INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 3/I/2012, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 181–190
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Paweł Biedka, Dariusz Andraka

ROLA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W PROCESIE EUTROFIZACJI JEZIOR

THE ROLE OF PRECIPITATION IN THE EUTROPHICATION PROCESS OF LAKES

Streszczenie

W artykule dokonano próby oceny wpływu opadów atmosferycznych na przebieg procesu eutrofizacji wód wybranych czterech połączonych ze sobą jezior Pojezierza Suwalsko-Augustowskiego: Necka, Rospudy Augustowskiej, Studzienicznego i Białego Augustowskiego. W analizie wykorzystano numeryczny model eutrofizacji zdefiniowany w programie WASP (Water Analysis Simulation Program), rozwijanym i wykorzystywanym w Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska. Parametry modelu wprowadzono na podstawie wyników badań własnych prowadzonych w latach 1998-2008 oraz wyników badań wód deszczowych dostępnych w opracowaniach WIOŚ i rocznikach statystycznych. Korzystając ze skalibrowanego modelu, symulowano sytuację, w której zwiększano lub zmniejszano oszacowane ładunki azotu i fosforu dostarczanego do wód jezior z opadami atmosferycznymi i obserwowano zmiany liczonego w modelu stężenia azotu całkowitego, amonowego i azotanów (V), fosforu całkowitego i fosforanów (V), a także chlorofilu a. Na podstawie tych zmian dokonano oceny roli, jaką pełnią opady atmosferyczne w procesie eutrofizacji zbiorników wód stojących.

Słowa kluczowe: eutrofizacja jezior, opady atmosferyczne, program WASP

Summary

The article attempts to assess the precipitation impact on eutrophication process in selected lakes of Suwalsko-Augustowskie Lakeland (lakes: Necko, Rospuda Augustowska, Studzieniczne and Białe Augustowskie). Numeric model of eutrophication, defined in WASAP programme (Water Analysis Simulation Program), which is developed and worked on in USA Environmental Protection

Agency, has been used in studies. The model has been developed on the basis of own investigations, which were carried on in 1998-2008 years as well as the rainfall analyses, that were available in WIOŚ (Voivodship Inspectorate for Environmental Protection) materials and statistical Yearbooks. Using the calibrated model a simulation was made, in which estimated nitrogen and phosphorus loads, delivered to the lake's waters from precipitation, were increased and decreased and then, the concentration changes of total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate, total phosphorus, orthophosphate and chlorophyl 'a' were observed in the model. Based on the obtained results, the role of precipitation in the eutrophication process of lakes was assessed.

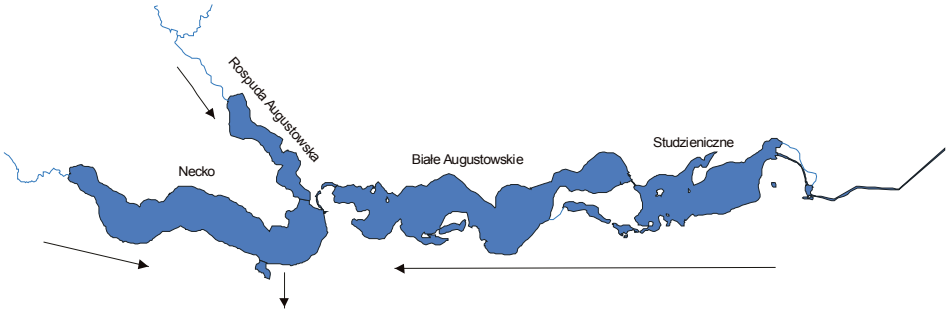
Key words: *eutrophication of lakes, precipitation, WASP programme*

WSTĘP

Naturalna sukcesja jezior będąca efektem eutrofizacji jest wynikiem gromadzenia w zbiornikach wodnych materii transportowanej wodami ze zlewni. Ładunki biogenów trafiające do zbiorników poddanych bezpośredniej lub pośredniej antropopresji są najczęściej wielokrotnie wyższe niż „naturalne" i powodują szereg zmian w ekosystemach wodnych, których przejawem jest wzrost żyzności wód, wraz ze wszystkimi negatywnymi skutkami tego zjawiska. Oprócz punktowych źródeł biogenów, takich jak zrzuty ścieków czy dopływy, ważną rolę w bilansie azotu i fosforu stanowią źródła obszarowe, takie jak spływ ze zlewni bezpośredniej, czy opady atmosferyczne. Ze względu na zanieczyszczenie wód opadowych i zawartość w nich biogenów, źródło to może stanowić ważny czynnik przyczyniający się do wzrostu żyzności wód. Celem pracy była próba oceny tego czynnika na zjawisko eutrofizacji wód czterech jezior Pojezierza Suwalsko-Augustowskiego.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW OBJĘTYCH BADANIAMI

Prezentowany w pracy wpływ opadów atmosferycznych na eutrofizację wód jezior dotyczy czterech połączonych ze sobą zbiorników leżących w bezpośrednim sąsiedztwie Augustowa. Badaniami objęto: Rospudę Augustowską, Necko, Białe Augustowskie oraz Studzieniczne. Zlewnia całkowita systemu jezior (892,18 km^2) obejmuje większą część powierzchni dorzecza rzeki Rospudy-Netty (746,08 km^2) – największego cieku wodnego w zlewni. Do pozostałych dopływów zaliczyć należy rzekę Zelwiankę – dopływ do jeziora Necko, i Kanał Augustowski – dopływ do Jeziora Studzienicznego [Podział hydrograficzny… 1983, Atlas podziału hydrograficznego… 2005]. Uwzględnione w opracowaniu jeziora zaprezentowano na rysunku 1.



Rysunek 1. Układ jezior z zaznaczonymi kierunkami przepływów adwekcyjnych
Figure 1. Advective flows in modelled lakes

Podstawowe wielkości morfometryczne jezior przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane wielkości morfometryczne analizowanych jezior [Biedka 2003]
Table 1. Selected morfometric parameters of analysed lakes [Biedka 2003]

Jezioro	Objętość [tys. m^3]	Powierzchnia [ha]	Głębokość maksymalna [m]
Necko	40564,4	400,0	25,0
Rospuda Augustowska	5383,1	104,0	10,5
Białe Augustowskie	41716,5	476,6	30,0
Studzieniczne	22073,6	250,1	30,5

Wymienione zbiorniki zaliczają się do wód eutroficznych [Skorbiłowicz i in. 1999]. Podstawowe wskaźniki jakości wody, wykorzystane przy kalibracji modelu eutrofizacji przedstawiono w tabelach 2-5.

Badania prowadzono w okresie od maja 2006 do kwietnia 2007r.

Tabela 2. Wyniki badań wód jeziora Rospuda Augustowska [Biedka 2008]
Table 2. Results of water analysis of Lake Rospuda Augustowska [Biedka 2008]

Wskaźnik	O_2 [mg / dm^3]	NH_4^+ [mg / dm^3]	NO_3^- [mg / dm^3]	N-całk. [mg N / dm^3]	PO_4^{3-} [mg / dm^3]	P-całk. [mg P / dm^3]	chloro-fil a [µg / dm^3]	krążek Secciego [m]	temp. [°C]
E P I L I M N I O N									
minimum	9.24	0.089	0.03	1.3	0.003	0.04	1.3	0.8	5.25
maksimum	12.66	0.270	1.68	2.5	0.083	0.11	59.0	2.8	28.14
H Y P O L I M N I O N									
minimum	0.00	0.076	0.40	1.4	0.040	0.05	n.b.	n.b.	5.20
maksimum	11.30	2.603	1.73	3.7	1.230	1.06	n.b.	n.b.	11.61

n.b. – nie badano

Tabela 3. Wyniki badań wód jeziora Necko [Biedka 2008]
Table 3. Results of water analysis of Lake Necko [Biedka 2008]

Wskaźnik	O_2 [mg / dm^3]	NH_4^+ [mg / dm^3]	NO_3^- [mg / dm^3]	N-całk. [mg N / dm^3]	PO_4^{3-} [mg / dm^3]	P-całk. [mg P / dm^3]	chloro-fil a [µg / dm^3]	krążek Secciego [m]	temp. [°C]
EPILIMNION									
minimum	9.14	0.070	0.04	1.2	0.006	0.04	0.4	0.6	5.84
maksimum	12.57	0.202	1.81	1.6	0.071	0.10	25.0	3.6	27.17
HYPOLIMNION									
minimum	0.01	0.084	0.89	1.4	0.025	0.04	n.b.	n.b.	5.68
maksimum	11.54	0.476	1.77	2.0	0.251	0.27	n.b.	n.b.	8.12

n.b. – nie badano

Tabela 4. Wyniki badań wód Jeziora Studzienicznego [Biedka 2008]
Table 4. Results of water analysis of Lake Studzieniczne [Biedka 2008]

Wskaźnik	O_2 [mg / dm^3]	NH_4^+ [mg / dm^3]	NO_3^- [mg / dm^3]	N-całk. [mg N / dm^3]	PO_4^{3-} [mg / dm^3]	P-całk. [mg P / dm^3]	chloro-fil a [µg / dm^3]	krążek Secciego [m]	temp. [°C]
EPILIMNION									
Minimum	8.39	0.057	0.04	0.5	0.012	0.03	0.2	2.8	5.76
maksimum	14.01	0.121	0.13	0.8	0.077	0.07	11.2	5.6	26.57
HYPOLIMNION									
Minimum	0.14	0.073	0.09	0.5	0.021	0.03	n.b.	n.b.	5.37
maksimum	12.51	0.509	0.22	0.9	0.138	0.17	n.b.	n.b.	5.98

n.b. – nie badano

Tabela 5. Wyniki badań wód Jeziora Białego Augustowskiego [Biedka 2008]
Table 5. Results of water analysis of Lake Białe Augustowskie [Biedka 2008]

Wskaźnik	O_2 [mg / dm^3]	NH_4^+ [mg / dm^3]	NO_3^- [mg / dm^3]	N-całk. [mg N / dm^3]	PO_4^{3-} [mg / dm^3]	P-całk. [mg P / dm^3]	chloro-fil a [µg / dm^3]	krążek Seccie-go [m]	temp. [°C]
EPILIMNION									
Minimum	8.23	0.056	0.03	0.5	0.004	0.02	0.9	2.0	6.04
maksimum	13.50	0.133	0.18	0.8	0.061	0.07	15.6	5.6	26.64
HYPOLIMNION									
Minimum	0.00	0.088	0.04	0.5	0.003	0.03	n.b.	n.b.	5.49
maksimum	11.71	0.887	0.18	1.1	0.209	0.21	n.b.	n.b.	6.60

n.b. – nie badano

METODYKA BADAŃ

Symulacje zmian jakości wód jezior wykonano korzystając z modelu eutrofizacji zaimplementowanego w programie WASP (Water Analysis Symulation Program) opracowanego przez Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska [Wool i in. 2001; Water Quality Analysis Simulation Program 2006]. Algorytmy użyte w programie oparte są na rozwiązaniu równań uwzględniających zasadę zachowania masy każdego z rozważanych składników wód powierzchniowych, a także uwzględniają ich przemiany wynikające z procesów biologicznych, chemicznych i fizycznych zachodzących w wodach powierzchniowych. Zmiany jakości wody przejawiające się intensywnością procesu eutrofizacji w wyniku dostarczania do układu związków biogennych oraz w wyniku działania czynników zewnętrznych (np. temperatury, nasłonecznienia, itp.) symulowane są w module EUTRO, który jest integralną częścią programu WASP. Symulacje w module EUTRO mogą być wykonywane na kilku poziomach złożoności, a użytkownik może wybrać wszystkie dostępne bądź wybrane procesy zachodzące w modelowanym układzie. W module EUTRO istnieje możliwość symulowania ośmiu podstawowych zmiennych stanu zjawiska eutrofizacji, tj. ośmiu wskaźników związanych z jakością wody, takich jak:

- tlen rozpuszczony,
- biochemiczne zapotrzebowanie na tlen,
- chlorofil a,
- azot amonowy,
- azot azotanowy (V),
- azot organiczny,
- fosfor fosforanowy (V),
- fosfor organiczny.

Wyszczególnione zmienne stanu liczone są przy uwzględnieniu wielu zachodzących jednocześnie i powiązanych ze sobą procesów, które rozpatrywane są w modelu jako cztery podstawowe zjawiska:

- kinetyka rozwoju fitoplanktonu,
- obieg azotu,
- obieg fosforu,
- bilans tlenu rozpuszczonego.

W programie WASP modelowane są wskaźniki jakości wody od momentu dopływu ze źródeł punktowych i obszarowych do momentu eksportu wskaźnika z układu w jego finalnej formie. W celu rozwiązania równań bilansu masowego w programie, użytkownik musi zdefiniować szereg danych wejściowych:

- podział modelu na segmenty,
- parametry transportu adwekcyjnego i dyspersyjnego,
- stężenie składników jakości wody na granicy modelu i środowiska zewnętrznego,

– punktowe i przestrzenne ładunki zanieczyszczeń,
– parametry i stałe kinetyki modelowanych przemian oraz funkcje czasowe,
– początkowe stężenie wskaźników jakości wody w modelowanym środowisku,
– parametry kontrolne symulacji i danych wyjściowych.

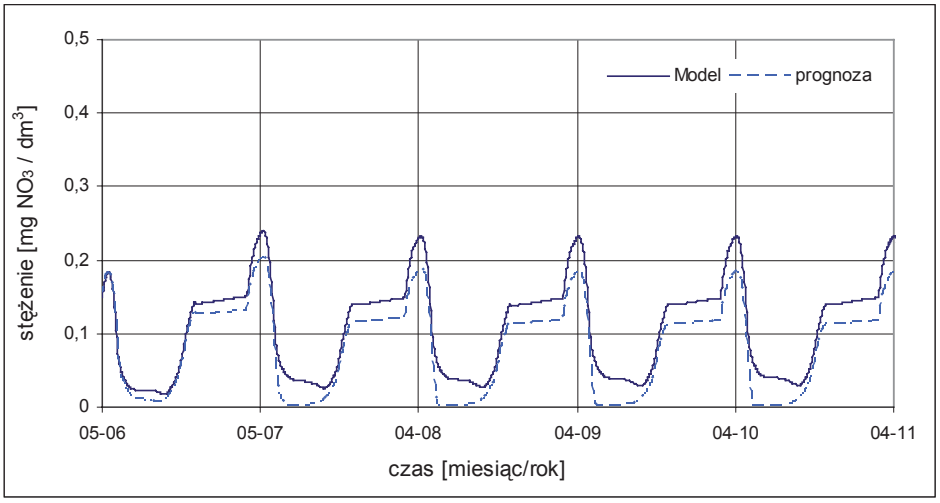
Korzystając z opracowanego, skalibrowanego modelu [Biedka 2009] wykonano szereg symulacji, w których modyfikowano przyjęte ładunki biogenów, których źródłem były opady atmosferyczne. W grupie symulacji uwzględniono zmiany ładunków azotu amonowego, azotanowego (V) i całkowitego, fosforu fosforanowego (V) i całkowitego oraz BZT_5, zakładając dwukrotne ich zwiększenie oraz zmniejszenie o połowę, w stosunku do wartości przyjętych w modelu. Zmiany te uwzględniono w grupie wartości stałych sterujących symulacją (grupa CONSTANS, Global Constants & Parameters). Symulacje przeprowadzono dla dziesięciu kolejnych lat, począwszy od roku, w którym przyjęto ładunki biogenów i intensywność modelowanych procesów dla skalibrowanego modelu. Symulacje w kolejnych latach uwzględniały niezmienność czynników charakterystycznych dla skalibrowanego modelu, z wyjątkiem zmian ładunków biogenów wprowadzanych do wód z opadami atmosferycznymi. Wybrane wyniki symulacji zaprezentowano na poniższych rysunkach.

WYNIKI BADAŃ

Uzyskane prognozy pozwalają na stwierdzenie, że opady atmosferyczne, które stanowią jedno ze źródeł biogenów w wodach powierzchniowych, mają zauważalny wpływ na zjawiska zachodzące w wodach Jeziora Studzienicznego i Białego Augustowskiego, natomiast pozostają bez praktycznego wpływu na jeziora Necko i Rospudę Augustowską.

W wyniku zmniejszenia o połowę wartości ładunków atmosferycznych wymienionych form azotu i fosforu w wodach jeziora Białego i Studzienicznego nastąpiła zmiana czynnika limitującego rozwój fitoplanktonu, którym w skalibrowanym modelu był fosfor. Przykładowe zmiany prognozowanego stężenia azotanów (V) w epilimnionie jeziora Białego przedstawiono na rysunku 2.

Zmiana czynnika limitującego w procesie produkcji substancji organicznej w epilimnionie Jeziora Białego i teoretycznie zerowe stężenia azotu azotanowego (V) i amonowego powodowały wzrost stężenia fosforu fosforanowego (V), który z braku azotu przyswajalnego dla roślin, nie był w całości zużywany przez fitoplankton. Wzrost ten w epilimnionie Jeziora Studzienicznego był praktycznie pomijalny (roczne stężenie maksymalne wzrosło o 0,001 mg PO_4/l). Zmiany stężenia związków fosforu w Jeziorze Białym zestawiono w tabeli 6.

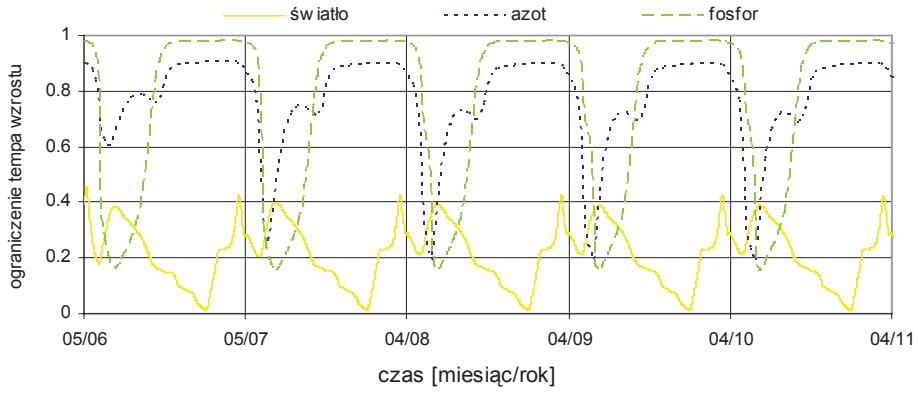


Rysunek 2. Prognozowane zmiany stężenia azotu azotanowego (V) w epilimnionie Jeziora Białego w wyniku zmniejszenia o połowę ładunku biogenów, którego źródłem są opady atmosferyczne
Figure 2. Expected effect of half decrease phosphorus and nitrogen load from precipitations on nitrate concentration in Lake Studzieniczne epilimnion

Tabela 6. Prognozowane zmiany stężenia fosforu fosforanowego (V) w epilimnionie Jeziora Białego w wyniku zmniejszenia o połowę ładunku biogenów, którego źródłem są opady atmosferyczne.
Table 6. Expected effect of half decrease phosphorus and nitrogen load from precipitations on orthophosphate concentration in Lake Białe Augustowskie epilimnion

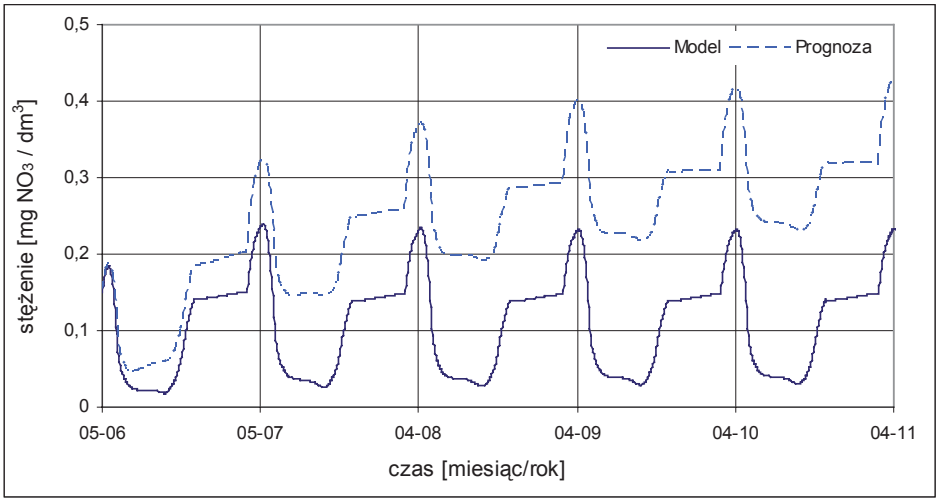
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
stężenie maksymalne [PO_4/l]	model	0.042	0.041	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
	symulacja	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.047

Na rysunku 3. przedstawiono zmiany czynników limitujących rozwój fitoplanktonu w Jeziorze Studzienicznym. Zmniejszony ładunek biogenów, którego źródłem są opady atmosferyczne nie powodował znaczących z punktu widzenia jakości wody zmian stężenia chlorofilu a. Maksymalne roczne stężenie tego wskaźnika w Jeziorze Studzienicznym uległo obniżeniu z 27 do 24 µg/l w czwartym roku symulacji. W Jeziorze Białym zmiana maksymalnego stężenia chlorofilu, a nie przekraczała 1 µg/l w kolejnych latach symulacji.



Rysunek 3. Prognozowane zmiany czynników ograniczających tempo wzrostu fitoplanktonu w epilimnionie Jeziora Studzienicznego w wyniku zmniejszenia o połowę ładunku biogenów, którego źródłem są opady atmosferyczne.
Figure 3. Expected effect of half decrease phosphorus and nitrogen load from precipitations on phytoplankton growth limits in Lake Studzieniczne epilimnion

Równolegle do powyższych symulacji przeprowadzono obliczenia, w których założono dwukrotne zwiększenie ładunku biogenów dostarczanego do wód jezior z opadami atmosferycznymi. Uzyskane prognozy potwierdzają poprzednie wnioski, iż opady atmosferyczne stanowią istotne źródło azotu w wodach Jeziora Studzienicznego i Białego, natomiast pozostają bez zauważalnego wpływu na pozostałe badane jeziora, czyli Rospudę Augustowską i Necko. Na rysunku 4. zaprezentowano zmiany stężenia azotanów (V) w epilimnionie jeziora Białego. Zwiększony ładunek azotu w opadach atmosferycznych przy czynniku limitującym wzrost fitoplanktonu jakim jest fosfor, powoduje zwiększenie stężenia azotanów (V) i azotu amonowego w epilimnionie. Opady atmosferyczne stanowią tu pomijalne źródło fosforu; wzrost prognozowanego maksymalnego rocznego stężenia chlorofilu a w epilimnionie Jeziora Studzienicznego i Białego w czasie trwania zakwitu wiosennego nie przekracza 1 µg/l. Stężenie fosforu fosforanowego (V) i całkowitego pozostaje niezmienne. W uwagi na brak znaczących zmian wskaźników jakości wody w jeziorach Necko i Rospuda Augustowska, wyniki symulacji nie zostały zaprezentowane na wykresach.



Rysunek 4. Prognozowane zmiany stężenia azotu azotanowego (V) w epilimnionie Jeziora Białego w wyniku dwukrotnego zwiększenia ładunku biogenów, którego źródłem są opady atmosferyczne.
Figure 4. Expected effect of half increase phosphorus and nitrogen load from precipitations on nitrate concentration in Lake Białe epilimnion

PODSUMOWANIE

Symulacje uwzględniające hipotetyczne zmiany ładunków fosforu i azotu, których źródłem są opady atmosferyczne, wskazują na zauważalny wpływ ładunku azotu na stężenie azotanów (V) w wodach Jeziora Studzienicznego i Białego. Zmniejszenie ładunku biogenów o połowę z tego źródła skutkowało zmianą pierwiastka limitującego produkcję biomasy fitoplanktonu. Pierwiastkiem tym w obu jeziorach stawał się azot. Zwiększenie ładunku powodowało natomiast dwukrotny wzrost stężenia azotanów (V) w wodach Jeziora Białego i ok. 30% wzrost w wodach Jeziora Studzienicznego. Sytuacja ta wynika z faktu, iż w wodach deszczowych stężenie związków azotu jest zdecydowanie wyższe niż zawiązków fosforu, a czynnikiem limitującym eutrofizację w badanych jeziorach jest fosfor. Hipotetyczne zmiany ładunków biogenów z atmosfery nie powodowały zmian maksymalnego rocznego stężenia chlorofilu a w wodach Jeziora Białego i Studzienicznego, co świadczy o tym, iż opady atmosferyczne nie stanowią tu istotnego źródła fosforu. Omawiane zmiany ładunków pozostawały bez praktycznego wpływu na wskaźniki jakości wody w Rospudzie i Necku, co wynika z faktu, iż dopływy tych jezior wprowadzają wielokrotnie wyższe ładunki biogenów, niż opady atmosferyczne.

BIBLIOGRAFIA

Atlas podziału hydrograficznego Polski, Cz. 2 : Zestawienia zlewni. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005

Biedka P., *Model of water eutrophization in lakes : Studzieniczne, Białe Augustowskie, Rospuda Augustowska and Necko*, w: Water protection systems in agricultural and industrial regions - selected problems, Polish Journal of Environmental Studies - Series of Monographs, vol. 3, HARD Publishing Company, Olsztyn 2009, s. 5-11

Biedka P., *Ocena naturalnej podatności na degradację wybranych jezior Pojezierza Suwalsko Augustowskiego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Inżynieria Środowiska, Nr 16, Białystok 2003

Biedka P., *Prognozowanie zmian jakości wód powierzchniowych stojących*, Rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Białystok 2008

Podział hydrograficzny Polski, cz. I Zestawienia liczbowo-opisowe, 1983; cz. II – mapa 1:200000, 1980; Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa

Skorbiłowicz E., Dzienis L., Skorbiłowicz M., Biedka P., *Ocena stanu czystości wód jezior Pojezierza Augustowskiego*, [w] D. Wawrentowicz (red.) "Gospodarka wodno-ściekowa w Euroregionie Niemen", Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok 1999

Wool T. A., Ambrose R. B. Martin J. L., *The Water Analysis Simulation Program, User Documentation for Version 6.0*, USEPA Region 4, Atlanta, 2001

Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version 7.1., Release Notes: 2/7/2006, Watershed and Water Quality Modeling Technical Support Center US EPA, Office of Research Development National Exposure Research Laboratory Ecosystems Research Division, Athens, GA, 2006

Dr inż. Paweł Biedka,
Dr inż. Dariusz Andraka
Katedra Systemów Inżynierii Środowiska
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok
e-mail: p.biedka@pb.edu.pl
Tel. 85 7469578

Artykuł powstał w wyniku realizacji pracy S/WBiIS/2/2011, finansowanej przez MNiSzW.