pyłku kumulują zanieczyszczenia w organizmie. Badania przeprowadzone na obszarach o różnym stopniu zanieczyszczenia antropogenicznego (rejon lotniska wojskowego, okolice Wrocławia oraz obszar leśno-rolniczy jako kontrola) pokazał, że zawartość metali w ciałach pszczół odzwierciedlała zanieczyszczenie terenu danym pierwiastkiem, najniższe stężenia metali zanotowano natomiast na terenie kontrolnym¹¹. Monitoring skażenia ekosystemów morskich powszechnie prowadzi się przy użyciu małży. Liczne gatunki tych zwierząt są szeroko rozprzestrzenione, łatwe do zebrania oraz osiadłe. Ponieważ są one filtratorami przepuszczają przez swoje ciało znaczne ilości wody, sukcesywnie kumulując zanieczyszczenia w tkankach. Badania z wykorzystaniem małży pozwoliły na przykład na długoterminowy monitoring

⁸ M.C. Duff, M.L. Ramsey, *Accumulation of radiocesium by mushrooms in the environment: a literature review*, "Journal of Environmental Radioactivity" 2008 nr 99(6), s. 912-32.

⁹ K. Hove i in., *Fungi: a major source of radiocesium contamination of grazing ruminants in Norway*, "Health Physics" 1990 nr 59, s. 189-192.

¹⁰ M. Rościszewska i in., *Zależność między zawartością niektórych metali ciężkich w podłożu i w dżdżownicy – Eiseniafetida*, „Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie” 2001 nr 386(36), s. 121-127.

¹¹ A. Roman, *Kumulacja pierwiastków śladowych w organizmach pszczół w zależności od stopnia antropopresji środowiska ich życia*, „Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu” 2004 nr 488, s. 361-366.

skażenia kadmem Bałtyku¹² czy estuarium San Francisco¹³ a także na ocenę zanieczyszczenia rzeźnią wybrzeża w okolicach Ravenny we Włoszech¹⁴.

Monitoring biokoncentracji zanieczyszczeń w tkankach ryb prowadzi się na całym świecie przede wszystkim ze względu na powszechność występowania oraz duży udział tych zwierząt w diecie człowieka. Badania z wykorzystaniem ryb umożliwiają ocenę skażenia środowiska przede wszystkim metalami ciężkimi (zwłaszcza rzeźnią) oraz zanieczyszczeń trwałych, takich jak pestycydy, polichlorowane bifenyle, dioksyiny¹⁵.

Cennym źródłem informacji o skażeniu środowiska mogą być również pomiary koncentracji zanieczyszczeń w tkankach żab. Wszystkie etapy rozwoju tych zwierząt przebiegają w kontakcie z wodą płytkich zbiorników powierzchniowych, które stanowią naturalny rezerwuar wód odpływowych z pobliskich terenów, zatem gromadzących wszelkie zanieczyszczenia (na przykład z nawożonych pól czy składowisk odpadów). Poza tym ich jaja nie są chronione skorupką, a skóra charakteryzuje się dużą przepuszczalnością dla wody i substancji w niej zawartych, stąd żaby są bardziej podatne na zanieczyszczenia od innych kręgowców i mogą kumulować znaczne ilości zanieczyszczeń. Na przykład nasze badania koncentracji kadmu w wątrobie i nerkach oraz fluoru w kościach żaby wodnej *Rana esculenta* na terenach sąsiadujących ze składowiskiem odpadów przemysłowych (produkcja nawozów fosforanowych) wykazały nawet 5-krotnie zwiększoną zawartość tych metali u zwierząt odłowionych w pobliżu składowiska odpadów, w porównaniu z żabami z kontrolnego obszaru niezanieczyszczonego (dane nie publikowane), co odzwierciedla różnice w zawartości tych metali w środowisku abiotycznym badanych obszarów.

Ptaki stanowią kolejne, często końcowe ogniwa łańcuchów pokarmowych, stąd pomiar koncentracji zanieczyszczeń w ich tkankach stanowi cenne źródło informacji o zagrożeniu dla drapieżców. Dodatkowo wiele gatunków jest pospolitych, zajmują praktycznie wszelkie nisze ekologiczne, dlatego też analiza zawartości zanieczyszczeń w ich tkankach daje możliwość oceny skażenia zarówno środowisk o wysokiej jak i niskiej antropopresji. Do pomiarów biokoncentracji zanieczyszczeń powszechnie wykorzystuje się takie gatunki, jak: kaczkę, szpakę, gołębia, wróble czy sroki. Na przykład nasze badania zawartości kadmu w tkankach srok wykazały aż 24-krotnie większą zawartość metalu w nerkach ptaków odławianych w Szopienicach koło Katowic (okolice huty cynku) w porównaniu z ptakami pochodzącymi z Kampinoskiego Parku Narodowego (teren kontrol-

¹² H. Fisher, *Cadmium in seawater by mussels: regional decline established*, "Marine Ecology Progress Series" 1989 nr 55, s. 159-169.

¹³ A.J. Gunther i in., *Long-term bioaccumulation monitoring with transplanted bivalves in the San Francisco Estuary*, "Marine Pollution Bulletin" 1999 nr 38, s. 170-181.

¹⁴ O. Cattani i in., *Biomonitoring of mercury pollution in wetland near Ravenna, Italy, by translocated bivalves (*Mytilus galloprovincialis*)*, "Environmental Toxicology and Chemistry" 1999 nr 18, s. 1801-1805.

¹⁵ T.M. Traczewska, *Biologiczne metody oceny skażenia środowiska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.

ny)¹⁶. Dodatkowym atutem pomiarów biokoncentracji w tkankach ptaków jest również możliwość przyżyciowego pobierania materiału do oznaczeń w postaci piór, co dodatkowo pozwala na analizę materiału od tych samych osobników, a więc śledzenie zmian w czasie. Do pomiarów można wykorzystać również jaja ptaków, będące wskaźnikiem kumulacji zanieczyszczeń w krótkim czasie. Na przykład pomiar koncentracji metali w jajach kaczek i gęsi na terenie Dolnego Śląska wykazał nawet wielokrotnie wyższe stężenia metali w jajach ptaków pochodzących z terenów uprzemysłowionych (narażonych na emisje pyłów metalo-nośnych) w porównaniu z rejonami typowo rolniczymi, nie narażonymi na emisje przemysłowe¹⁷. Z kolei wieloletnie badania zawartości PCB w jajach mewy srebrzystej z Wielkich Jezior w USA pokazały malejący trend zanieczyszczenia obszaru tym związkiem¹⁸.

Dobrymi biowskaźnikami skażenia środowiska głównie metalami ciężkimi oraz pestycydami są drobne ssaki (nornica ruda, mysz polna i zaroślowa, ryjówka aksamitna). Wiąże się to z powszechnością ich występowania zarówno w środowiskach czystych jak i zanieczyszczonych. Łatwo je złapać, mają niewielki areał osobniczy i żyją krótko, stąd akumulacja zanieczyszczeń w ich tkankach odzwierciedla aktualne zanieczyszczenie terenu.

Na przykład badania koncentracji metali ciężkich prowadzone w okolicach hut w Warszawie, Krakowie i Bukownie wykazały istotny wzrost zawartości metali (ołowiu, kadmu, cynku i żelaza) w tkankach myszy leśnej w porównaniu z terenem kontrolnym, co koreluje z zanieczyszczeniem tych terenów¹⁹. Na uwagę zasługuje również fakt, że dystrybucja zasymilowanych metali w organizmie małych ssaków jest podobna do człowieka, stąd pomiar biokoncentracji zanieczyszczeń w ich tkankach służy również ocenie ryzyka dla ludzi żyjących na terenie zanieczyszczonym.

Wśród ssaków dobrymi wskaźnikami mogą być również zwierzęta hodowlane, przede wszystkim ze względu na łatwość pozyskiwania tkanek do pomiarów przy okazji rutynowego uboju oraz możliwość przyżyciowego pobrania materiału (krew, mleko, sierść). Niewątpliwym atutem pomiarów biokoncentracji zanieczyszczeń u tych zwierząt jest również możliwość oceny bezpośredniej ekspozycji człowieka na zanieczyszczenia drogą pokarmową. Na przykład wspomniane już badania skażenia radioaktywnego w Norwegii pozwoliły na „wychwycenie” wzrostu zawartości pierwiastków radioaktywnych zarówno w tkankach, jak i mleku zwierząt, stanowiących duży udział w diecie człowieka²⁰. Podobna moż-

¹⁶ T. Włostowski, K. Dmowski, E. Bonda-Ostaszewska, *Cadmium accumulation, metallothionein and glutathione levels, and histopathological changes in the kidneys and liver of magpie (Pica pica) from zinc smelter area*, „*Ecotoxicology*” 2010 nr 19, s. 1066-1073.

¹⁷ Z. Dobrzański i in., *Jaja drobiu wodnego jako indykator skażenia środowiska wiejskiego*, „*Acta Agrophysica*” 2003 nr 1(3), s. 395-401.

¹⁸ C.H. Walker i in., *Podstawy ekotoksikologii*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2002.

¹⁹ M. Damek-Poprawa, K. Sawicka-Kapusta, *Damage to the liver, kidney, and testis with reference to burden of heavy metals in yellow-necked mice from areas around steelworks and zinc smelters in Poland*, „*Toxicology*” 2003 nr 186, s. 1-10.

²⁰ K. Hove i in., op. cit., s. 189-192.

liwość pozyskiwania materiału do badań istnieje w przypadku ssaków łownych, co z kolei stwarza dodatkową możliwość monitorowania ekosystemów naturalnych i oceny zagrożenia zanieczyszczeniami dla dzikich zwierząt. Wskaźnikiem skażenia środowiska wykorzystywanym często do badań jest zając szarak (*Lepus europaeus*), najliczniejszy gatunek łowny o ograniczonym obszarze żerowania. W wątrobie i nerkach tych zwierząt obserwuje się akumulację metali ciężkich proporcjonalną do stężenia w środowisku życia²¹. Wskaźnikiem zanieczyszczenia metalami ciężkimi może być również zawartość pierwiastków w tkankach innych ssaków łownych, takich jak sarna, jeleni i dzik.

Informacje o skażeniu środowiska poprzez pomiar biokoncentracji zanieczyszczeń można uzyskiwać nie tylko poprzez analizę tkanek organizmów bytujących w danym środowisku, ale również poprzez celową ekspozycję wybranych gatunków przeniesionych do środowiska zanieczyszczonego. Na przykład skażenie powietrza bada się poprzez ekspozycję mchu torfowca z rodzaju *Sphagnum*, akumulacja zanieczyszczeń w tkankach dżdżownic dostarcza informacji o skażeniu gleby, a do oceny czystości wód powszechnie wykorzystuje się kielża (*Gammarus pulex*) oaz omułka (*Mytilus edulis*)²². Również przy tego typu badaniach, poza oceną skażenia środowiska uzyskuje się przede wszystkim informację o biodostępności zanieczyszczeń w danym środowisku, co pozwala ocenić realne zagrożenie dla organizmów żyjących na badanym obszarze.

„Bioakumulatory” zanieczyszczeń i szacowanie narażenia na zanieczyszczenia

Cenną informacją uzyskiwaną podczas pomiarów biokoncentracji zanieczyszczeń jest możliwość identyfikacji gatunków, które, ze względu na swoje właściwości fizjologiczne, odznaczają się szczególnym potencjałem do kumulacji niektórych zanieczyszczeń (tak zwanych „bioakumulatorów” zanieczyszczeń). Dzięki temu można również zidentyfikować gatunki szczególnie narażone na działanie zanieczyszczeń, będące kolejnymi ogniwami łańcucha troficznego, w skład którego wchodzi taki bioakumulator. Jest to niezwykle istotne zwłaszcza w przypadku gatunków rzadkich, cennych ekologicznie i umożliwia wczesne podjęcie działań ochronnych. Pozwala to również na szacowanie narażenia na zanieczyszczenia dla wielu innych gatunków z wyższych poziomów troficznych, w tym człowieka. Na przykład wieloletnie badania nad biokoncentracją kadmu w różnych organizmach pozwoliły na identyfikację bioakumulatorów tego toksycznego metalu, wśród których wymienia się na przykład wierzby, nasiona roślin oleistych (pestki słonecznika, orzeszki ziemne, siemię lniane), tytoń, niektóre warzywa

²¹ R. Wrzesień, E. Budzińska-Wrzesień, M. Chudzicka, *Problemy kumulacji wybranych metali ciężkich w organizmach bażanta i zająca związane z ich bazą żerową*, „Annals of Warsaw Agricultural University” 1999, s. 247-250.

²² C.H. Walker i in., op. cit.

liściaste (sałata, szpinak), a wśród zwierząt mięczaki i skorupiaki, oraz wątrobę i nerkę zwierząt hodowlanych i łownych. W efekcie na podstawie zawartości metalu w poszczególnych komponentach, wchodzących w skład diety, można ocenić ekspozycję człowieka na ten metal drogą pokarmową. Uwzględniając maksymalne koncentracje metalu w produktach pochodzących z terenów zanieczyszczonych oszacowano, że codzienne narażenie człowieka na kadm może znacznie przekraczać poziom uznany przez WHO za bezpieczny ($70 \mu\text{g/g}$), co wiąże się z ryzykiem wystąpienia objawów toksycznego działania metalu²³.

Pomiar biokoncentracji zanieczyszczeń i prognozowanie efektów ekologicznych

Biokoncentracja jest procesem, w którym substancje chemiczne ze środowiska dostają się do organizmów i są tam akumulowane²⁴. Osiągnięcie przez daną substancję pewnego poziomu krytycznego prowadzi do zaburzeń procesów fizjologicznych będących efektem uszkodzenia tkanek i narządów. Zmiany takie powodują obniżenie odporności również na inne stresory i w konsekwencji zmniejszenie przeżywalności oraz potencjału rozrodczego poszczególnych osobników. Zaburzenia te wcześniej czy później z poziomu osobnika przenoszą się na poziom populacji i ujawniają się w postaci zmniejszenia jej liczebności, co w konsekwencji prowadzi do naruszenia równowagi całego systemu biologicznego, powiązanego zależnościami troficznymi. Dlatego też pomiar biokoncentracji zanieczyszczeń na różnych poziomach troficznych, w połączeniu z analizą skutków działania zanieczyszczenia na poziomie organizmów oraz zależności troficznych w ekosystemie, daje możliwość prognozowania ekologicznych efektów zanieczyszczeń. Na przykład zwiększenie koncentracji metali ciężkich w tkankach małych ssaków na terenach zanieczyszczonych prowadzi do poważnego uszkodzenia i zaburzenia w funkcjonowaniu narządów rozrodczych tych zwierząt²⁵, czego konsekwencją może być zmniejszenie sukcesu rozrodczego i spadku liczebności populacji. Można zatem prognozować, że kolejnym etapem będą zmiany liczebności zwierząt z wyższych poziomów troficznych. Efekt taki zaobserwowano w przypadku kuropatw w Anglii, gdzie zmniejszająca się liczebność tego gatunku była spowodowana obniżeniem przeżywalności piskląt na skutek zmniejszenia ilości owadów, w wyniku zatrucia pestycydami²⁶. Podobny efekt zaobserwowano w przypadku rybożernych ptaków Wielkich Jezior Ameryki Północnej, gdzie kumulacja pozostałości pestycydów w wodach jezior w kolejnych ogniwach łańcu-

²³ S. Satarug i in., *A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population*, "Toxicology Letters" 2003 nr 137, s. 65-83.

²⁴ T.M. Traczewska, op. cit.

²⁵ R. Świergosz, *Tissue changes in animals and their population effects*, w: *Demography in ecotoxicology*, red. J. Kammenga, R. Laskowski, John Wiley&Sons Ltd 2000, s. 241-261.

²⁶ J. Potts, op. cit.

cha pokarmowego (plankton, ryby roślinożerne, ryby drapieżne) spowodowała widoczne zaburzenia rozrodu i w konsekwencji zmniejszenie populacji ptaków²⁷. Zatem pomiar biokoncentracji zanieczyszczeń w organizmach (zwłaszcza z początkowych elementów łańcuchów troficznych) może stanowić swego rodzaju system wczesnego ostrzegania przed możliwymi konsekwencjami wprowadzenia do środowiska substancji zanieczyszczającej.

Podsumowanie

Pomiar koncentracji zanieczyszczeń jest niezwykle czułym wskaźnikiem skażenia środowiska. W odróżnieniu od tradycyjnych pomiarów zawartości zanieczyszczeń w środowisku abiotycznym, pozwala na ocenę realnego zagrożenia organizmów bytujących na terenach zanieczyszczonych, informując o biodostępności substancji zanieczyszczającej. Pozwala również na śledzenie losów zanieczyszczeń w ekosystemach, a w połączeniu z analizą efektów fizjologicznych na poziomie osobnika oraz zależności troficznych w ekosystemach umożliwia prognozowanie ekologicznych, często odległych, efektów działania zanieczyszczeń.

²⁷ C.H. Walker i in., op. cit.