

Zastosowanie modelowania matematycznego w analizie zmian stężeń tlenu oraz zakwaszenia wód rzecznych

Sebastian R. BIELAK

Biebrza w okolicach Goniądza

Wody powierzchniowe są uważane za jeden z najbardziej zanieczyszczonych elementów środowiska naturalnego w Polsce, przy czym jako zanieczyszczenia rozumie się najczęściej czynniki fizyczno-chemiczne lub biologiczne, obniżające walory jakościowe i użytkowe wody. Taki stan rzeczy miało poprawić skuteczne wdrożenie zapisów Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW), ale skończyło się na postawieniu naszego kraju przed Trybunałem Sprawiedliwości Unii Europejskiej za poważne opóźnienia w osiągnięciu celów środowiskowych określonych w RDW. Zarzuty wydają się uzasadnione, ponieważ opublikowane w 2011 r. wyniki monitoringu diagnostycznego cieków Polski – prowadzonego przez Inspekcję Ochrony Środowiska w latach 2007-2009 – wykazały, że tylko 15,6% naturalnych jednolitych części wód powierzchniowych (JCWP) oraz 19,6% sztucznych lub silnie zmienionych JCWP spełnia podstawowy cel środowiskowy RDW, jakim jest osiągnięcie co najmniej dobrego stanu ekologicznego do 2015 r.

Jednym ze składników oceny stanu ekologicznego wód płynących jest klasyfikacja ich stanu fizyczno-chemicznego, którą przeprowadza się na podstawie wyników monitoringu. Monitoring jakości rzek i potoków może być wsparty różnymi narzędziami analitycznymi, takimi jak np. modele jakościowe, których podstawową zaletą jest zwiększenie zakresu interpretacji uzyskanych wyników pomiarów. Modelowanie jakości wód płynących polega na

skonstruowaniu, a następnie skalibrowaniu matematycznego odwzorowania rzeki lub potoku w taki sposób, aby możliwe było śledzenie zmian jakości wody uzależnionych od zadanych warunków początkowych oraz brzegowych symulacji. Model jakości wód płynących jest matematycznym odpowiednikiem procesów fizyczno-chemicznych oraz biologicznych, wpływających na stężenia związków chemicznych transportowanych w danym cieku.

Do skonstruowania modelu niezbędne jest przeprowadzenie kompleksowej analizy zagadnień związanych z jakością środowiska wodnego badanego obszaru, przy czym wymagane jest podejście interdyscyplinarne, w którym równocześnie z podstawowymi technikami z dziedziny inżynierii środowiska stosuje się metody matematyczne oraz nowoczesne techniki komputerowe. Jednowymiarowa analiza zmian jakości wody w rzece jest znacznym uproszczeniem trójwymiarowej rzeczywistości, niemniej jednak wyniki dotychczasowych badań na świecie wskazują, że takie podejście jest jak najbardziej uzasadnione, zarówno z merytorycznego, jak również z ekonomicznego punktu widzenia.

Program Qual2k i Dolina Biebrzy

Jako przykład jednowymiarowego modelowania jakości fizyczno-chemicznej wód rzecznych może posłużyć model nizinnej rzeki Biebrzy, który został skonstruowany na bazie amerykańskiego programu Qual2k – opracowanego przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska U. S.

EPA. Model obejmował 50-kilometrowy odcinek Biebrzy Dolnej, rozciągający się od miejscowości Osowiec aż po ujście do Narwi. Bazę modelu jakości wód stanowiły trzy inne modele: hydrauliczny model przepływu wody w korycie rzeczonym w stanie ustalonym, model wymiany ciepła między rzeką i jej otoczeniem oraz model oddziaływania osadów dennych na jakość wody w rzece. Zastosowanie modelu jakości fizyczno-chemicznej Biebrzy zostało ograniczone do symulacji krótkich, kilkugodzinnych przedziałów czasowych, w których założono, że przepływ wody w korycie i warunki meteorologiczne, wpływające na procesy wymiany 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 punkcie kontrolnym),
- określenie współrzędnych geograficznych punktów pomiarowych,
- oznaczenia w próbkach kilkunastu parametrów jakościowych, w tym m.in. odczynu, zasadowości ogólnej oraz tlenu rozpuszczonego w wodzie.



Panorama Doliny Biebrzy

Analizy chemiczne wykonano w dniu poboru próbek, w akredytowanym laboratorium Inspekcji Ochrony Środowiska w Białymstoku.

W niniejszym artykule omówiono wyniki symulacji stężeń tlenu oraz parametrów charakteryzujących zakwaszenie wód (odczyn, zasadowość ogólna), natomiast w kolejnej publikacji zostaną zaprezentowane wyniki badań dotyczące biogenów, tj. azotu i fosforu.

Konstrukcja, kalibracja i weryfikacja modelu

Konstrukcja modelu Biebrzy Dolnej polegała na matematycznym odwzorowaniu różnego rodzaju procesów fizycznych, chemicznych oraz biologicznych, które zachodziły bezpośrednio w korycie rzecznej lub w jego najbliższym otoczeniu i przez to wpływały na jakość fizyczno-chemiczną wód powierzchniowych. W modelu uwzględniono m.in.:

- wpływ temperatury wody na przebieg wszystkich reakcji biochemicznych zeroowego oraz pierwszego rzędu,

- zasadowość ogólną wód, której wartość była uzależniona od przebiegu wielu procesów. Niektóre z nich, jak np. hydroliza fosforu organicznego oraz nityfikacja, powodowały spadek zasadowości, natomiast inne procesy (denityfikacja, hydroliza azotu organicznego lub oddychanie fitoplanktonu) wręcz przeciwnie. Część procesów, np. fotosynteza fitoplanktonu, pobór biogenów i wydalenie produktów metabolizmu przez glony bentosowe, wywoływał spadek lub wzrost wartości zasadowości w zależności od substratów biorących udział w reakcjach biochemicznych;

- odczyn wód – wyznaczony w oparciu o układ równań równowagi reakcji, obejmujących tzw. układ węglanowy w wodzie, w którym stałe równowagi kwasowości zostały skorygowane w zależności od temperatury wody;

- tlen rozpuszczony w wodzie – w przypadku tego pierwiastka założono, że jego stężenie w wodzie rośnie z przebiegiem fotosyntezy fitoplanktonu oraz glonów bentosowych, a także na skutek napowietrzania wynikającego z ruchu wody,

natomiast maleje w wyniku przebiegu nityfikacji, oddychania fitoplanktonu i glonów bentosowych oraz utleniania związków organicznych;

- nasycenie wody rozpuszczonym w niej tlenkiem węgla(IV).

Kalibracja matematycznego modelu jakości fizyczno-chemicznej wód Biebrzy Dolnej polegała na dostosowaniu wielu parametrów obliczeniowych do rozkładu – wzdłuż biegu rzeki – stężeń parametrów jakościowych (tlen rozpuszczony w wodzie, zasadowość ogólna, odczyn), uzyskanych w punktach kontrolnych na podstawie analiz chemicznych pobranych próbek wody. Do grupy parametrów obliczeniowych w modelu należały:

- parametry hydrauliczne koryta rzecznej, wpływające na natlenienie wód przez ich mieszanie się;

- parametry definiujące zjawiska meteorologiczne oraz procesy termodynamiczne, które wpływały bezpośrednio na rozkład temperatury wody w rzece, a pośrednio na tempo rozpuszczania się tlenu w wodzie;

- parametry definiujące procesy fizyczne i biochemiczne zachodzące na granicy woda – osady dennie, np. zapotrzebowanie osadów w tlen;

- współczynniki charakteryzujące przebieg reakcji biochemicznych w wodzie, np. stężenie tlenku węgla(IV) w atmosferze, stała połowicznego nasycenia węglem nieorganicznym w komórkach fitoplanktonu, ekstynkcyjność promieniowania słonecznego i in.;

- parametry fizyczno-chemiczne wód powierzchniowych i płytkich wód gruntowych, które obszarowo dopływały do koryta rzecznej z torfowisk (mokradeł), terenów użytkowanych rolniczo (podmokłych łąk) lub terenów pokrytych wiejską zabudową rozproszoną.

Dla każdego odcinka Biebrzy kalibracja odbywała się metodą kolejnych przybliżeń, w których wartość parametrów obliczeniowych była szacowana

Kanał Rudzki powyżej ujścia do Biebrzy



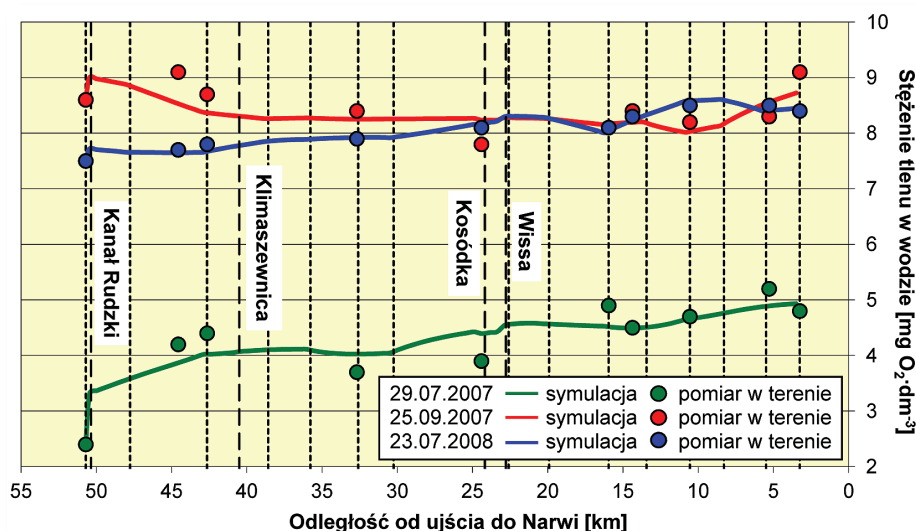
w sposób pośredni w oparciu o procedurę numerycznego przybliżania wyników symulacji. W praktyce polegało to na wielokrotnym sprawdzaniu wyników obliczeń numerycznych, a następnie poddawaniu korektom wartości parametrów obliczeniowych. Do kalibracji modelu wykorzystano dane pochodzące z poborów próbek przeprowadzonych w lipcu oraz wrześniu 2007 r., natomiast dane z lipca 2008 r. zostały wykorzystane do weryfikacji wygenerowanych symulacji. Wartości współczynników charakteryzujących przebieg reakcji biochemicznych w wodzie zostały wstępnie oszacowane na podstawie dostępnej literatury fachowej, a następnie poddane kalibracji. Obliczenia numeryczne wykonywane były za pomocą metody łamanej Eulera, umożliwiającej przybliżone całkowanie równań różniczkowych zwyczajnych.

badania naukowe dotyczące stanu czystości Biebrzy i jej dopływów.

Podsumowanie efektów symulacji

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły dużą przydatność programu Qual2k do symulacji zmian wartości parametrów fizyczno-chemicznych wody w korycie rzecznym oraz identyfikacji czynników odpowiedzialnych za spadek jakości Biebrzy Dolnej poniżej wymaganych standardów. Uzyskane efekty symulacji komputerowych można podsumować w następujący sposób:

Najpoważniejszym problemem ekologicznym występującym w Biebrzy okazały się występujące okresowo niskie stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie oraz wynikające z tego poważne deficyty tlenu sięgające ponad 70%. Stężenia tlenu rzędu 2-5 mg O₂·dm⁻³ występowały latem



Rozkład stężeń tlenu rozpuszczonego w wodzie w poszczególnych symulacjach modelu Biebrzy Dolnej

W modelu zmian jakości fizyczno-chemicznej wód Biebrzy zrezygnowano z symulacji stężeń parametru BZT₅, który charakteryzuje obecność w wodzie łatwo rozkładalnych związków organicznych pochodzących głównie ze ścieków bytowych. Analiza wyników monitoringu jakości wód powierzchniowych Basenu Dolnego, prowadzonego przez Inspekcję Ochrony Środowiska, wykazała, że począwszy od 1999 r. stężenia BZT₅ w Biebrzy Dolnej mieściły się w granicach I klasy czystości, a więc nie wpływały w sposób istotny na stan fizyczno-chemiczny rzeki. Istotnymi problemami okazały się wysokie stężenia związków azotu oraz bardzo wysokie stężenia ChZT, które wskazywały na obecność w rzece dużych ilości trudno rozkładalnych związków organicznych. Potwierdziły to również inne, niezależne

przy wysokich stanach wód oraz silnym nasłonecznieniu, plasując wody Biebrzy zdecydowanie poniżej II klasy czystości (rysunek).

Niskie stężenia tlenu w wodzie są wysoce niekorzystne, a nawet niebezpieczne dla ichtiofauny występującej w Biebrzy, w szczególności dla ryb karpiowatych żerujących w strefie dennej koryta. Efektem złych warunków tlenowych są tzw. przyduchy, czyli występujące lokalnie masowe śnięcia ryb, które sporadycznie obserwowano w Biebrzy.

Spośród wielu czynników wpływających na deficyt tlenu w Biebrzy największą rolę odgrywały dwie grupy procesów:

- wysokie zapotrzebowanie osadów dennych w tlen, które wynikało z biologicznego rozkładu dużych ilości materii organicznej (pochodzącej głównie z torfowisk)



Potok Klimaszewnica w pobliżu wsi o tej samej nazwie

zgromadzonej na dnie rzeki oraz utleniania produktów tego rozkładu, tj. metanu i mineralnych form azotu, które następnie zasilały toń wodną;

- przebieg w toni wodnej nitryfikacji, w wyniku której azot amonowy ulegał

Rozlewiska w pobliżu Twierdzy Osowiec





Na przełomie kwietnia i maja knieć błotna (*Caltha palustris*), czyli popularny kaczaniec, masowo kwitnie na rozlewiskach Biebrzy

utlenieniu do azotu azotanowego(III), a następnie do azotu azotanowego(V). Ze względu na zasilanie Biebrzy dużą ilością różnych form azotu z dwóch źródeł, tj. z odwadnianych torfowisk oraz osadów dennych, nityfikacja powodowała znaczne zużycie zasobów tlenu rozpuszczonego w wodzie.

We wszystkich symulacjach okazało się, że sumaryczny ładunek tlenu, jakim Biebrza zasilala obszarowo mokradła, był zawsze większy od ładunku tego pierwiastka otrzymywanego z powrotem z torfowisk. Oznacza to, że w sezonie wegetacyjnym, bez względu na warunki hydrologiczne, Biebrza natlenia rozlewiska Basenu Dolnego, proporcjonalnie do wielkości przepływu w rzece.

Kanał Rudzki okazał się jedynym dopływem punktowym Biebrzy, który w każ-

dych warunkach hydrologicznych znacznie poprawiał natlenienie jej wód. Dopływem o najgorszych parametrach tlenowych była Kosówka, jednak ze względu na niewielkie wartości przepływu w ujściowym odcinku tego ciek jego siła oddziaływania na jakość fizyczno-chemiczną Biebrzy była pomijalna, a wpływ tylko lokalny – podobnie jak w przypadku Klimaszewnicy.

Odczyn wód powierzchniowych Basenu Dolnego Biebrzy mieścił się w zakresie charakterystycznym dla wód naturalnych będących pod wpływem obszarów torfowiskowych, tzn. pH Biebrzy i jej dopływów punktowych wahał się w granicach od 7,4 do 8,0, natomiast pH dopływów obszarowych od 6,3 do 8,0. Jakkolwiek średnia wartość odczynu dopływów obszarowych była nieco niższa niż w przypadku wód Biebrzy, parametr ten klasyfikował jakość fizyczno-chemiczną wszystkich analizowanych wód powierzchniowych do I klasy.

Ostatni z analizowanych parametrów, tj. zasadowość ogólna, klasyfikował wody Biebrzy Dolnej do II klasy jakości (211-245 mg $\text{CaCO}_3 \cdot \text{dm}^{-3}$), natomiast dopływy punktowe i obszarowe Biebrzy znalazły się na pograniczu II klasy lub poniżej II klasy jakości (160-348 mg $\text{CaCO}_3 \cdot \text{dm}^{-3}$). Spośród czterech najważniejszych dopływów punktowych Biebrzy Dolnej tylko Kanał Rudzki i Wissa wyraźnie wpływały na zasadowość jej wód – Kanał Rudzki ją obniżał, natomiast Wissa podnosiła. Z kolei duża rozpiętość między minimalnymi i maksymalnymi wartościami zasadowości dopływów obszarowych Biebrzy potwierdziła wcześniejsze spostrzeżenia, że na niektórych odcinkach rzeka ta jest zasi-

lana wodami mieszanymi, tj. powierzchniowo-podziemnymi, o różnym składzie chemicznym. ◆

Literatura

- W. Bleuten et al. 2002. *Characteristics of the Lower Biebrza Basin*. [W:] *Hydrological system analysis in the valley of Biebrza River*. W. Mioduszewski, E. P. Querner (red.). Wydawnictwo Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, Falenty, s. 9-38.
- S. C. Chapra 1997. *Surface Water – Quality Modeling*. Wydawnictwo McGraw-Hill Companies Inc., New York-Toronto.
- A. Giziński, E. Falkowska 2003. *Hydrobiologia stosowana: ochrona wód powierzchniowych*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Humanistyczno-Ekonomicznej we Włocławku, Włocławek.
- A. Kajak et al. 1991. *Ekologiczna analiza przemian zachodzących na torfowiskach pod wpływem gospodarki*. [W:] *Bagna Biebrzańskie*. H. Okruszko (red.). Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych PAN, zeszyt nr 372. Wydawnictwo PWN, Warszawa, s. 435-454.
- I. Kardel et al. T. 2007. *Influence of Wetlands on the Leaching Carbon Compounds to the Surface Waters – Biebrza Wetlands Case Study*. [W:] *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 16, No. 2A, Part II, p. 395-40, Warszawa.
- W. Mioduszewski, M. Siłakowski, W. Bleuten 2000. *Preliminary assessment of surface and ground-water quality in peatlands of the Central Biebrza Basin*. [W:] *Some aspects of water management in the valley of Biebrza River*. W. Mioduszewski, M. Wassen (red.). Wydawnictwo Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, Falenty, s. 47-58.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z 9 listopada 2011 r. w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. Dziennik Ustaw nr 257, poz. 1545.
- Stan środowiska w Polsce. Sygnały 2011. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa 2011. Dostęp: 28.03.2013 r., tryb dostępu: http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/Sygnały%20calosc_pol2011.pdf.

Młody łos (*Alces alces*) na biebrzańskich łąkach

