Artykuł pochodzi z archiwalnych zasobów firmy EKO-KONSULT sp. z o.o. 80-557 Gdańsk, ul. Narwicka 6.
Wszystkie prawa zastrzeżone.
Korzystanie za zgodą firmy EKO-KONSULT biuro@ekokonsult.pl

Kwartalnik „Problemy Ocen Środowiskowych" wydawany cyklicznie w latach 1998 – 2012, przez EKO-KONSULT był jedynym wydawnictwem w Polsce, poświęconym wyłącznie ocenom środowiskowym planowanych inwestycji oraz strategicznym ocenom oddziaływania na środowisko. Dla praktyków OOŚ, ale również dla osób początkujących może nadal stanowić wartościowe źródło wiedzy np. w zakresie prezentowanych case study i przeglądu stosowanych metodyk - w tym kontekście znaczna część artykułów zachowuje sporo aktualności.

Artur Michałowski

Ekosystemowe procesy rozkładu materii organicznej i odpadów jako usługi środowiska

Wstęp

W literaturze brak jest jednoznacznego określenia pojęcia usług. Przyczyn tego stanu rzeczy należy doszukiwać się w poglądach Smitha, który starał się udowodnić, iż ekonomia zajmuje się tylko materialnymi środkami zaspokajania potrzeb. Podzielił pracę na produkcyjną (produkcję materialną) i nieprodukcyjną (świadczenie usług niematerialnych). Zauważył, iż tylko produkcja materialna może stanowić przedmiot akumulacji kapitału, a usługi są czynnościami nie przynoszącymi dochodu. Smithsowski punkt widzenia przyjął Taylor twierdząc, że usługi nie są przedmiotem gospodarowania, a tym samym celem badań ekonomicznych [12].

Istnienie wielu odmiennych definicji usług zadecydowało o tym, iż w literaturze zachodniej i krajowej, pojawił się pogląd o konieczności stosowanego ich pogrupowania [3]. W związku z tym wyróżniono następujące rodzaje definicji usług:

- enumeratywne - polegające na wyliczeniu, jakie czynności zaliczone zostają do usług,
- negatywne - określają to, co z całą pewnością usługami nie jest; do tej grupy należy klasyczna definicja sformułowana przez Langego,
- konstruktywne zorientowane na:
  - potencjał - usługodawca utrzymuje określoną zdolność usługową poprzez kombinację wewnętrznych czynników produkcji, dopiero w momencie kontaktu usługodawcy z usługobiorcą powstaje nowa wartość - usługa,
  - proces (czynność) - usługa utożsamiana jest z określoną fazą procesu produkcji usług,

przy czym nabywca wprowadza siebie bądź obiekt (czynnik zewnętrzny) do procesu,

- wynik - usługa jest produktem nierzeczowym.

Obecna struktura usług w gospodarkach poszczególnych państw jest rezultatem zmian charakteru usług w kolejnych etapach rozwoju społeczno-gospodarczego.

W ostatnim okresie teoria ekonomii środowiska i zasobów naturalnych dostrzega potrzebę badań usług środowiska. Badacze podkreślają, iż:

- usługi środowiska stanowią jedną z podstaw koncepcji trwałego i zrównoważonego rozwoju społeczno-gospodarczego,
- usługi środowiska opierają się na niezwykle skomplikowanych mechanizmach przyrodniczych, których zastąpienie przez technologie jest często niemożliwe,
- działalność człowieka niszcząca naturalne ekosystemy powoduje pogarszanie się jakości usług środowiska,
- jakość usług środowiska jest ograniczana przez krótkoterminowe korzyści i zyski ekonomiczne.

Celem niniejszego opracowania jest próba wykazania potrzeby głębszej analizy problematyki ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów jako usług środowiska w teorii i praktyce zarządzania środowiskiem.

Charakterystyka źródeł produkcji usług środowiska

Pod pojęciem usług środowiska należy rozumieć produkcję usług przez ekosystemy, polegającą na dostarczaniu przez biosferę materii, energii i informacji potrzebnych do życia człowieka [11, 16, 8, 9, 10]. Usługi środowiska można usystematyzować według następujących rodzajów głównych:

- usługi surowcowe, produkcyjne i transformacyjne,
- usługi regulacyjne i utylizacyjne,
- usługi przygotowania przestrzeni dla antropogenicznego wykorzystania,
- usługi informacyjne [6].

Źródłami produkcji usług w ekosystemach są jego elementy zorganizowane w struktury. Struktury ekosystemów powstają przez stowarzyszanie się populacji wielu gatunków i jest to zależne od środowiska i czasu. Powstawanie nowych ekosystemów zachodzi szybciej niż powstawanie nowych gatunków. Tworzenie nowych zgrupowań osobników i przemieszczanie gatunków przez ludzi prowadzi do spontanicznego powstawania ekosystemów o różnej strukturze i trwałości. Każdy ekosystem jest właściwie jednostką niepowtarzalną, przestrzennie ciągłą, a większość nie ma wyraźnych granic. Przestrzeń ekosystemów jest jedną z ich cech życiowych.

Ekosystemy w pewnym sensie są niezniszczalne, ponieważ prawie zawsze na miejsce zniszczonego systemu wkracza jakiś inny, na przykład w miejsce wyciętych lasów mogą powstać ekosystemy łąkowe lub polne. Różnorodność struktury ekosystemów jest więc zjawiskiem, na

które składa się między innymi:

- rozmaitość typów ekosystemów: zwykle obszar, na którym występuje więcej typów ekosystemów, charakteryzuje się większą różnorodnością;
- zróżnicowanie strukturalne ekosystemów: obszar z wielowarstwowymi ekosystemami leśnymi ma większą różnorodność od obszaru z jedno- lub dwuwarstwowymi ekosystemami trawiastymi;
- kontrastowość ekosystemów: obszar, na którym występują ekosystemy leśne i łąkowe, ma większą różnorodność od tego, gdzie występują tylko leśne lub łąkowe;
- wielkość obszarów jednolitych pod względem siedliskowym: strefowy lub mozaikowy system przestrzenny, nawet jeśli w systemie powtarzają się te same typy systemów, ma większą różnorodność od systemów wielkopowierzchniowych,
- stopień naturalności ekosystemów: cenniejsze są układy trwałe i naturalne od antropogenicznych, antropogeniczne półnaturalne od zdegradowanych.

Geologiczna, geomorfologiczna, hydrologiczna i klimatyczna zmienność warunków abiotycznych przestrzeni, w której rozwija się życie, powoduje, że dany obszar zajęty jest przez wiele różnych osobników. Struktura ekosystemu warunkuje rodzaj i przebieg procesów ekologicznych. Charakteryzują się one specyfiką oddziaływań między różnymi osobnikami, scalającymi je w jeden system.

Można wyróżnić następujące rodzaje oddziaływań:

- fizyczne,
- chemiczne,
- biologiczne.

Oddziaływania te określają sposób funkcjonowania każdego z ekosystemów oraz związki między ekosystemami graniczącymi. W strukturze ekosystemów przebiegają interakcje między oddziaływaniami: sumowanie, wzajemne znoszenie lub wzmacnianie (synergizm). W ekologiczno-ekonomicznych badaniach usług środowiska trudnym ekologicznie zagadnieniem jest delimitacja ekosystemów (określenie ich przestrzennego zasięgu). Można próbować rozwiązać ten problem poprzez charakterystykę różnorodności wewnętrznej ekosystemów. Komplikacja wewnętrzna mozaiki, jaką tworzą w przestrzeni obszary różnego i tego samego typu, różnej powierzchni i różnego kształtu oraz składniki liniowe i punktowe, daje wewnętrzną różnorodność struktury przestrzennej ekosystemu. Struktura ta jest podstawą dla przebiegu procesów ekologicznych, w tym procesów rozkładu materii organicznej i zanieczyszczeń.

Ekosystemowe procesy rozkładu materii organicznej i odpadów

Rozkład materii organicznej i odpadów jest drugim, obok produkcji, charakterystycznym dla całego środowiska i jego ekosystemów zespołem procesów. Jest to przejaw procesów oddychania

pojedynczego organizmu obserwowanym na poziomie ekosystemu. Rozkład polega na przetwarzaniu wielkocząsteczkowych związków na proste związki nieorganiczne, m.in.: dwutlenek węgla, wodę, jony wodorowe, aniony i kationy. Energia zawarta w związkach chemicznych zostaje uwolniona w postaci ciepła. Procesy te przebiegają stopniowo, mając wiele stadiów pośrednich i nie zawsze dobiegają do końca. Rozkład może jednak odbywać się w ekosystemach bez udziału organizmów żywych. Częściowa mineralizacja martwych szczątków organicznych dokonuje się pod działaniem tlenu atmosferycznego, promieniowania słonecznego i wody. Jest to proces powolny. Szybki i efektywny rozkład abiotyczny zachodzi na skutek pożarów lasów lub stepów. Jest to zjawisko naturalne, występujące dość często dla niektórych ekosystemów, na przykład borealne lasy Ameryki Północnej, zarośla śródziemnomorskie, australijski busz. Dane paleontologiczne wykazują, iż co najmniej kilkakrotnie w historii Ziemi w ten sposób dokonała się radykalna mineralizacja ogromnej masy nagromadzonej materii organicznej. Ogromne pożary obejmujące całe kontynenty przyczyniły się do zmiany składu atmosfery, globalnych warunków klimatycznych i do gwałtownego wymarcia znacznej liczby gatunków.

Materię organiczną i odpady rozkładają wszystkie organizmy żywe. Rośliny mineralizują z powrotem połowę zsyntetyzowanych przez siebie związków organicznych, zużywając na to tlen i wydalając dwutlenek węgla. Konsumenci i destruenci doprowadzają do formy mineralnej większość pobranej z otoczenia materii organicznej, zarówno żywych organizmów, jak i martwych szczątków (detrytusu).

Produktami przemiany materii u roślin są przede wszystkim dwutlenek węgla i woda. Rośliny wydzielają również niewielką ilość prostych związków organicznych i amoniaku. Biorąc pod uwagę, iż wydajność produkcji netto większości roślin wynosi około 50%, można stwierdzić, iż rośliny rozkładają połowę materii organicznej powstałej w procesie fotosyntezy.

Znaczna część skonsumowanej materii opuszcza ciało roślinożerców lub mięsożerców w postaci dwutlenku węgla, wody i jednego z produktów przemian białkowych: amoniaku, kwasu moczowego lub mocznika, rzadziej innych prostych związków azotowych. Niestrawione szczątki, wydalane w postaci kału, zawierają w znacznej mierze materiał o niezmienionej budowie chemicznej, na przykład celulozę, ligninę, niektóre białka. Oprócz tego jednak zawierają znaczną ilość prostszych związków organicznych, które są podatne na dalszy, szybki rozkład. Kał jest również zazwyczaj bardziej mechanicznie rozdrobniony i zhomogenizowany niż zjadany pokarm, co ułatwia dostęp mikroorganizmów do substratu. U znacznej liczby gatunków zwierząt mikroorganizmy rozpoczynają swoją działalność jeszcze wewnątrz przewodu pokarmowego konsumenta. We wszystkich ekosystemach, zwłaszcza na lądach, udział konsumentów w rozkładzie materii organicznej jest mniejszy niż innych grup organizmów.

Ostatecznej mineralizacji największej części materii organicznej dokonują destruenci. We wszystkich typach ekosystemów w procesach tych uczestniczy wiele różnych organizmów. Związki organiczne muszą być rozłożone w wielu etapach przez liczne gatunki bezkręgowców, bakterii i

grzybów. W łupkach węglistych i grafitowych można jednak spotkać związki organiczne pochodzenia biologicznego, które zostały wytworzone na początku powstania życia na Ziemi i dotychczas nie uległy pełnemu rozkładowi. Paliwa kopalne (węgle, ropa, łupki bitumiczne, bursztyn) są nie do końca zmineralizowanymi resztkami organizmów sprzed kilkudziesięciu lub kilkuset milionów lat.

W warunkach lądowych, przy odpowiedniej wilgotności i umiarkowanym utlenianiu, szczątki roślinne ulegają rozkładowi z aktywnym udziałem mikroorganizmów. Oprócz wody, dwutlenku węgla i związków mineralnych powstaje przy tym mieszanina złożonych i słabo poznanych związków, tzw. kwasów humusowych. Wśród tej grupy można wyróżnić rozpuszczalne kwasy huminowe i fulwowe. Powstaje też frakcja nierozpuszczalna, o niejednorodnym składzie. Podczas rozkładu białek w glebach powstają aminokwasy i aminy. Większość polisacharydów, głównie celuloza i hemiceluloza, wchodzi w skład kwasów huminowych. W przypadku rozkładu kory drzew, która zawiera bogate w aromatyczne struktury ligniny, radzą sobie z nim prawie wyłącznie grzyby. Niektóre bakterie w warunkach beztlenowych mogą dokonać tylko częściowego rozkładu. Lignina pojawiła się w większej ilości dopiero u roślin lądowych. Bardzo długo nierozłożone pozostają naturalne woski roślinne. Podobnie zachowują się żywice. Na przykład bursztyn bałtycki jest żywicą, która pozostała nierozłożona od kilkudziesięciu milionów lat. Jednym z najtrudniejszych do rozłożenia związków jest chityna, która jest nie tylko budulcem szkieletu zewnętrznego bezkręgowców, ale również buduje ściany komórek grzybów. Wszystkie te związki: lignina, woski, żywice, a także garbniki i inne związki fenolowe stanowią ochronę roślin przed przedwczesnym rozkładem. Są to związki bardzo trwałe i mikroorganizmy nie mogą sobie z nimi poradzić nawet po obumarciu rośliny.

W wodach rozkład materii organicznej i odpadów rozpoczyna się już w planktonie. Rozkładowi ulega martwa materia organiczna pochodząca z obumarłych komórek glonów i odchodów planktonowych konsumentów. W przypowierzchniowych warstwach wód oceanicznych (0 - 300 m) średnia masa żywych bakterii w jednostce objętości wody przewyższa masę zooplanktonu. W głębszych warstwach ilość bakterii jest mniejsza, ale procesy bakteryjnego rozkładu występują na każdej głębokości. Produktami rozkładu glonów morskich są m.in. wolne cukry. Zawierają one niewiele celulozy, lecz inne polisacharydy, w tym alginiany i hemicelulozy. U wielu planktonowych glonów (na przykład okrzemek) znaczną część biomasy stanowią lipidy, nawet do 25 - 50% suchej masy. Decyduje to o odmiennym charakterze produktów rozkładu materii organicznej w oceanach. Woda morska może zawierać 0,1 - 1,5 mg lipidów w jednym litrze, w postaci koloidalnej lub rozpuszczonej. W wyniku rozkładu celulozy powstają, podobnie jak w ekosystemach lądowych, rozpuszczalne kwasy humusowe i drobna zawiesina, czyli humus wodny. Materia ta nie ulega dalszemu rozkładowi bakteryjnemu. W dostatecznie natlenionej wodzie część wodnego detrytusu może ulegać mineralizacji chemicznej. W efekcie większość zdegradowanej materii organicznej w oceanach pozostaje w postaci rozpuszczonej. W warstwach

powierzchniowych ilość ta sięga 0,6 - 1,5 mg węgla organicznego na litr. W głębokich warstwach wód oceanicznych substancja ta jest bardzo trwała, ponieważ średni czas trwania wynosi 3 000 lat. Wyliczono, iż ogólna masa rozpuszczonych związków węgla w oceanach sięga 1800 x 10^{15} g C, co znacznie przewyższa masę wszystkich obecnie żyjących organizmów. Mniejszy udział w puli węgla organicznego w oceanie ma drobnodyspersyjna zawiesina (cząstki o wymiarach 0,4 - 200 μm) - 30 x 10^{15} g C. Osadza się ona na dnie wraz z cząstkami mineralnymi.

Na dnie oceanów i głębokich jezior słodkowodnych w warunkach beztlenowych tworzy się sapropel, czyli luźna zawiesina szczątków organicznych i mineralnych w gęstym roztworze przydennym, stopniowo przechodząc w trwały osad. W osadzie tym trwają cały czas powolne procesy prowadzące do powstania związków niewystępujących w organizmach żywych, przede wszystkim bardzo złożone i słabo poznane kwasy huminowe i fulwinowe. Od związków humusowych powstających w ekosystemach lądowych różni je brak aromatycznych łańcuchów fenolowych, ponieważ plankton nie zawiera ligniny. Sapropel zawiera też rozpuszczalne cukry i pochodne rozkładu lipidów. W głębinach oceanicznych większość procesów rozkładu odbywa się w warunkach beztlenowych. Powoduje to, iż bakterie są w stanie wykorzystać zaledwie 5 - 10% energii związków organicznych. Część energii pozostaje związana w produktach mineralizacji redukcyjnej: siarkowodorze, metanie, wodorze. Siarka ze związków organicznych przechodzi w siarczki. Białka rozkładają się tylko częściowo, pozostają substancje o masie cząsteczkowej rzędu 10 000. Na mniejszej głębokości odbywa się rozkład w warunkach tlenowych z udziałem swoistych mikroorganizmów. Białka zostają szybko rozłożone do aminokwasów. Procesy tlenowe są skuteczniejsze i doprowadzają do szybkiego zmineralizowania docierającej tam materii, co prowadzi do małej ilości węgla organicznego w osadach. Węgiel pochodzenia organicznego przechodzi do osadów w postaci węglanów.

Tempo procesów rozkładu można opisywać korzystając z modelu wykładniczego:

$$X = X_0 e^{-kt}$$

gdzie:
X - ilość pozostałego materiału
X_0 - ilość początkowa
k - stała tempa rozkładu
t - czas.

Jeżeli czas jest mierzony w latach, to po pierwszym roku rozkładu frakcja nie rozłożonego materiału będzie wyrażać się wzorem:

$$X/X_0 = e^{-k}$$

a stąd: $k = \ln(X_0/X)$.

Rozkład ma charakter wykładniczy, więc nie można stwierdzić w jakim czasie cała materia zniknie. Wylicza się natomiast po jakim czasie zostanie rozłożone 95% materiału (wskaźnik t_{95}).

Inne podejście wychodzi z założenia, iż ilość materii organicznej w ekosystemie pozostaje w dynamicznej równowadze. Oznacza to, że co roku rozkładowi powinna ulegać taka ilość materii, jaka w danym roku opada. Można więc powiedzieć, iż to podejście zakłada, że rozkładowi ulega stała frakcja materiału:

$$\text{Opad} = k\ (\text{masa materii})$$

czyli

$$\text{Opad}/(\text{masa materii}) = k$$

Jeżeli założenie o zbilansowanym tempie produkcji i rozkładu jest spełnione, to współczynniki k z powyższych równań są równoważne. Odwrotność współczynnika k (1/k) określa przeciętny czas pozostawania materii organicznej w ekosystemie. Przy szybkim tempie rozkładu i braku akumulacji węgla organicznego (na przykład w ekosystemach lasów deszczowych) warunki sprzyjają rozkładowi większej ilości materiału niż rzeczywiście jest dostarczany, więc k jest większe od 1. Odwrotnie (na przykład w torfowiskach lub tajdze) jest gdy tempo rozkładu jest znacznie wolniejsze niż tempo produkcji. Współczynnik k może być wtedy bardzo mały, na przykład 0,03. Każda cząsteczka wyprodukowanej materii długo pozostaje nie rozłożona, przeciętnie na przykład 30 lat. W wyniku tego materii organicznej przybywa. W ekosystemach trawiastych k zawiera się między 0,2 i 0,6 [14].

Tempo rozkładu zależy również od rodzaju materiału i od warunków środowiskowych w danym ekosystemie, przede wszystkim od temperatury i wilgotności. Tempo wszystkich procesów chemicznych (w tym ekologicznych) zmienia się wykładniczo wraz z temperaturą. W biologii zjawisko to ujmuje się ilościowo za pomocą współczynnika Q_{10}. Określa on ile razy wzrośnie tempo reakcji po podwyższeniu temperatury o 10°C. Współczynnik dla rozkładu wynosi około 2. Obfitość wilgoci i temperaturę integruje wskaźnik rzeczywistej ewatotranspiracji (AET), ponieważ tempo rozkładu, szczególnie w początkowej fazie, dobrze koreluje z tym wskaźnikiem. Na jego podstawie można szacować tempo rozkładu w większych ekosystemach.

W początkowych stadiach tworzenia gleby zawsze przybywa materii organicznej. Tempo akumulacji waha się od 0,2 do 15 g C x m^{-2} x rok^{-1} w tundrze i tajdze. Odpowiednio inne ekosystemy mają wartości pośrednie. Proces tworzenia gleby może trwać od kilkuset do kilkunastu tysięcy lat. W dojrzałym ekosystemie tempo akumulacji może spaść prawie do zera lub utrzymywać się stale na wysokim poziomie. Odpowiednio do tego średni czas zatrzymania nierozłożonej materii organicznej może wahać się w szerokich granicach. Poszczególne typy ekosystemów zawierają więc rozmaitą ilość zakumulowanej martwej materii organicznej. W ekosystemach lądowych występuje około dwa razy więcej zakumulowanej materii organicznej w

postaci martwego detrytusu niż w biomasie. Jest to ilość tego samego rzędu, co zawartość martwej materii organicznej w oceanie. Tylko w równikowych ekosystemach lasów deszczowych i lasów strefy umiarkowanej stan biomasy jest wyższy niż stan materii organicznej.

Tempo rozkładu zależy ponadto od tego, czy mikroorganizmy mają odpowiednią ilość nie tylko substratu energetycznego, lecz również azotu, fosforu i innych pierwiastków odżywczych. W toku rozkładu materiału jego skład chemiczny zmienia się w charakterystyczny sposób: ubywa węgla, który uległ utlenieniu, a przybywa procentowo azotu i fosforu, wbudowywanego w biomasę żywych destruentów. Jeżeli materiał roślinny poddany rozkładowi od początku był ubogi w pierwiastki odżywcze, tempo rozkładu będzie powolne. Wzrost liczebności mikroorganizmów jest wtedy ograniczony i może nastąpić dopiero wtedy, gdy na przykład sinice zwiążą wystarczająco dużo azotu atmosferycznego. Ogólnie tempo rozkładu może więc zależeć od udziału organizmów, które same bezpośrednio w procesie tym nie uczestniczą. Podobnie, gdy substrat energetyczny okaże się trudno rozkładalny dla enzymów bakterii i grzybów, tempo rozkładu spada, mimo wystarczającego stężenia pierwiastków odżywczych. W miarę postępowania rozkładu ubywa tych składników, które łatwo mu ulegają (proste skrobia i cukry), a pozostają materiały trwalsze: celuloza, lignina oraz produkty ich częściowego rozkładu, czyli kwasy huminowe. Te czynniki powodują, iż na przykład rozkład materiału złożonego ze słomy i nawozu zwierzęcego może przebiegać szybciej niż rozkład samej słomy lub samego nawozu.

Procesy rozkładu są mniej poznane niż procesy produkcji biomasy. Nadal niezbadany pozostaje los produktów częściowego rozkładu związków organicznych. Na przykład nie wiadomo kiedy i jak dochodzi do zupełnej mineralizacji humusu. Znaczna też część martwej materii organicznej pozostaje nierozłożona. Obfite zasoby torfu czy podwodnych sapropeli przekształcają się w różne postacie węgla brunatnego. Znaczną ich część stanowią związki humusowe, które ulegają przekształceniu w zasoby węgla kamiennego. Niewyjaśnione w pełni jest również pochodzenie ropy naftowej, która jest mieszaniną różnych węglowodorów i innych związków organicznych. Zawiera ona co najmniej kilkaset różnych związków w proporcjach zależnych od odmiany ropy i wieku pokładu. Przypisuje się ropie pochodzenie organiczne lub mineralne. Na tych założeniach opierają się dwie grupy teorii. Pierwsze znajdują więcej zwolenników. Według nich prekursorem ropy naftowej są sapropele, które zostały poddane wysokiej temperaturze i ciśnieniu. Zwolennicy poglądu o organicznym pochodzeniu ropy naftowej wskazują również jeszcze inny mechanizm przemian chemicznych sapropelu, który jest oparty na katalizie na powierzchni minerałów ilastych przebiegającej przy współudziale pierwiastków promieniotwórczych. Zdaniem zwolenników teorii mineralnego pochodzenia ropy naftowej węglowodory powstają natomiast w płaszczu Ziemi i przedostają się konwekcyjnie do litosfery [15].

Skutki zmian ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów

Odpady są konsekwencją istnienia ekosystemów miejsko-przemysłowych, ponieważ są

wytworem działalności przemysłowej, zużycia energii i podwyższonej gęstości zaludnienia. Najogólniej można je podzielić na ścieki i odpady z gospodarstw domowych oraz odpady powstałe w procesach przemysłowych. Ich nadmierne usuwanie do środowiska prowadzi do zmian w ekosystemowych procesach rozkładu materii organicznej i odpadów, zarówno w obszarze miejskim, jak i poza nim. Usuwanie odpadów z obszarów miejskich rozpoczęto w latach czterdziestych XIX w. Wiązało się to często z zanieczyszczeniem zasobów wodnych, powodując epidemie chorób, takich jak tyfus czy cholera. Zjawiska te nadal stwarzają poważne zagrożenia w krajach rozwijających się, ale występują również w krajach rozwiniętych, gdzie gospodarka odpadami jest rozwinięta.

Jednym z najczęstszych skutków usuwania odpadów jest zanieczyszczenie wody słodkiej i przybrzeżnych wód morskich. Ścieki, mimo iż złożone głównie z wody, zawierają azotany i fosforany, z których odzyskuje się mniej niż połowę. Pozostała część trafia do wód drenujących i stanowi główny czynnik sztucznej eutrofizacji mogącej znacznie zmieniać procesy rozkładu w ekosystemach wodnych. Ścieki powodują zanieczyszczenia również przez wspomaganie rozwoju bakterii w wodach przybrzeżnych. Jeśli wpuszcza się je do morza bez wcześniejszego oczyszczenia, mogą zawierać patogeny wielu chorób: Heinego i Medina, dyzenterii, tyfusu brzusznego i cholery, co stwarza zagrożenia dla zdrowia ludzi. Wyrzucanie ścieków z dala od wybrzeża powoduje powstanie pokładów ich resztek. Na przykład na początku lat dziewięćdziesiątych poważne zanieczyszczenie plaż w Sydney skłoniło straż wybrzeża do zainstalowania głęboko w oceanie rurociągu do transportu odpadów [17].

W Wielkiej Brytanii odpady komunalne i przemysłowe wywożone są na około 4000 składowisk odpadów. Lokalną niedogodnością tych obiektów gospodarki odpadami są nieprzyjemne zapachy, szczególnie w okresie czynnego ich wykorzystania. Odpadki siarczanowe i gnijące resztki roślin powodują, iż bakterie redukujące siarczany produkują siarkowodór. Podczas fermentacji gnijącej materii organicznej w warunkach beztlenowych powstaje metan. W Wielkiej Brytanii wysypiska są źródłem 2 Mt metanu rocznie, co stanowi około 46% całkowitej produkcji tego gazu [1]. Na składowiskach wytwarza się również tlenek azotu. Na przykład w Osace w Japonii na czynnych składowiskach emisje tego gazu są około dwukrotnie wyższe niż na zamkniętych [13]. Podobne proporcje dotyczą emisji metanu. Zarówno metan, jak i tlenki azotu, są gazami szklarniowymi.

Wiele negatywnych skutków pojawia się w krajach rozwijających się, w których tylko od 30 do 50% odpadów jest składowanych w sposób zorganizowany. Pozostałe są palone lub składowane na dzikich wysypiskach śmieci, niebezpiecznych dla zdrowia i powodujących znaczne zakłócenia w ekosystemowych procesach rozkładu materii organicznej. Spalanie odpadów ma wiele wad. Wysoka zawartość materiałów organicznych w śmieciach sprawia jednak, że po spaleniu zajmują one tylko 10% wyjściowej objętości, a więc potrzeba znacznie mniej terenu na wysypiskach [5]. Spalanie w spalarniach może być dobrym rozwiązaniem pod względem

przeciwdziałania produkcji gazów szklarniowych [2]. Wśród wad spalania należy wymienić wytwarzanie i depozycje rtęci [7], której głównym źródłem są baterie.

Wszystkie problemy związane z odprowadzaniem odpadów z gospodarstw domowych występują również w przypadku odpadów przemysłowych. Jednak niektóre gałęzie przemysłu produkują bardzo różnorodne i wyjątkowo szkodliwe odpady dla procesów ekosystemowych. Najbardziej narażone są ekosystemy wodne i glebowe, szczególnie z powodu odpadów zawierających znaczne ilości metali ciężkich, mogących negatywnie wpływać na zdrowie człowieka. Na przykład trujące związki metylo-rtęciowe mogą uszkadzać układ nerwowy, w tym aparat słuchowy i wzrokowy, szczególnie u płodów.

Znaczna część odpadów przemysłowych to syntetyczne związki organiczne, które nie ulegają biodegradacji: plastyk, włókna syntetyczne, guma, rozpuszczalniki, pestycydy i farby. Do grupy tej należą polichlorowane bifenyle (PCB). W latach siedemdziesiątych zdarzyły się poważne przypadki zatruć w Japonii i Korei na skutek spożycia oleju ryżowego zanieczyszczonego PCB. Skutkiem były nie tylko dolegliwości skórne, ale także defekty płodów i liczne poronienia. PCB po wejściu w łańcuch pokarmowy może ulec biologicznemu wzmocnieniu.

Wiele problemów wiąże się też ze składowaniem odpadów nuklearnych i radioaktywnym skażeniem. Wśród wad wrodzonych, spowodowanych tymi czynnikami, można wymienić zwiększoną liczbę przypadków zespołów Downa i innych. Zauważano również zmiany genetyczne na przykład u gryzoni, a u dzieci zwiększoną częstość okaleczeń związanych z genetycznymi mutacjami zarodków [4]. Obecnie też głównym problemem jest duża częstość raka tarczycy.

Zakończenie

Przedstawione przykłady jednoznacznie wykazują jak ważne dla zrównoważonego rozwoju cywilizacji jest zachowanie ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów jako usług środowiska. W celu skutecznego i efektywnego ekonomicznie utrzymania jakości tych usług środowiska w niedalekiej przyszłości należy odpowiedzieć na następujące pytania:

- Jak silne są oddziaływania działalności człowieka na ekosystemowe procesy rozkładu materii organicznej i odpadów?
- Jakie są relacje między stanem różnorodności biologicznej, a jakością ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów?
- W jakim stopniu zostały osłabione ekosystemowe procesy rozkładu materii organicznej i odpadów na poziomie globalnym, regionalnym i lokalnym?
- Jakie są zależności między ekosystemowymi procesami rozkładu materii organicznej i odpadów a innymi usługami środowiska?
- Czy i w jakiej skali czasowej jest możliwe przywrócenie odpowiedniej jakości ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów?
- Czy i w jakim stopniu możliwe jest zastąpienie ekosystemowych procesów rozkładu materii

organicznej i odpadów przez technologię oraz jakie mogą być efekty uboczne takiej substytucji?

- Jak należy zarządzać procesami gospodarowania środowiskiem, aby podtrzymać dostawę usług środowiska w postaci ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów na poziomie globalnym, regionalnym i lokalnym?

Zmiany ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów wpływają na system środowiska przyrodniczego, więc i na systemy społeczne i gospodarcze. Należy stwierdzić, że problematyka zachowania ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów niesie dla teorii i praktyki zarządzania środowiskiem wiele konsekwencji. Szczególnie ważna jest wycena usług środowiska w postaci ekosystemowych procesów rozkładu materii organicznej i odpadów, zarówno po stronie nakładów, jak i efektów widzianych przez pryzmat eksploatacji i degradacji biosfery.

Dr Artur Michałowski,
Wyższa Szkoła Administracji Publicznej w Białymstoku

Literatura

1. Aitchison E., 1996, *Methane generation from UK landfall sites and its use as an energy source*, „Energy Conversion and Management" nr 37, s. 1111-1116.
2. Aumonier S., 1996, *The greenhause gas consequences of waste management - identifying preferred options*, „Energy Conversion and Management" nr 37, s. 1117-1122.
3. Daszkowska M., 1998, *Usługi, rynek, marketing*, PWN, Warszawa.
4. Dubrova Y. E., Nesterov V. N., Krouchinsky N. G., Ostapenko V. A., Neumann R., Neil D. L., Jeffreys A. J., 1996, *Human minisatellite mutation rate after The Chernobyl accident*, „Nature" nr 380, s. 683-686.
5. Hjelmar O., 1996, *Disposal strategies for municipal solid waste incineration residues*, „Journal of Hazardous Materials" nr 47, s. 345-368.
6. Kośmicki E., 2005, *Zrównoważony rozwój w warunkach globalnych zagrożeń i integracji europejskiej*, w: *Zrównoważony rozwój - doświadczenia polskie i europejskie*, red. S. Czaja, Wyd. I-BIS, Wrocław, s. 236.
7. Lindquist O., 1995, *Environmental impact of mercury and other heavy metals*, „Journal of Power Sources" nr 57, s. 3-7.
8. Michałowski A., 2005, *Sterowanie usługami środowiska*, „Ekonomia i Środowisko" nr 2 (28).
9. Michałowski A., 2006, *Usługi środowiska w teorii ekonomii*, „Ekonomia i Środowisko" nr 2

(30).
10. Michałowski A., 2008, *Ekosystemowe procesy regulacji atmosfery i klimatu jako usługi środowiska*, „Ekonomia i Środowisko" nr 2 (33).
11. *Nature's Services*, 1997, red. G. D. Daily, Island Press, Washington, D.C.
12. Taylor E., 1947, *Wstęp do ekonomiki*, Spółdzielnia Wydawnicza „Żeglarz", Gdynia.
13. Tsujmoto Y., Masuda J., Fukuyama J., Ito H., 1994, *N_20 emissions at solid waste disposal sites in Osaka City*, „Journal of the Air Waste Management Association" nr 44, s. 1313-1314.
14. Waleńczak Z., 1987, *Geochemia organiczna*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
15. Weiner J., 2005, *Życie i ewolucja biosfery*, PWN, Warszawa.
16. Wilson E. O., 2003, *Przyszłość życia*, Wyd. Zysk i S-ka, Poznań.
17. Young A. R. M., 1996, *Environmental Change in Australian Since 1788*, Oxford University Press, Melbourne.