

Andrzej Sapek*, Barbara Sapek*

FOSFOR W OPADZIE ATMOSFERYCZNYM

PHOSPHORUS IN ATMOSPHERIC DEPOSITION

Słowa kluczowe: eutrofizacja, fosfor, jeziora, opad atmosferyczny, pył eoliczny.

Key words: aeolian dust, atmospheric deposition, eutrophication, phosphorus, lakes.

Streszczenie

Opad atmosferyczny odgrywa istotną rolę w obiegu fosforu w środowisku. Globalny ładunek fosforu wnoszony rocznie z atmosfery na Ziemię oceniono współcześnie na 1,15 mln t P·r⁻¹. Głównym źródłem fosforu w opadzie są pyły eoliczne zawierające przeciętnie 1,1 g P·kg⁻¹. Mniejszym lecz ważniejszym źródłem są pyły pochodzenia biologicznego, ponieważ zawierają fosfor szybciej przyswajalny dla roślin. Udział innych źródeł fosforu nie przekracza 10%, źródłami tymi są lotne popioły ze spalania kopalnych zasobów energetycznych oraz współczesnej biomasy. Około 15% fosforu w opadzie występuje w postaci fosforanów rozpuszczonych w wodzie zawartej w powietrzu i w aerozolu. Wszystkie te postaci fosforu powracają z atmosfery na Ziemię z opadem atmosferycznym, mokrym tj. z deszczem i śniegiem oraz z opadem suchym tj. z cząstkami materialnymi (PM). Fosfor jest obecny również w opadzie rosy, mgły i osadzanych kroplach z chmur. Fosfor z opadu nie stwarza większych zagrożeń środowiskowych w ekosystemach lądowych, stwarza je natomiast w zbiornikach wód stojących, co opisano w przytaczanym piśmiennictwie. Ładunek fosforu wnoszony z opadem atmosferycznym jest niewielki i przeciętnie oceniany na 0,30 kg P·ha⁻¹·r⁻¹, co odpowiadałoby 9,4 tys. t P·r⁻¹ opadającemu na całą powierzchnię Polski. Jest to tyle ile rocznie wprowadza się z Polski rzekami do Morza Bałtyckiego, a po stronie przychodu w krajowym bilansie fosforu ładunek z opadu stanowi tylko 5%.

* *Prof. dr hab. Andrzej Sapek, prof. dr hab. Barbara Sapek – Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Falenty, Al. Hrabstwa 3, 05-090 Raszyn; tel.: 22 735 75 65, e-mail: a.sapek@itep.edu.pl; b.sapek@itep.edu.pl*

Summary

The atmospheric deposition plays a significant role in the phosphorus cycling in the environment. The global load of this element deposited from atmosphere on the Earth surface was evaluated as 1.15 mln t P·y⁻¹ nowadays. The main sources of phosphorus are aeolian dust containing in average 1.1 g P·kg⁻¹, secondary, but important as well, dust of biological origination, while the contained phosphorus is easy available. The participation of other sources does not exceed 10%, they comprise of fly ashes from fires of natural and anthropogenic origin. About of 15% of phosphorus in deposition is in the form phosphate dissolved in atmospheric water and aerosols. All this form of phosphorus is precipitating with atmospheric depositions – wet in the form of rain and snow – and dry mostly in the particulate matter (PM). Phosphorus is also present in the depositions of dew, fog and cloud droplets. Phosphorus does not produce a risk to terrestrial ecosystems, but does to lakes and estuaries. The phosphorus load from atmospheric deposit is low, valued approximately as 0.30 kg P·ha⁻¹·r⁻¹, that is an equivalent to 9.4 thousand t P·r⁻¹ deposited each year on the territory of Poland. It is the same load, which is flowing in to the Baltic Sea from our country.

1. WPROWADZENIE

Opad atmosferyczny nie zawsze odgrywa zauważalną, lecz istotną rolę w obiegu fosforu w środowisku. Zainteresowanie fosforem wnoszonym do atmosfery i z niej opadającym na Ziemię osiągnęło apogeum w latach 70. i 80. ubiegłego wieku, by skupić się na emisji azotu w latach 90., a obecnie na emisji dwutlenku węgla. Fosfor wprowadzony do atmosfery dociera z opadem atmosferycznym do wszystkich ekosystemów lądowych i wodnych. Ilość fosforu wnoszona z atmosfery nie przekracza na ogół 0,3 kg P·ha⁻¹·r⁻¹, co nie powoduje eutrofizacji w większości ekosystemów lądowych, lecz może się do niej przyczyniać w jeziorach i estuariach morskich. Ładunek ten może być nawet pożądanym w niektórych lasach, położonych na glebach ubogich w ten składnik.

Zamiarem niniejszego opracowania jest omówienie źródeł pochodzenia fosforu w atmosferze i w opadzie atmosferycznym oraz postaci jego w nim występowania oraz dróg jego powrotu na Ziemię, a także wywoływanych skutków w środowisku, zwłaszcza w zbiornikach wód powierzchniowych.

2. POSTACIE FOSFORU W ATMOSFERZE

Większość fosforu występującego w atmosferze jest zawarta w mineralnych i organicznych aerozolach cząstek materialnych (PM) zawieszonych w powietrzu. Angielski termin PM odpowiada terminowi „pył zawieszony” stosowanemu w nazewnictwie GUS. Mniejsze

ilości fosforu występują w atmosferze w postaci rozpuszczonej w aerozolach i wodzie atmosferycznej, a tylko śladowe w postaci gazowych fosforowodorów.

W cząstkach mineralnych fosfor znajduje się głównie w postaci fosforanów wapnia, żelaza i glinu, z których tylko część może ulec łatwemu rozpuszczeniu w wodzie. W materiałach pochodzenia biologicznego fosforany występują w większości w postaci łatwo rozpuszczalnych soli lub estrów z substancjami organicznymi, co powoduje, że po opadnięciu na powierzchnię Ziemi są one łatwo dostępne dla roślin. W odróżnieniu od związków węgla i azotu stężenie gazowych związków fosforu jest minimalne. W powietrzu występują gazowe związki fosforoorganiczne (fosfiny), a najważniejszym z nich jest fosforiak (PH_3), analog amoniaku, którego stężenie w dolnej troposferze nocą mieści się w wyższym przedziale – $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, a w godzinach południowych w dzień w przedziale niższym – $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$. Promieniowanie słoneczne inicjuje fotochemiczne reakcje utleniania fosforowodorów do fosforanów [Zhu i in., 2006].

3. POCHODZENIE FOSFORU W ATMOSFERZE

Największe ilości fosforu w opadzie atmosferycznym występują w pyłach różnego pochodzenia, wśród których najwięcej tego pierwiastka zawiera pył materiału glebowego, wnoszony do atmosfery w wyniku erozji eolicznej (wietrznej). Na znaczenie pyłów eolicznych w obiegu pierwiastków w przyrodzie zwrócił uwagę Karol Darwin [1846] już w połowie XIX w. Dwa procesy uczestniczące w erozji eolicznej powodują rozbitcie agregatów glebowych i uwalnianiu pyłu. Pierwszym z nich jest saltacja polegająca na podrywaniu przez wiatr agregatów i uderzanie nimi o powierzchnię gleby, co powoduje ich rozbitcie i uwolnienie z nich pyłów oraz podrywanie ziaren piasku, które opadając rozbijają owe agregaty. Uwolnione do powietrza cząstki gleby są unoszone w wyniku cyrkulacji atmosferycznych i są przenoszone nawet na duże odległości. Na przykład Grousset i in. [2003] stwierdzili, że pyły z pustyni wschodnioazjatyckich przemieszczają na odległość ok. 20 000 km, by osiadać na śniegu Alp Francuskich, natomiast z chmur zalegających nad Puerto Rico wydzielono pyły pochodzące z Sahary w Afryce [Reyes-Rodríguez i in. 2009]. Lawrence i Neff [2009] ocenili, że globalny opad pyłów eolicznych mieści się w granicach od 800 do 2000 $\text{mln t}\cdot\text{r}^{-1}$, z tego na obszary położone w odległości 10 do 1000 km od pierwotnego źródła opada od 10 do 500 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$, a w dalszych odległościach od 0,5 do 10 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$.

Skład mineralny pyłów jest zdominowany przez fyllokrzemiany, wśród których przeważają illit i kaolinit. Pyły wnoszone z wielkich pustyni stanowią główne źródło cząstek mineralnych o średnicach $> 2 \mu\text{m}$. Współczesna działalność człowieka może przyczyniać się do nasilania emisji pyłów eolicznych przez zwiększanie powierzchni gleb narażonych na erozję wietrzną na skutek procesów pustyńnienia, a w rolnictwie w wyniku poszerzania powierzchni pól użytków ornych. Przeciętna zawartość fosforu w eolicznych pyłach wy-

nosi $1,087 \text{ g P}\cdot\text{kg}^{-1}$ i jest o ok. 1,6 razy większa od jego średniej zawartości w powierzchniowej skorupie ziemskiej wynoszącej średnio $0,70 \text{ g P}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Taylor i McClennan 1995], co wskazuje, że opad pyłów eolicznych może wzbogacać niektóre ekosystemy w ten pierwiastek (tab. 1).

Tabela 1. Zawartość podstawowych pierwiastków w opadzie pyłów eolicznych wg Lawrence i Neffa [2009]

Table 1. Content of the main elements in Aeolian dust deposition according to Lawrence and Neff [2009]

Pierwiastek	Zawartość, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Średnie wzbogacenie*
Si	285	0,9
Al	71	0,9
Si	36	1,2
Ca	36	1,2
Mg	1,2	0,9
K	2,3	0,8
Na	1,2	0,5
P	1,087	1,6

Objaśnienie: * Względne wzbogacenie wobec średniej zawartości pierwiastków w powierzchniowej skorupie ziemskiej.

W pyłach eolicznych dominuje materiał mineralny, lecz zawierają one również materię organiczną, głównie glebowe substancje próchniczne. Pyły wulkaniczne składają się wyłącznie z materiału mineralnego, zatem zawierają mniej fosforu, ponieważ nie zawierają materii organicznej.

Mniejsze ilości fosforu zawierają także pyły pochodzące z różnych innych źródeł naturalnych i antropogenicznych (tab. 2). Ze źródeł naturalnych rozpylane są lotne popioły powstające w czasie pożarów w przyrodzie i erupcji wulkanicznych oraz w trakcie rozpylania wody morskiej. Ze źródeł antropogenicznych pochodzą popioły lotne – produkty spalania kopalnych zasobów energetycznych oraz współczesnej biomasy. Pyły są także emitowane w procesach produkcyjnych w przemyśle i w rolnictwie. Źródłem pyłów jest także transport, zwłaszcza drogowy, a także bytowa i komunalna działalność ludności. Z obydwóch źródeł pochodzą też bogate w fosfor aerozole pochodzenia biologicznego.

Tabela 2. Globalne źródła fosforu w atmosferze, mln t P·r⁻¹ [Mahowald 2008]

Table 2. Global Sources of Atmospheric Phosphorus, mln t P·y⁻¹ [Mahowald 2008]

Źródło fosforu	Fosfor całkowity	P-PO ₄
Pył	1,150	0,115
Pierwotne cząstki biologiczne	0,164	0,082
Spalanie biomasy	0,025	0,012
Spalanie paliw kopalnych	0,024	0,012
Spalanie biopaliw	0,021	0,010
Działalność wulkanów	0,006	0,003
Sól moska	0,0049	0,0049
Źródła antropogeniczne	4,8%	14,3%

Zawartość fosforu w lotnych popiołach, które powstają w czasie pożarów w przyrodzie oraz spalania w celach pozyskania energii zależy od zawartości fosforu w spalonym materiale (tab. 3). Pyły lotne pochodzące ze spalania węgla kamiennego mogą np. zawierać od 0,60 do 0,88% P w suchej masie [Pathan i in. 2003]. Ładunek fosforu wnoszony z pyłami wulkanicznymi okazał się wbrew wcześniejszym przypuszczeniom niewielki.

Tabela 3. Zawartość fosforu (P) w drobnych i grubych cząstkach materialnych rozpraszanych z różnych źródeł spalania, g P·kg⁻¹ s.m. [Mahowald 2008]

Table 3. Phosphorus (P) content in fine and coarse particulate matter emitted by various combustion sources, g P·kg⁻¹ DM [Mahowald 2008]

Źródło	Cząstki materialne	
	drobne	grube
Spalanie węgla	15	2
Spalanie oleju	10	2
Spalanie odpadów	6,3	9

Aerozole powstające z piany morskiej w wyniku podrywania jej przez wiatr mają duże znaczenie w przemieszczaniu się na ląd soli zawartych w wodzie morskiej, a wraz z nimi fosforu. Kiedy tylko poderwana piana znajdzie się na wysokości 15 cm nad poziomem wody, to jest unoszona z wiatrem nawet na większe odległości. W czasie jej przemieszczania zawarta woda ulega częściowemu wyparowaniu i powstają aerozole soli o średnicy cząstek od 2 do 20 μm [Sharp 1983]. Stężenie fosforanów w wodzie morskiej mieści się w granicach od 0,002 do 0,109 mg P·dm⁻³, w tym ok. 0,006 mg P·dm⁻³ wiązane organicznie [Mahowald 2008].

Aerozolami pochodzenia biologicznego są zawieszony w powietrzu czynne lub obumarłe insekty, drobnoustroje, grzyby i pyłki roślin oraz obumarłe fragmenty roślin i zwierząt. Naturalna zawartość fosforu w tym materiale mieści się w granicach od 2,0 do 5,0 g P·kg⁻¹ suchej masy. Materiał ten dociera na powierzchnię Ziemi z opadem suchym, a w opa-

dzie mokrym część zawartego w nim fosforu ulega rozpuszczeniu. Natężenie opadu fosforu z materiałem biologicznym jest największe z początkiem lata, kiedy aktywność biologiczna jest najsilniejsza. Lewis i in. [1985] badali zmiany stężenia reaktywnych fosforanów w wodzie deszczowej spadającej do jeziora Dillon w górach stanu Colorado. Stwierdzili, że w czasie kilkunastu dni na przełomie czerwca i lipca 1982 r. stężenie reaktywnych fosforanów było wielokrotnie większe niż stężenie przeciętne spotykane w okresie letnim, a ładunek fosforu w tym opadzie osiągał wtedy $0,150 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ na tydzień. Ważnym materiałem biologicznym w opadzie fosforu są pyłki roślin. Badania nad opadem pyłków sosny (*Pinus strobus* i *Pinus resinosa*) przeprowadzili w północnej Wirginii Doskey i Ugoagwu [1989]. Stwierdzili, że w latach 1979–1981 opad tych pyłków do jeziora Crystal w stanie Wirginia wynosił od 3,5 do $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$, co przy zawartości w nich fosforu ok. $2,8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [Lewis in. 1985] opowiadałoby opadającemu ładunkowi fosforu od $0,010$ do $0,228 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$. Największa wartość fosforu w tym ładunku jest bliska uznanemu, przeciętnemu ładunkowi fosforu w opadzie atmosferycznym. Opad fosforu z innymi materiałami pochodzenia biologicznego jest jednak w niewielkim stopniu rozpoznany i uzasadniony.

Ponad 80% fosforu w atmosferze znajduje się w mineralnych i organicznych cząstkach materialnych (aerozolach) zawieszonych w powietrzu. Około 15% fosforu w opadzie występuje w postaci fosforanów rozpuszczonych w wodzie zawartej w powietrzu i aerozolach. Wszystkie te formy fosforu powracają z atmosfery na Ziemię z opadem atmosferycznym mokrym oraz suchym. Fosfor jest obecny również w opadzie rosy, mgły i w osadzanych kropkach wody z chmur.

4. ŁADUNEK FOSFORU W OPADZIE ATMOSFERYCZNYM

Globalny ładunek fosforu wnoszony z atmosfery na Ziemię z opadem cząstek materialnych (aerozoli) oceniono współcześnie na 1,15 mln t P (tab. 2) [Mahowald 2008], w którym ok. 82% stanowią różne postacie pyłu, głównie eolicznego, 12% to pierwotne cząstki pochodzenia biologicznego. Niewielką rolę przypisano innym rodzajom opadu, co nie zawsze znajduje potwierdzenie przy rozpatrywaniu wyników z poszczególnych badań. Opad rozpuszczonych fosforanów stanowi tylko 0,15 mln t P. W odróżnieniu od azotu udział źródeł antropogenicznych w atmosferycznym opadzie fosforu jest znacznie mniejszy i jest oceniany na 5% w ładunku fosforu całkowitego i 15% w ładunku rozpuszczonych fosforanów. Prócz rozpylonej wody morskiej prawie wyłącznym źródłem fosforu w atmosferze są ekosystemy lądowe, z których tą drogą trafia do oceanów ok. $0,56 \text{ mln t P} \cdot \text{r}^{-1}$.

Występujące w opadzie atmosferycznym formy fosforu podzielono na cztery kategorie (tab. 4):

- fosfor występujący w związkach nieorganicznych,
- fosfor występujący w związkach organicznych,

- fosfor rozpuszczony,
- fosfor zawarty w cząstkach materialnych.

Tabela 4. Kategorie postaci fosforu występujących w atmosferze

Table 4. Category of phosphorus forms present in atmosphere

Kod kategorii	Postać	Opad fosforu (P), kg P·ha ⁻¹ ·r ⁻¹
SRP	rozpuszczony fosfor reaktywny	0,0542
SUP	rozpuszczony fosfor niereaktywny	0,0236
PIP	nieorganiczny w cząstkach materialnych	0,0420
POP	organiczny w cząstkach materialnych	0,123
TP	fosfor całkowity	0,243

Objaśnienia: kg P·ha⁻¹·r⁻¹ – kilogramy potasu na hektar na rok.

W celu łatwiejszego zrozumienia sensu tego podziału w tabeli 4 zestawiono także dane analityczne otrzymane przez Tsukudę i in. [2006] w badaniach prowadzonych w leśnej stacji doświadczalnej Ashiu w Japonii. Badania te wykazały, że 68% fosforu w opadzie jest zawarte w cząstkach materialnych oraz że dominuje w nim fosfor związany organicznie, stanowiący aż 60% fosforu całkowitego.

Przyjmuje się, że w Europie przeciętny ładunek fosforu w opadzie atmosferycznym na systemy lądowe nie przekracza 0,3 kg P·ha⁻¹·r⁻¹, co również potwierdzają 20-letnie obserwacje prowadzone w Falentach [Sapek i Nawalany 2006]. Twaroski i inni [2007] na przykładzie głównych zlewni w Minnesota wykazali, że opad fosforu zależy od sposobu zagospodarowania powierzchni.

Największy średni ładunek fosforu opadał na miasta, mniejszy na tereny wiejskie, a najmniejszy na lasy – odpowiednio 0,31, 0,27 i 0,114 kg P·ha⁻¹·r⁻¹. Przeciętny udział opadu mokrego w tym ładunku stanowił 33%. Ilości te nie mają większego wpływu na żyzność ekosystemów lądowych. Najwięcej zatem badań skupiło się nad ładunkiem fosforem wnoszonym z atmosfery do zbiorników stojących wód powierzchniowych, zwłaszcza jezior i estuariów. Większość tych badań przeprowadzono w latach 1970–1990, a wybrane wyniki zestawiono w tabeli 5. Ładunek większy niż 1 kg P·ha⁻¹·r⁻¹ opadał tylko do nielicznych jezior. Największy średni ładunek 2,7 kg P·ha⁻¹·r⁻¹ całkowitego fosforu był wnoszony do jeziora Wiktorii we wschodniej Afryce. Ponad 75% fosforu tego ładunku pochodziło z opadu suchego, lecz w opadzie mokrym stężenie rozpuszczalnego, reaktywnego fosforu było 2,5 raza większe niż w opadzie suchym. W całkowitym opadzie ładunek tej rozpuszczalnej postaci fosforu wynosił 0,81 kg P·ha⁻¹·r⁻¹.

Tabela 5. Wybrane przykłady opadu całkowitego fosforu (TP) z atmosfery do zbiorników wód powierzchniowych**Table 5.** Selected data total phosphorus (TP) deposition from the atmosphere to surface water basin

Zbiornik	Opad całkowity (TP)		Źródła danych
	mm	kg·ha ⁻¹ ·r ⁻¹	
Jezioro Wiktoria, Afryka	–	2,700	Tamatamah i in. [2005]
Jezioro Valencia, Wenezuela	750	1,683	Lewis [1981]
Crown Estate, Berkshire, UK	882	1,221	Alcock i Morton [1985]
Jezioro Thunderbird, Oklahoma USA	0,862	1,073	Johnson i Risser [1974]
Jezioro Merlewood, UK	1050	1,001	Allen i in. [1968]
Zatoka Tampa, Floryda	–	0,910	Dixon i in. [1996]
Jezioro Carl Blackwell, Oklahoma Oklahoma, USA	–	0,605	Sober i in. [1979]
Jezioro Walker Branch, Tennessee, USA	1530	0,552	Swank i Henderson [1976]
Pitt County, North Carolina, USA	1050	0,490	Brinson i in. [1980]
Jezioro Stechlin, Niemcy	–	0,453	Mothes i in. [1985]
Zbiornik wodny na Wisłocze	–	0,450	Kozelick [2007]
Rzeka Rhode, Maryland, USA	1098	0,409	Jordan i in. [1995]
Southern Basin, Lake Michigan, USA	568	0,363	Eisenreich i in. [1977]
Piburger See, Austria	–	0,360	Psenner [1984]
Lake Tahoe, California, USA	976	0,326	Jassby i in. [1994]
Rawson Lake, Ontario, Kanada	790	0,326	Schindler i in. [1976]
Jezioro Okeechobee, Floryda Everglades Lake, USA Okeechobee	–	0,321	Ahn i James [1999]
Jezioro Rio Seco, Hiszpania	–	0,317	Morales-Baquero i in. [2006]
Południowo-wschodnie morze Śródziemne Southeast Mediterranean, Israel	–	0,310	Herut [2002]
Zbiornik Rimov, Czechy	502	0,240	Kopacek i in. [1997]
Jezioro Parkgate, Irlandia	1000	0,230	Jordan [1987]
Jezioro Loughgrave, Irlandia	1661	0,220	Gibson i in. [1995]
Jezioro Gardsjon, Szwecja	974	0,079	Persson i Broberg [1985]

Objaśnienia: – nie oznaczono; kg·ha⁻¹·r⁻¹ – kilogramy na hektar na rok.

5. SKUTKI W ŚRODOWISKU

Przeciętny ładunek fosforu w opadzie atmosferycznym, wynoszący ok. 0,300 kg P·ha⁻¹·r⁻¹, nie stanowi istotnego zagrożenia eutrofizacją ekosystemów lądowych, wręcz przeciwnie może stanowić uzupełnienie ilości tego składnika wymywanej z gleby. Stanowi natomiast zagrożenie eutrofizacją wód stojących w zbiornikach naturalnych – jeziorach i estuariach.

Przeciętny ładunek fosforu z opadu atmosferycznego jest oceniony w Polsce na $0,300 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$, którego losy po wniesieniu do zbiornika wody stojącej zależą od postaci fosforu w opadzie. Fosfor w pyłe mineralnym i pochodzenia biologicznego trafi ostatecznie do osadu dennego, lecz uprzednio przejdą do roztworu zawarte w nim postacie rozpuszczalne. W sumie ok. 25% fosforu w opadzie jest w postaci rozpuszczalnej, co odpowiada $0,075 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$, która to ilość rozpuszczona w 1 m warstwie wody zbiornika spowoduje zwiększenie stężenia fosforu w wodzie w zbiorniku o $0,0075 \text{ g P}\cdot\text{m}^{-3}$, co odpowiada 7,5% wartości dopuszczalnego stężenia całkowitego fosforu w wodach stojących, ustalonego w tzw. Dyrektywie azotanowej na $<0,100 \text{ g P}\cdot\text{m}^{-3}$ [Rozporządzenie... 2002]. Dalsze losy fosforu w osadzie dennym w wodach stojących nie są przedmiotem niniejszego opracowania. Znaczenie fosforu z opadu atmosferycznego w bilansie tego składnika w morzu opisali Krom i in. [2004] na przykładzie wschodniej części morza Śródziemnego, ograniczonego cieśniną sycylijską. Całkowity ładunek fosforu wnoszony z rzekami do tego obszaru stanowi $105 \text{ tys. t P}\cdot\text{r}^{-1}$, w którym 28% pochodziło z opadu atmosferycznego. Główną masą tego opadu był pył z Sahary, w którym 19% fosforu było w postaci organicznej, a 13% rozpuszczalnej.

6. PODSUMOWANIE

Ładunek fosforu wnoszony z opadem atmosferycznym jest niewielki i przeciętnie oceniany na $0,30 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$, co odpowiadałoby $9,4 \text{ tys. t P}\cdot\text{r}^{-1}$ opadającym na całą powierzchnię Polski. Jest to w sam raz tyle, ile rocznie odprowadza się z Polski fosforu rzekami do Morza Bałtyckiego, a w krajowym bilansie tego składnika po stronie przychodu ładunek z opadu stanowi tylko 5% [Sapek 2010]. Przyjmuje się także, że wymycie fosforu z mineralnych gleb polskich mieści się w granicach od $0,1$ do $0,5 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$, które to ilości są równoważone ładunkowi wnoszonemu z opadem. Ostatecznie zatem o ładunku fosforu wprowadzanym do środowiska decydują jego ilości zastosowane z nawozami mineralnymi.

O ile fosfor z opadu nie stwarza zagrożeń środowiskowych w ekosystemach lądowych, o tyle stwarza je w zbiornikach wód stojących, co opisano w załączonym do artykułu piśmiennictwie, źródło tego składnika przyczynia się do eutrofizacji wody w jeziorach, także w Polsce. Nie ma – jak dotąd – propozycji ograniczenia ilości fosforu wnoszonej z opadem atmosferycznym, niemniej jednak tę ilość należy brać pod uwagę przy rozpatrywaniu zagrożeń, jak to ma miejsce w opinii ekspertów z Uniwersytetu Rolniczego w Wageningen, którzy całą winą za eutrofizację jezior w północnej Polsce obarczają rolnictwo i na tej podstawie zalecają objąć rygorami „Dyrektywy azotanowej” obszar całej Polski [Ocena... 2007]. Wśród nierolniczych źródeł tej eutrofizacji należy umieścić fosfor z opadu atmosferycznego.

Fosfor jest pierwiastkiem „konserwatywnym”, raz wprowadzony do ośrodka trudno ulega z niego uwolnieniu i przemieszczaniu do innych ośrodków. Wyróżniono jedynie dwa naturalne mechanizmy przemieszczania fosforu – z wodą i jako opad atmosferycz-

ny. W obydwu mechanizmach transportowane są podobne ilości tego składnika, aczkolwiek największym zainteresowaniem obdarzono przemieszczanie z wodą, ponieważ w tym ośrodku są najłatwiej widoczne bezpośrednie ujemne skutki wzbogacenia wody w fosfor. Fosfor w atmosferze nie pogarsza jakości powietrza, opadający natomiast może pogarszać jakość wody stojącej. W niektórych ekosystemach, gdzie gleby są ubogie w ten składnik opad atmosferyczny dostarcza fosfor w niewielkich ilościach, lecz stymulujących rozwój czynności biologicznych.

PIŚMIENICTWO

- AHN H., JAMES R.T. 1999. Outlier detection in phosphorus dry deposition rates measured in South Florida. *Atmospheric Environment* 33: 5123–5131.
- ALCOCK M.R., MORTON A.J. 1985. Nutrient content of throughfall and stem-flow in woodland recently established on heathland. *Journal of Ecology* 73: 625–632.
- ALLEN S.E., CARLISLE A., WHITE E.J., EVANS C.C. 1968. The plant nutrient content of rainwater. *Journal of Ecology* 56: 497–504.
- BRINSON M.M., BRADSHAW H.D., HOLMES R.N., ELKINS J.B.J. 1980. Litterfall, stem-flow, and throughfall nutrient fluxes in an alluvial swamp forest. *Ecology* 61: 827–835.
- DARWIN C.R. 1846. An account of the fine dust which often falls on vessels in the Atlantic Ocean. *Quarterly Journal of the Geological Society of London* 2: 26–30.
- DIXON L.K., MURRAY S., PERRY P.S., MINOTTI M.S., PIERCE R.H. 1996. Assessment of bulk atmospheric deposition to the Tampa Bay watershed, Tampa Bay National estuary program, Final Report September 25: 1–100.
- DOSKEY P.V., UGOAGWU B.J. 1989. Atmospheric deposition of macronutrients by pollen at a semi-remote site in northern Wisconsin. *Atmospheric Environment*: 2761–2766.
- EISENREICH S.J., EMLING P.J., BEETON A.M. 1977. Atmospheric loading of phosphorus and other chemicals to lake Michigan. *Journal of Great Lakes Researches* 3: 291–304.
- GIBSON C.E., WU Y., PINKERTON D. 1995. Substance budgets of an upland catchment: the significance of atmospheric phosphorus inputs. *Freshwater Biology* 33: 385–392.
- GROUSSET F.E., GINOUX P., BORY A., BISCAYE P.E. 2003. Case study of a Chinese dust plume reaching the French Alps. *Geophysical Research Letters* 30, 6: 124–130.
- HERUT B., COLLIER R., KROM M.D. 2002. The Role of Dust in Supplying Nitrogen and Phosphorus to the Southeast Mediterranean. *Limnology and Oceanography* 47, 3: 870–878.
- JASSBY A.D., REUTER J.E., AXLER R.P., GOLDMAN C.R., HACKLEY S.H. 1994. Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in the annual nutrient load of Lake Tahoe (California-Nevada). *Water Resources Researches* 30: 2207–2216.
- JOHNSON F.L., RISSER P.G. 1974. Biomass, annual net primary production, and dynamics of six mineral elements in a post oak-blackjack oak forest. *Ecology* 55: 1246–1258.

- JORDAN C. 1987. The precipitation chemistry at rural sites in Northern Ireland. *Records of Agricultural Researches* 35: 53–66.
- KOPACEK J., PROCHAZKOWA L., HEJZLAR J. 1997. Trends and seasonal patterns of bulk deposition of nutrient in the Czech Republic. *Atmospheric Environment* 31, 6: 797–808.
- KOSZELNIK P. 2007. Atmospheric deposition as a source of nitrogen and phosphorus loads into the Rzeszow reservoir, SE Poland. *Environment Protection Engineering* 33, 2: 157–164.
- LAWRENCE C.R., NEFF J.C. 2009. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition. *Chemical Geology* 267: 46–63.
- LEWIS W.M., JR. 1981. Precipitation chemistry and nutrient loading by precipitation in a tropical watershed. *Water Resources Research* 17, 1: 169–181.
- LEWIS W.M., JR., GRANT M.C., HAMILTON S.K. 1985. Evidence that filterable phosphorus is a significant atmospheric link in the phosphorus cycle. *Oikos* 45: 428–432.
- MAHOWALD N., JICKELLS T.D., BAKER A.R., ARTAXO P., BENITEZ-NELSON C.R., BERGAMETTI G., BOND T.C., CHEN YING, COHEN D.D., HERUT B., KUBILAY N., LOSNO R., LUO CHAO, MAENHAUT W., MCGEE K.A., OKIN G.S., SIEFERT R.L., TSUKUDA S. 2008. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts, *Global Biogeochemical Cycles* 22, GB4026.
- MORALES-BAQUERO R., PULIDO-VILLENA E., ROMERA O., ORTEGA-RETUERTA E., CONDE-PORCUNA J.M., PÉREZ-MARTÍNEZ C., RECHE I. 2006. Significance of atmospheric deposition to freshwater ecosystems in the southern Iberian Peninsula. *Limnetica* 25: 1–2, 171–180.
- MOTHES G., KOSCHEL R., PROFT G. 1985. The chemical environment. W: Lake Stechlin. A Temperate Oligotrophic Lake. Casper S.J. (red.). Lancaster: 87–125.
- Ocena wyznaczonych w Polsce stref wrażliwych na zanieczyszczenie związkami azotu.** 2007. Alterra, Wageningen: 107.
- PATHAN S.M., AYLMOORE L.A.G., COLMER T.D. 2003. Properties of Several Fly Ash Materials in Relation to Use as Soil Amendments. *Journal of Environmental Quality* 32: 687–693.
- PERSSON G., BROBERG O. 1985. Nutrient concentrations in the acidified Lake Gardsjon: The role of transport and retention of phosphorus, nitrogen and DOC in watershed and lake. *Ecological Bulletin* 37: 158–175.
- PSENNER R. 1984. The proportion of emneuston and total atmospheric inputs of carbon, nitrogen Intern. *Review Hydrobiology* 69: 23–39.
- REYES-RODRÍGUEZ G.J., GIODA A., MAYOL-BRACERO O.L., COLLETT JR J. 2009. Organic carbon, total nitrogen, and water-soluble ions in clouds from a tropical montane cloud forest in Puerto Rico. *Atmospheric Environment* 43, 27: 4171–4177.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 grudnia 2002 r. w sprawie kryteriów wyznaczania wód wrażliwych na zanieczyszczenie związkami azotu ze źródeł rolniczych (Dz. U. 2002. nr 241. roz. 2093).

- SAPEK A., NAWALANY P. 2006. Ładunek składników nawozowych wnoszonych z opadem atmosferycznym na powierzchnię ziemi na przykładzie pól doświadczalnych w Falentach. Woda, Środowisko, Obszary Wiejskie 6 (17 Zeszyt specjalny): 23–27.
- SCHINDLER D.W., NEWBURY R.W., BEATY K.G., CAMPBELL P. 1976. Natural water and chemical budgets for a small precambrian lake basin in Central Canada. *Journal Fishery Researches B*, 33: 2526–2543.
- SHARP J.H. 1983. The distributions of inorganic nitrogen and dissolved and particulate nitrogen in the sea. W: *Nitrogen in the Marine Environment*, Carpenter, E.G. and D.G. Capone (Eds.). Academic Press, New York: 1–35.
- SOBER R.F., BATES M.H. 1979. The atmospheric contribution of phosphorus to an aquatic ecosystem. *Water Air Soil Pollution* 11: 63–69.
- SWANK W.T., HENDERSON G.S. 1976. Atmospheric input of some cations and anions to forest ecosystems in North Carolina and Tennessee. *Water Resources Research* 12: 541–546.
- TAMATAMAH R.A., HECKY R.E., DUTHIE H.C. 2005. The atmospheric deposition of phosphorus in Lake Victoria (East Africa). *Biogeochemistry* 73, 2: 325–344.
- TAYLOR S.R., MCCLENNAN S.M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust, *Rev. Geophys.* 33: 241–265.
- TSUKUDA S., SUGIYAMA M., HARITA Y., NISHIMURA K. 2006. Atmospheric phosphorus deposition in Ashiu, Central Japan – source apportionment for the estimation of true input to a terrestrial ecosystem. *Biogeochemistry* 77: 117–138.
- TWAROSKI C., CZOSCHKE N., ANDERSON T. 2007. Detailed Assessment of Phosphorus Sources to Minnesota Watersheds. Technical Memorandum, Barr Engineering Company, Minneapolis MN: 1–60.
- ZHU R., KONG D., SUN L., GENG J., WANG X., GLINNDERMANN D. 2006. Tropospheric Phosphine and Its Sources in Coastal Antarctica, *Environment Science Technology* 40: 7656–7661.