

Zastosowanie modelowania matematycznego w analizie wpływu osadów dennych na jakość wód rzecznych

Sebastian R. BIELAK



Biebrzańskie mokradła w granicach Basenu Dolnego Biebrzy

Osady dennie – jako miejsce bytowania wielu gatunków roślin i zwierząt – są istotnym ogniwem w krążeniu pierwiastków w środowisku wodnym. Między tonią wodną a znajdującymi się pod nią osadami zachodzi ciągła wymiana materii – różne substancje przechodzą z jednego ośrodka do drugiego zmieniając przy tym swoją formę. Osady dennie powstają w wyniku sedimentacji na dnie cieków wodnych rozdrobnionego materiału skalnego (żwir, piasek), obumarłych roślin i zwierząt, cząstek gleb wypłukanych z wyżej położonych terenów, niesionych z nurtem rzeki substancji słabo rozpuszczalnych w wodzie (zawiesin) oraz na skutek wytrącania się z wody organicznych lub nieorganicznych związków chemicznych, takich jak np. kalcyt (CaCO_3), wodorotlenek żelaza ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), wodorotlenek manganu ($\text{Mn}(\text{OH})_2$) czy związki fosforu, np. CaHPO_4 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

Skład geochemiczny osadów dennych jest uzależniony od czynników naturalnych, np. budowy geologicznej zlewni, oraz antropogenicznych (głównie punktowych i obszarowych źródeł zanieczyszczeń), przy czym jest on zmienny i w pewnym zakresie zależy również od miąższości samych osadów. W wyniku samooczyszczania się wód płynących znaczna część zanieczyszczeń trafiających do rzek i potoków z czasem przechodzi do osadów dennych, dlatego też skład chemiczny osadów oraz wód powierzchniowych są od siebie zależne. Zjawisko to jest najbardziej widoczne w przypadku zanieczyszczeń charakteryzujących się małą

rozpuszczalnością oraz trudno ulegających biodegradacji, takich jak np. sole metali ciężkich lub trwałe związki organiczne. Uważa się, że skład geochemiczny osadów dennych jest bardzo dobrym wskaźnikiem stanu czystości wód powierzchniowych.

Osady dennie odgrywają szczególną rolę w krążeniu w środowisku wodnym dwóch najważniejszych biogenów: azotu i fosforu. Detrytus, głównie w postaci obumarłych makrofytów oraz fitoplanktonu, po opadnięciu na dno cieku ulega rozkładowi. W warunkach aerobowych zawarty w nim azot organiczny ulega przekształceniu w azot amonowy, ten z kolei pod wpływem bakterii ulega przeobrażeniu w azot azotanowy(III), a następnie azot azotanowy(V). Związki te albo zasilają tón wodną albo też, pozostając w głębszych partiach osadów (gdzie zazwyczaj panują warunki beztlenowe), podlegają denitryfikacji z udziałem innych bakterii. Azotany obecne w osadach dennych mogą również ulegać redukcji, w wyniku której przez wodę znajdującą się ponad nimi unosi się do atmosfery wolny azot.

Fosfor gromadzi się na dnie cieków i zbiorników wodnych w postaci obumarłej materii organicznej, zawiesin mineralnych, jak również w wyniku wytrącania się z wody trudno rozpuszczalnych soli, np. $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, FePO_4 lub AlPO_4 . Im wyższa jest w wodzie zawartość wapnia, żelaza i glinu, tym szybciej fosfor przechodzi z toni wodnej do osadów dennych. Zgromadzony na dnie fosfor organiczny ulega rozkładowi, a następnie znaczna jego część, głównie w postaci fosforanów(V), wraca do toni wodnej.

Modelowanie w Dolinie Biebrzy

Jako przykład wykorzystania modelowania matematycznego w ocenie wpływu osadów dennych na jakość fizyczno-chemiczną wód rzecznych może posłużyć model nizinnej rzeki Biebrzy. Model ten został skonstruowany na bazie programu Qual2k (opracowanego przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska, US EPA) i obejmował 50-kilometrowy odcinek Biebrzy Dolnej, rozciągający się od miejscowości Osowiec aż po ujście do Narwi. Bazę modelu osadów dennych stanowił hydrauliczny model przepływu wody w korycie rzecznej w stanie ustalonym oraz model wymiany ciepła między rzeką a jej otoczeniem. Zastosowanie modelowania wpływu osadów dennych zostało ograniczone do symulacji krótkich, kilkugodzinnych przedziałów czasowych, w których założono, że zarówno przepływ wody w korycie, jak również warunki meteorologiczne wpływające na wymianę ciepła, były stałe.

Dane niezbędne do skonstruowania i skalibrowania modelu zostały zgromadzone 29 lipca i 25 września 2007 r. oraz 23 lipca 2008 r., w trakcie prac terenowych prowadzonych na obszarze Basenu Dolnego Biebrzańskiego Parku Narodowego. Badania obejmowały:

- pobór próbek wody z pomiarem temperatury warstwy powierzchniowej Biebrzy (10 punktów kontrolnych, głębokość poboru 0,5 m) oraz z ujściowych odcinków jej dopływów punktowych, tj. Kanału Rudzkiego, Klimaszewnicy, Wissy i Kosódki (po jednym p. kontrolnym),



Biebrza w okolicach wsi Dolistowo

- pobór próbek wody wraz z pomiarem temperatury warstwy dennej koryta Biebrzy (6 punktów kontrolnych, głębokość poboru 1,8-4,3 m),
- określenie współrzędnych geograficznych punktów pomiarowych,
- oznaczenia w próbkach następujących parametrów: odczyn, zasadowość ogólna, tlen rozpuszczony, azot amonowy, amoniak, azot azotanowy(III), azot azotanowy(V), azot organiczny, azot Kjeldahla, azot ogólny, fosfor mineralny, fosforany(V), fosfor organiczny, fosfor ogólny, chlorofil „a”. Analizy chemiczne wykonano w dniu poboru próbek, w akredytowanym laboratorium Inspekcji Ochrony Środowiska w Białymstoku.

Program Qual2k został użyty do stworzenia serii trzech symulacji stanu ustalonego (po jednej na każdy dzień pomiarów terenowych), które razem stanowiły substytut modelu dynamicznego, opisującego wymianę masy między osadami dennymi i tonią wodną w dłuższym horyzoncie czasowym.

Konstrukcja modelu

Dwukierunkowa wymiana masy między osadami dennymi Biebrzy, a znajdującą się nad nimi tonią wodną została zbilansowana w oparciu o następujące procesy: 1) Zasilanie osadów dennych materią oraz związkami chemicznymi pochodzącymi z toni wodnej, w tym:

- drobną materią organiczną, tzw. detrytusem opadającym na dno ciek, zawierającym w swojej strukturze węgiel organiczny, azot organiczny oraz fosfor organiczny;
- związkami organicznymi oraz biogenami (głównie azotem i fosforem) rozpuszczonymi w wodzie penetrującej osady denne,

2) Pobór tlenu z toni wodnej do osadów dennych na potrzeby reakcji biochemicznych (utleniających) zachodzących w osadach,

3) Zasilanie toni wodnej substancjami pochodzącymi z osadów dennych, w tym: azotem amonowym, fosforanami(V), azotanami(V) oraz metanem.

W modelu przyjęto, iż osady denne zbudowane są z dwóch warstw:

- aerobowej – o grubości 1 mm, tworzącej powierzchniową warstwę osadów, w której panują warunki tlenowe,
- anaerobowej – o grubości 10 cm, zalegającej poniżej warstwy aerobowej, w której panują warunki beztlenowe oraz dochodzi do kumulacji materii organicznej pochodzącej z toni wodnej.

Założono, że większość osiadłej na dnie materii organicznej ulegała w warunkach beztlenowych mineralizacji (rozkładowi), w efekcie czego powstawały rozpuszczone w wodzie fosforany mineralne, azot amonowy oraz metan. Pozostała część materii organicznej gromadziła się w warstwie aerobowej, gdzie uczestniczyła w reakcjach utleniających (takich jak np. nityfikacja azotu amonowego) lub też reagowała z substancjami pochodzącymi z warstwy anaerobowej, zgodnie z definicją diagenety. Diageneza to przemiany fizyczno-chemiczne osadów dennych rozpoczynające się w momencie

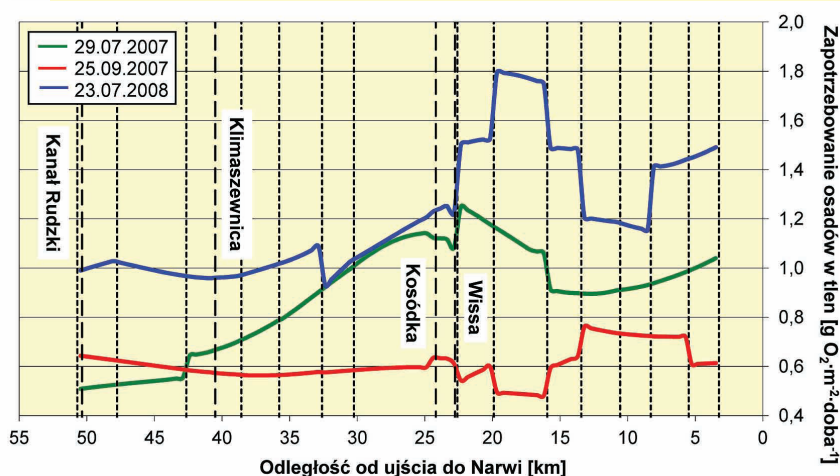
ich depozycji na dnie ciek i polegające na zmianie składu mineralnego, struktury oraz składu chemicznego, przy czym zjawisko to zachodzi i na powierzchni osadów, jak i w całej ich objętości.

Znając całkowitą masę detrytusu opadającego na dno ciek oraz wartości odpowiednich współczynników stechiometrycznych, możliwe było rozdzielanie strumienia masy detrytusu na trzy pomniejsze „strugi”, z których każda definiowała masę innego biogenu zasilającego osady denne, tj. węgla organicznego, azotu organicznego oraz fosforu organicznego. W każdej z wymienionych „strug” wyodrębniono trzy frakcje, co pozwoliło na zbilansowanie procesu wymiany masy dla poszczególnych warstw osadów dennych:

- frakcja nietrwała (labilna), tj. szybko ulegająca reakcjom biochemicznym,
- frakcja wolno ulegająca reakcjom biochemicznym,
- frakcja trwała, tj. nie podlegająca żadnym reakcjom biochemicznym.

Dzięki temu możliwe było wyliczenie strumienia masy węgla organicznego wolno ulegającego przemianom biochemicznym, który w postaci rozpuszczonej w wodzie zasiliał warstwę anaerobową osadów. Po

Rozkład wartości zapotrzebowania osadów dennych w tlen w poszczególnych symulacjach modelu Biebrzy Dolnej



dobudowaniu otrzymanej wartości do wcześniejszych obliczeń uzyskano całkowitą masę rozpuszczonego w wodzie węgla organicznego, który zasilał warstwę anaerobową osadów. Rozpuszczony w wodzie węgiel organiczny, który po opadnięciu detrytus na dno ciek jest skumulowany w warstwie anaerobowej osadów dennych, ulegał – na skutek przemian biochemicznych – przekształceniu w metan.

Ponieważ CH_4 jest stosunkowo słabo rozpuszczalny w wodzie, nawet nieduże jego stężenie w osadach powoduje 100% nasycenie w roztworze wodnym, po czym nadmiar gazu ulatnia się z osadów do toni wodnej. W modelu przyjęto, że w trakcie ulatniania się z osadów dennych metan podlega różnym reakcjom biochemicznym – w warstwie anaerobowej zostaje częściowo zużyty w trakcie denitryfikacji, natomiast w warstwie aerobowej ulega częściowemu utlenieniu. Ostatnim, bardzo ważnym składnikiem modelu było tzw. zapotrzebowanie osadów dennych w tlen (z ang. *Sediment Oxygen Demand*), czyli suma tlenu skonsumowanego w procesach utleniania metanu oraz nitrifikacji azotu amonowego, zachodzących w warstwie aerobowej osadów dennych.

Kalibracja i weryfikacja modelu

Kalibracja modelu interakcji osadów dennych z wodą polegała na dostosowaniu parametrów obliczeniowych definiujących procesy fizyczne i biochemiczne w rzece – takie jak np. tempo opadania na dno cząstek materii organicznej, tempo hydrolizy organicznych form azotu i fosforu, tempo nitrifikacji azotu amonowego, wielkość emisji z osadów dennych mineralnych form azotu i fosforu, procent powierzchni dna generującego ubytki tlenu w wodzie itp. – do wartości parametrów jakościowych (NH_4 , NO_3 , PO_4 , odczyn i in.), uzyskanych na podstawie analiz chemicznych próbek wody pobranych z Biebrzy Dolnej w punktach kontrolnych. W praktyce polegało to na wielokrotnym sprawdzaniu wyników obliczeń numerycznych, a następnie poddawaniu nieznacznym korektom wartości parametrów obliczeniowych.

Dla każdego odcinka Biebrzy kalibracja odbywała się metodą kolejnych przybliżeń, w których wartość parametrów obliczeniowych była szacowana w sposób pośredni w oparciu o procedurę numerycznego przybliżania wyników symulacji. Do kalibracji modelu wykorzystano dane pochodzące z poborów próbek przeprowadzonych w lipcu oraz wrześniu 2007 r., natomiast dane z lipca 2008 r. zostały wykorzystane do weryfikacji wygenerowa-



Podmokły ols na bagnie Ławki

nych symulacji. Obliczenia numeryczne wykonywane były za pomocą metody łamanej Eulera, umożliwiającej przybliżone całkowanie równań różniczkowych zwyczajnych.

Podsumowanie efektów symulacji

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły dużą przydatność programu Qual2k do symulacji wpływu osadów dennych na jakość fizyczno-chemiczną wody w korycie rzecznym, który w przypadku Biebrzy okazał się znaczący. Uzyskane efekty symulacji komputerowych można podsumować w następujący sposób:

1) Obok biochemicznych procesów utleniających, które zachodziły bezpośrednio w toni wodnej, drugim najpoważniejszym źródłem ubytków tlenu w Biebrzy było znaczne zapotrzebowanie osadów dennych na ten pierwiastek (rys.). Wynikało ono z biologicznego rozkładu nagroma-

dzzonej na dnie materii organicznej, pochodzącej głównie z okolicznych torfowisk, oraz utleniania produktów tego rozkładu, tj. metanu i mineralnych form azotu (azot azotanowy(III), azot azotanowy(V), azot amonowy).

2) Największy pobór tlenu przez osady denne miał miejsce w lecie. Okazało się, że w przypadku wysokich stanów wody w rzece oraz temperatury wody przekraczającej 20°C intensywność procesów biochemicznych konsumujących tlen w osadach dennych i toni wodnej była na tyle duża, że powodowała spadek stężenia tego pierwiastka w wodzie poniżej $5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$, w tym lokalnie nawet do $2\text{--}3 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$, co jest wartością letalną dla wielu gatunków ryb. Takie zjawisko jest wysoce niekorzystne, a nawet niebezpieczne dla ichtiofauny występującej w Biebrzy, w szczególności dla ryb karpiowatych, żerujących w strefie dennej koryta.

Rozlewiska Biebrzy Dolnej w pobliżu wsi Osowiec





Podmokłe łąki i rozlewiska – częsty widok w Dolinie Biebrzy w trakcie wiosennych wzebrań

3) Porównanie jakości fizyczno-chemicznej wody w warstwie powierzchniowej oraz dennej Biebrzy wykazało, że średnie stężenia analizowanych parametrów były wyższe w pobliżu dna, w tym: fosforu organicznego o 39%, amoniaku o 20%, azotanów(V) o 7%, odczynu o 0,2 oraz temperatury wody o 0,2-0,5°C. Taki wynik wyraźnie wskazuje, że osady dennie zasilają toń wodną strumieniem masy składającym się w głównej mierze z nieorganicznych form azotu, węgla i fosforu.

4) Osady dennie Biebrzy okazały się istotnym, tzw. wtórnym, źródłem zasilania rzeki w mineralne formy fosforu. Zjawisko intensywnego przechodzenia fosforu – w postaci fosforanów(V) – z osadów dennych do toni wodnej było szczególnie widoczne w sezonie wegetacyjnym roślin i spowodowane było co najmniej dwoma czynnikami:

- dążeniem układu woda – osady dennie do wyrównania wewnątrz rzeki stężeń mineralnych form fosforu, które są przyswajalne dla roślin wodnych,
- niskim stężeniem tlenu w warstwie dennej, które przyspieszało cały proces.

Największy wpływ osadów dennych na wzbogacanie rzeki w fosfor zaznaczył się w przypadku niskich stanów wody w korycie.

5) Najwyższą wartość emisji fosforanów(V) z osadów dennych do toni wodnej zanotowano w górnym odcinku Biebrzy Dolnej, w pobliżu ujścia Kanału Rudzkiego. Może to oznaczać, że ciek ten jest odpowiedzialny nie tylko za wzrost stężeń fosforu mineralnego i ogólnego w Biebrzy (co wykazała analiza wyników monitoringu jakości wody), ale również za odkładanie znacznych ilości tego pierwiastka w jej osadach dennych.

6) Porównanie dobowych ładunków azotu amonowego, jakie przedostawały się do Biebrzy z mokradeł (źródło obszarowe), dopływów (źródła punktowe) oraz osadów dennych (źródło liniowe) wykazało, że to właśnie osady dennie są najpoważniejszym źródłem zasilania rzeki w azot amonowy, zarówno w postaci niezdysocjowanego amoniaku NH_3 , jak również jonu NH_4^+ . Przyczyną obecności w osadach dennych znacznych ilości azotu amonowego jest

zapewne proces amonifikacji, w którym – w wyniku rozkładu przez drobnoustroje nagromadzonych związków organicznych – powstaje amoniak.

7) Osady dennie okazały się również istotnym źródłem zasilania rzeki w azotany(V). Ich emisja, podobnie jak miało to miejsce w przypadku fosforanów(V), była najwyższa w sezonie wegetacyjnym i wynikała z wyrównywania się stężeń w pionowym profilu rzeki, tj. w przestrzeni między zwierciadłem wody a dnem, na skutek poboru azotanów(V) przez roślinność wodną. Największy wpływ osadów dennych na wzbogacanie rzeki w tę formę azotu zaznaczył się w przypadku niskich stanów wody w korycie. ♦

Literatura

- S. R. Bielak. 2005. *Eutrofizacja wód powierzchniowych Biebrzańskiego Parku Narodowego*. „Ekoprofit” nr 1, Katowice.
- S. R. Bielak. 2006. *Zanieczyszczenia antropogeniczne w osadach dennych rzek Biebrzańskiego Parku Narodowego*. „Ekoprofit” nr 1, Katowice.
- I. Bojakowska. 2001. *Kryteria oceny zanieczyszczeń osadów wodnych*. Przegląd Geologiczny. Vol. 49, nr 3. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- S. C. Chapra. 1997. *Surface Water – Quality Modeling*. Wydawnictwo McGraw-Hill Companies Inc., New York-Toronto.
- S. C. Chapra, G. J. Pelletier, H. Tao. 2008. *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual*. Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University, Medford.
- J. Dojlido. 1995. *Chemia wód powierzchniowych*. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok.
- A. Giziński, E. Falkowska. 2003. *Hydrobiologia stosowana: ochrona wód powierzchniowych*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Humanistyczno-Ekonomicznej we Włocławku, Włocławek.
- Z. Kajak. 1994. *Hydrobiologia. Ekosystemy wód śródlądowych*. Wydawnictwo filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku, Białystok.

Kępy turzyc (*Carex sp.*) sterzających ponad wodę to częsty widok na biebrzańskich mokradłach

