

KSZTAŁTOWANIE OBIEGU AZOTU W MAKRO- I MIKROSYSTEMACH ROLNICZYCH

Stefan PIETRZAK

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, Zakład Ochrony Jakości Wody

Słowa kluczowe: azot reaktywny, gospodarka żywnościowa, gospodarstwo rolne, obieg azotu, ochrona środowiska

Streszczenie

W ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci znacząco zwiększyła się ilość azotu reaktywnego w środowisku. Nastąpiło to głównie w wyniku zwiększenia zużycia mineralnych nawozów azotowych, produkowanych z wykorzystaniem procesu Habera-Boscha, oraz wykorzystania paliw kopalnych (w celach transportowych i energetycznych). Azot reaktywny – nagromadzając się w środowisku – wywołuje w nim wiele niekorzystnych następstw. W celu zminimalizowania negatywnego wpływu tego składnika na środowisko należy podejmować działania służące ograniczeniu jego strat. W pracy dokonano oceny istniejących w tym zakresie możliwości na podstawie analizy czynników kształtujących obieg azotu w skali makrosystemu rolniczego (obejmującego sektor gospodarki rolno-żywnościowej kraju) oraz w skali gospodarstwa rolnego jako swoistego mikrosystemu rolniczego. Stwierdzono, że na zmniejszenie ilości azotu przenikającego do środowiska w wymiarze makro- można oddziaływać przez zmniejszenie konsumpcji białka zwierzęcego, w tym w szczególności przez ograniczenie spożycia wołowiny oraz zmniejszenie ilości odpadów żywnościowych, a w wymiarze mikro-, tj. gospodarstwa, zwłaszcza przez poprawę zarządzania tym składnikiem.

WSTĘP

Azot występujący w środowisku ziemskim można podzielić na niereaktywny i reaktywny. Azot niereaktywny to azot cząsteczkowy (N_2) – podstawowy składnik powietrza (78,09% objętości). Jest to gaz obojętny i biologicznie niedostępny dla większości organizmów. Azot reaktywny (N_r) obejmuje wszystkie aktywne zwią-

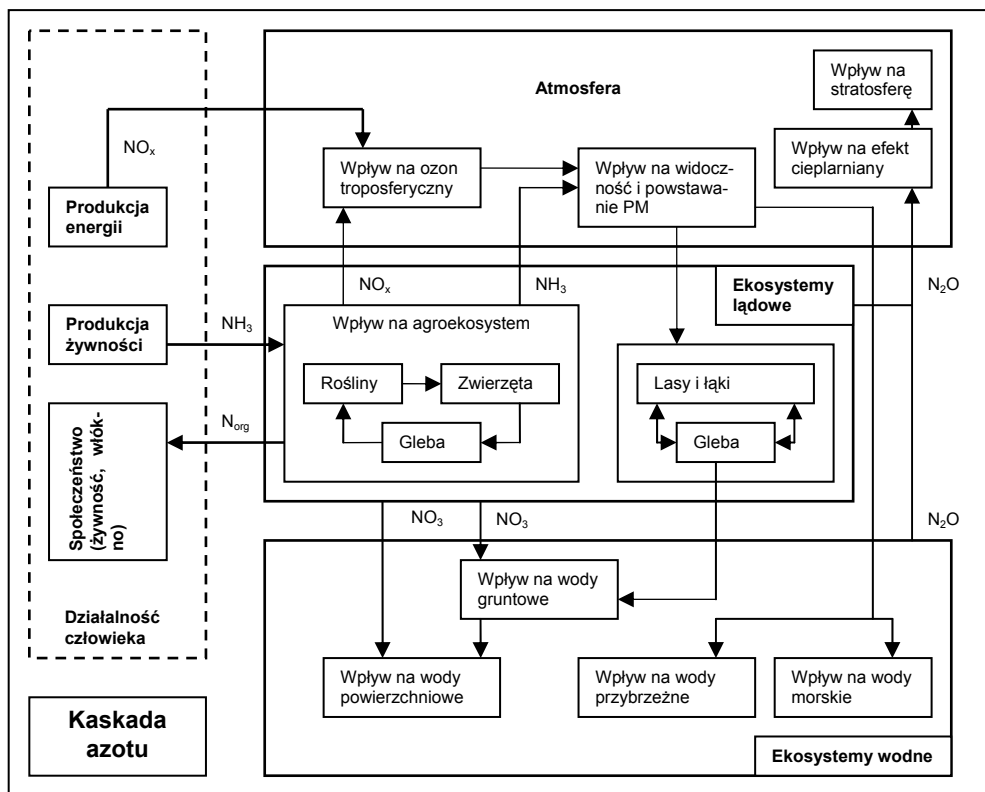
ki azotu w ziemskiej atmosferze i biosferze. Zalicza się do niego zredukowane formy azotu, jak amoniak (NH_3) i jon amonowy (NH_4^+), nieorganiczne utlenione formy azotu, jak tlenki azotu (NO_x), podtlenek azotu (N_2O), kwas azotowy (HNO_3) i azotany (NO_3^-), oraz organiczne związki azotu (np. mocznik, aminy, białka i kwasy nukleinowe) [GALLOWAY i in., 2003].

Azot reaktywny tworzy się z niereaktywnego. W warunkach naturalnych przekształcenie to wywołują wyładowania atmosferyczne oraz proces biologicznego wiązania azotu. W pierwszym przypadku zjawisko przekształcenia wyzwala energia wyładowań atmosferycznych, powodując syntezę tlenu i azotu do tlenku azotu (NO). Związek ten utlenia się do dwutlenku azotu (NO_2), a z niego powstaje kwas azotowy (HNO_3), który w ciągu kilku dni opada na ziemię z deszczem, śniegiem, gradem albo w formie innej depozycji atmosferycznej. W drugim przypadku przekształcanie to (tj. proces biologicznego wiązania azotu) zachodzi z udziałem niektórych wyspecjalizowanych gatunków bakterii i glonów *Cyanophyta Myxophyceae* (ang. „blue-green algae”), z wykorzystaniem dużej ilości energii metabolicznej i enzymu nitrogenazy. W wyniku tego procesu azot atmosferyczny N_2 ulega zamianie na biologicznie użyteczny amoniak – NH_3 .

Antropogenicznymi źródłami pochodzenia azotu reaktywnego jest produkcja nawozów azotowych w wykorzystaniem procesu Habera-Boscha, spalanie paliw kopalnych (węgla i ropy naftowej) oraz rolniczo użytkowane rośliny bobowate. W procesie Habera-Boscha otrzymywany jest amoniak (produkt ten powstaje w wyniku bezpośredniej syntezy wodoru i azotu ($\text{N}_2 + 3\text{H}_2 = 2\text{NH}_3$), prowadzonej w aparatach kontaktowych, w podwyższonej temperaturze – $500\text{--}550^\circ\text{C}$, pod zwiększonym ciśnieniem – $30\text{--}35\text{ MPa}$, w obecności żelaza jako katalizatora). Spalanie węgla i ropy naftowej prowadzi m.in. do powstawania tlenków azotu – NO_x (= $\text{NO} + \text{NO}_2$) w następstwie utlenienia w wysokiej temperaturze azotu atmosferycznego (N_2) i azotu występującego w paliwie.

Unikalną własnością azotu reaktywnego jest zdolność każdego jego atomu do kilkakrotnego, w trakcie obiegu tego składnika, oddziaływania na poszczególne komponenty środowiska. Pojedyncze atomy azotu mogą na przykład zostać wydalone ze spalinami samochodowymi do atmosfery ziemskiej, następnie opaść w kwaśnym deszczu do rzeki, z jej wodami dotrzeć do morza, a z niego z powrotem zostać wyemitowane do atmosfery w wyniku przemian z udziałem bakterii morskich. Tego rodzaju zjawisko nazwano „kaskadą azotu” [GALLOWAY, 1998]. Kaskadę tę określić można z pewnym uogólnieniem jako sekwencyjny przepływ azotu reaktywnego (N_r) przez komponenty środowiska. W trakcie tego procesu dochodzi do serii przemian tego składnika, skutkujących zmianami w środowisku (rys. 1).

Działalność człowieka w okresie ostatnich kilku dziesięcioleci doprowadziła do znacznego zwiększenia zasobów azotu reaktywnego w środowisku. Wpłynęło na to głównie zwiększenie produkcji mineralnych nawozów azotowych z wykorzystaniem procesu Habera-Boscha. Wielkie zapotrzebowanie na ten produkt spowodowało, że ilość amoniaku pozyskiwanego metodą Habera-Boscha do produkcji na-



Rys. 1. Schemat kaskady azotu, ilustrujący skutki, jakie wywołuje pojedynczy atom N w wyniku jego przemiany z formy niereaktywnej do reaktywnej; NH_3 – amoniak; NO_3 – azotany; NO_x – tlenki azotu; N_2O – podtlenek azotu; PM – pyły¹⁾ [GALLOWAY i in., 2003]

wozów azotowych przekracza obecnie ilość tego związku wytwarzanego w procesie biologicznego wiązania azotu [Human... za: Smil, 2001]. Poza tym do zwiększenia zasobów azotu reaktywnego w środowisku w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat w istotny sposób przyczyniło się zwiększenie zużycia paliw kopalnych (w transporcie i do produkcji energii).

Nagromadzenie się azotu reaktywnego w środowisku wywołuje w nim niepożądane następstwa, takie jak:

- zakwaszanie i eutrofizacja ekosystemów lądowych i wodnych;
- zmniejszenie bioróżnorodności w naturalnych siedliskach;
- zwiększenie podatności drzew na czynniki stresowe;

¹⁾ Pyły (ang. „particulate matter” – PM) to mieszanina stałych i płynnych cząstek zawieszonych w powietrzu. Pyły w atmosferze składają się z ich frakcji emitowanych bezpośrednio ze źródeł emisji oraz frakcji formowanych w atmosferze z gazowych prekursorów, takich jak: SO_2 , NO_x , LZO (lotne związki organiczne) oraz NH_3 . Gazy te są transformowane w atmosferze do pyłów w wyniku reakcji chemicznych, procesów krystalizacji i kondensacji.

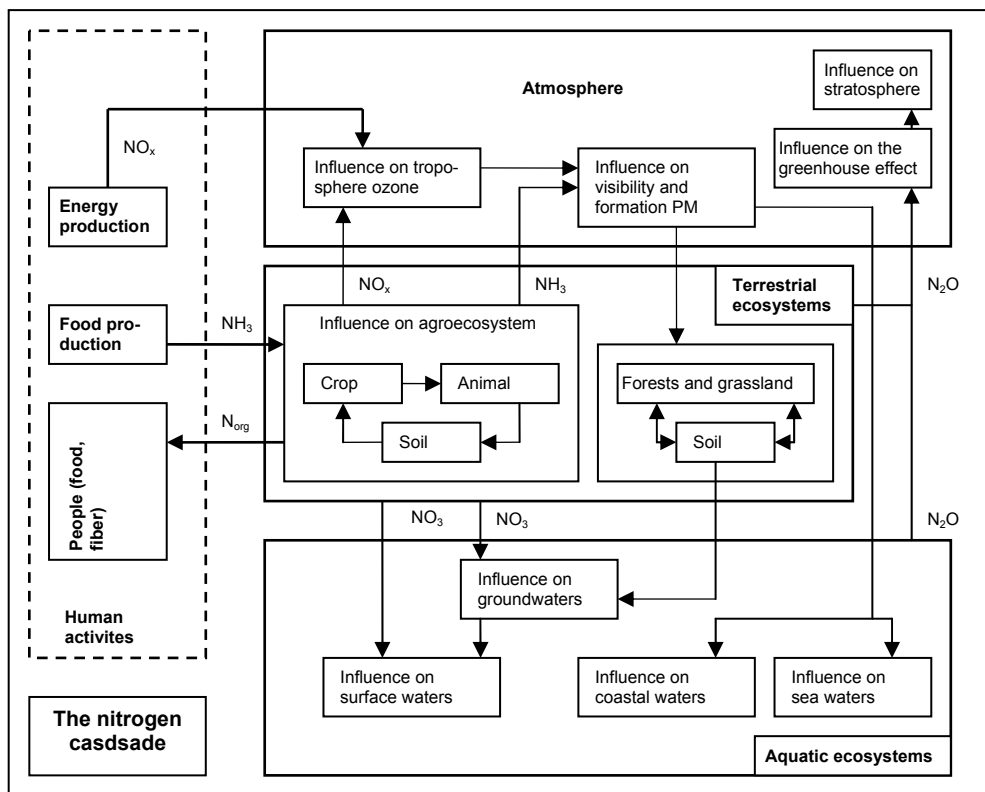


Fig. 1. A scheme of nitrogen cascade illustrating the consequences of transformation of a single N atom from non-reactive to reactive form. NH₃ – ammonia, NO₃ – nitrates, NO_x – nitrogen oxides, N₂O – dinitrogen oxide, PM – dust [GALLOWAY *et al.*, 2003]

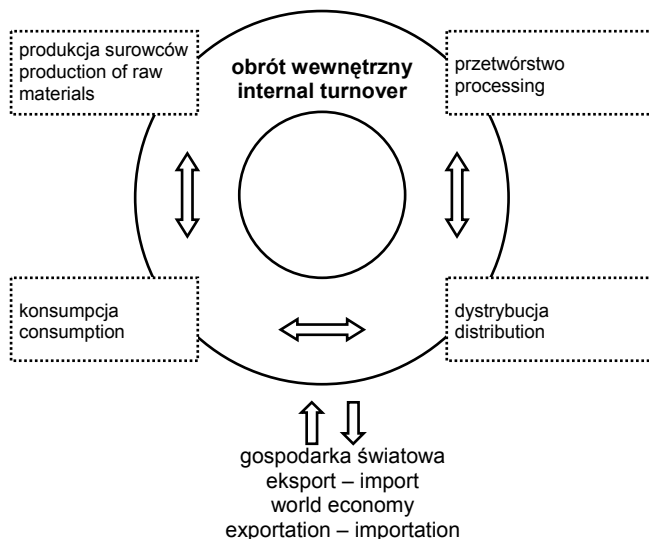
- wzmocnienie efektu globalnego ocieplenia i powstawania dziury ozonowej (z powodu emisji N₂O) w stratosferze, co ma szkodliwy wpływ na zdrowie ludzi i ekosystemy;
- zanieczyszczenie wody gruntowej i pitnej (z powodu wymywania NO₃ z gleb);
- zwiększenie ilości ozonu troposferycznego (którego NO_x jest prekursorem) i aerozoli, które wywołują nowotwory i poważne choroby układu oddechowego i sercowo-naczyniowego u ludzi.

Konsekwencje oddziaływania azotu reaktywnego na środowisko są odczuwalne w skali lokalnej (miejscowej), regionalnej i globalnej. Żeby skutecznie ograniczyć jego negatywny wpływ na środowisko, trzeba zatem podejmować działania zarówno w makro-, jak i mikroskali z uwzględnieniem różnych form tego pierwiastka i różnych komponentów środowiska (atmosfera, woda, ląd), na które on oddziałuje. Z uwagi na rozmiary i zasięg zanieczyszczenia środowiska azotem reaktywnym do zwalczania zagrożeń z tym związanych potrzebna jest współpraca międzynarodowa.

Celem pracy jest analiza wpływu różnych czynników na obieg azotu w skali makrosystemu rolniczego (obejmującego sektor gospodarki rolno-żywnościowej kraju) oraz w skali gospodarstwa rolnego jako swoistego mikrosystemu rolniczego, w aspekcie ograniczenia negatywnych skutków oddziaływania tego składnika na środowisko.

CZYNNIKI KSZTAŁTUJĄCE OBIEG AZOTU W MAKROSYSTEMACH ROLNICZYCH

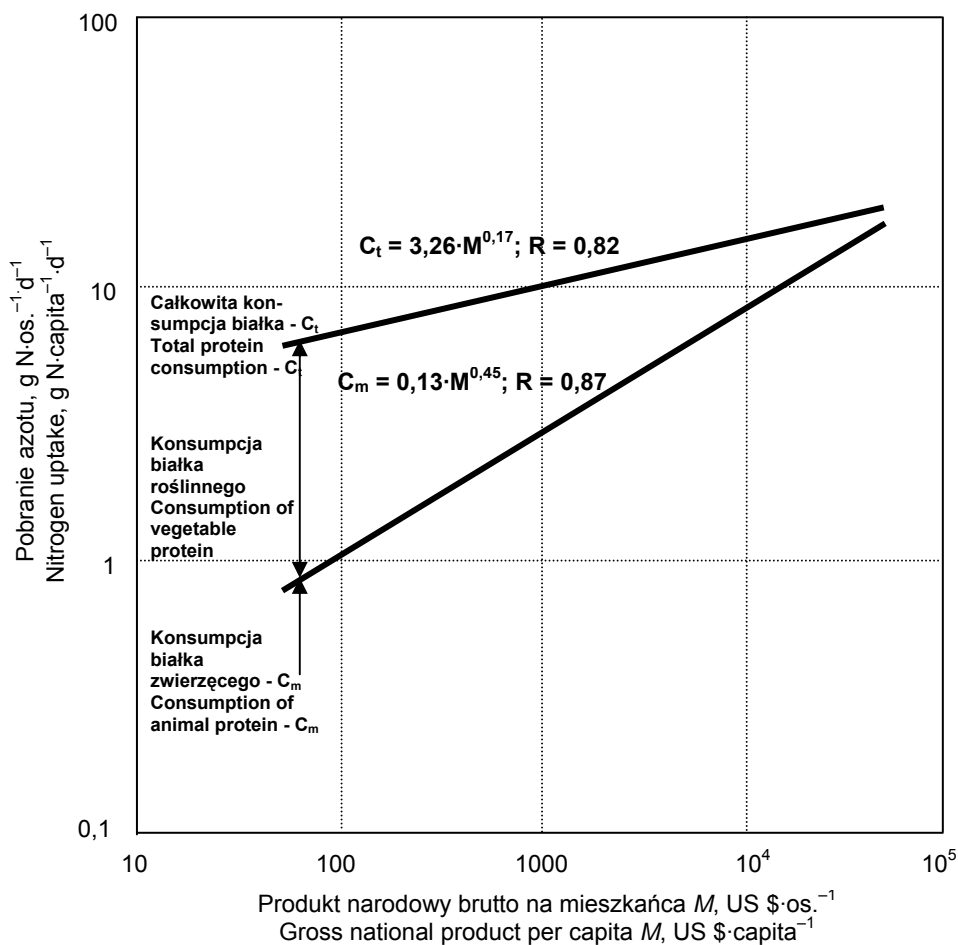
Gospodarka żywnościowa to całość zasobów i działalności prowadzonej w sferze produkcji żywności, podziału, obrotu i jej konsumpcji w danym kraju (rys. 2), a jej celem jest zaspokojenie potrzeb społeczeństwa w zakresie wyżywienia.



Rys. 2. Łańcuch gospodarki żywnościowej [REJMAN, HALICKA, 2001]

Fig. 2. A chain of food industry [REJMAN, HALICKA, 2001]

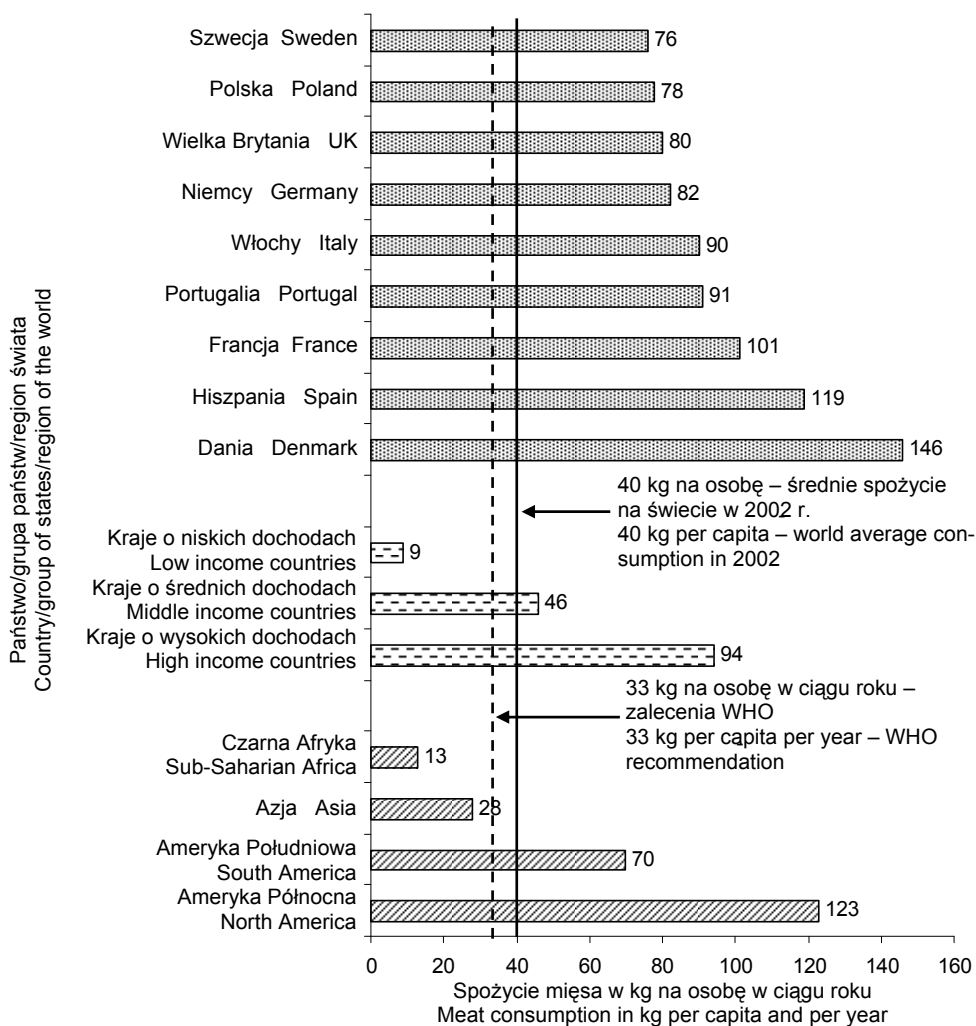
Kluczową pozycję w tym systemie odgrywa konsument. To jego upodobania (wybory) kulinarne i potrzeby żywieniowe, sposób postępowania z produktami spożywczymi oraz możliwości płatnicze kształtują popyt na określone asortymenty produktów rolnych. Podstawową rolę w tym zakresie odgrywa czynnik ekonomiczny. Na podstawie badań obejmujących 54 kraje KAWASHIMA, BAZIN i LYNCH [1997] stwierdzili, że wraz wielkością produktu narodowego brutto przypadającego na mieszkańca zwiększa się całkowita konsumpcja białka, w tym przede wszystkim białka zwierzęcego (rys. 3).



Rys. 3. Zależność między całkowitą konsumpcją białka oraz białka zwierzęcego a statusem ekonomicznym społeczeństwa wyrażanym jako wielkość produktu narodowego brutto na osobę w US \$ (zmodyfikowane na podstawie: KAWASHIMA, BAZIN, LYNCH [1997])

Fig. 3. The relationship between total protein and animal protein consumption and the economic status of a society expressed as per capita gross national product in US\$ (modified after KAWASHIMA, BAZIN, LYNCH [1997])

W diecie bogatych społeczeństw przeważa więc białko zwierzęce. W 2002 r. spożycie mięsa w krajach w Europie i Ameryki Północnej, o wysokich dochodach mieszkańców, przekraczało 100 kg na osobę, podczas gdy w krajach położonych na południe od Sahary wynosiło zaledwie 13 kg na osobę (rys. 4).



Rys. 4. Spożycie mięsa w 2002 r. w wybranych krajach Unii Europejskiej, w grupach państw o różnym poziomie dochodów oraz w różnych częściach świata, kg-os.⁻¹; Azja – z wyłączeniem Azji Środkowo-Wschodniej; WHO – Światowa Organizacja Zdrowia (SUTTON [2008] za: World Resources Institute)

Fig. 4. Meat consumption in 2002 in selected EU member countries, in groups of countries of different incomes and in various regions of the world, in kg/capita; Asia – with the exception of Mid-eastern Asia, WHO – World Health Organisation (SUTTON [2008] after: World Resources Institute)

Sposób odżywiania ma duży wpływ na podaż azotu reaktywnego z rolnictwa do środowiska. Związane jest to z różną „azotochłonnością” produkcji różnych artykułów spożywczych. W tym zakresie, w warunkach norweskich, żeby wyprodukować artykuł żywnościowy, zawierający 1 kg N (ok. 6,25 kg białka), trzeba

wprowadzić (w nawozach mineralnych i naturalnych, w wyniku wiązania biologicznego i z opadami atmosferycznymi) do produkcji pierwotnej, tj. roślinnej: w przypadku artykułów roślinnych (mącznych) – 3 kg N, artykułów mlecznych – 14 kg N, mięsa (włączając produkty uboczne, tylko chude tkanki) – 21 kg N [BLEKEN, BAKKEN, 1997]. Jak łatwo dostrzec, w wyrobach roślinnych trafia do konsumenta 1/3 azotu dostarczonego na początku linii ich wytwarzania, natomiast w wyrobach mięsnych tylko niecałe 5%. W odniesieniu do wyrobów z mięsa aż 95% azotu stanowiącego surowiec do ich produkcji staje się zatem odpadem (tylko część z niego z powrotem udaje się odzyskać i wprowadzić do obiegu rolniczego, większość ulega rozproszeniu w środowisku).

Należy zaznaczyć, że ilość rozpraszanego do środowiska azotu w trakcie produkcji różnych asortymentów mięsa jest odmienna. Najmniej korzystna w tym zakresie jest produkcja wołowiny. Charakteryzuje się ona dużym zużyciem pasz (prawie 32 kg paszy na kg wagi konsumpcyjnej), a przy tym bardzo małym, wynoszącym 5%, współczynnikiem zamiany białka paszowego na białko zwierzęce (tab. 1). Zdecydowanie lepsze jest wykorzystanie białka paszowego w produkcji mięsa drobiowego, w której 25% białka paszowego ulega konwersji na białko w mięsie.

Tabela 1. Zawartość białka w podstawowych produktach zwierzęcych i efektywność konwersji białka roślinnego na białko zwierzęce w ich produkcji¹⁾ [SMIL, 2002]

Table 1. The content of protein in basic animal products and the efficiency of plant to animal protein conversion in their production¹⁾ [SMIL, 2002]

Parametr Parameter	Mleko Milk	Karp Carp	Jajka Eggs	Drób Poultry	Wieprzowina Pork	Wołowina Beef
Zużycie paszy, kg·kg ⁻¹ produktu zwierzęcego lub wagi żywej Fodder use, kg kg ⁻¹ of animal product or live weight	0,7	1,5	3,8	2,3	5,9	12,7
Zużycie paszy, kg·kg ⁻¹ wagi konsumpcyjnej Fodder use, kg kg ⁻¹ of consumption weight	0,7	2,3	4,2	4,2	10,7	31,7
Zawartość białka, % wagi konsumpcyjnej Protein content, % of consumption weight	3,5	18	13	20	14	15
Efektywność konwersji białka roślinnego na zwierzęce, % The efficiency of plant to animal protein conversion, %	40	30	30	25	13	5

¹⁾ Obliczenia efektywności konwersji białka roślinnego na zwierzęce oparto na normach żywieniowych USA pochodzących z 1999 r.

¹⁾ Calculations of the efficiency of protein conversion were based on US nutritive standards from 1999.

Jeszcze lepsza relacja w tym względzie występuje w produkcji karpia. Najbardziej korzystnie w procesie wytwarzania wyrobów zwierzęcych kształtuje się efektywność wykorzystania białka roślinnego w produkcji mleka – 40%.

Produkcja wołowiny związana jest ponadto z dużym zużyciem wody, co dodatkowo obciąża środowisko. Do wyprodukowania 1 kg mięsa wołowego potrzeba aż 15,5 m³ wody, co znacznie przekracza zużycie wody niezbędne do produkcji podobnej masy innych artykułów spożywczych pochodzenia rolniczego (tab. 2).

Tabela 2. Zużycie wody w procesie wytwarzania różnych produktów pochodzenia rolniczego [PACHAURI, 2008]

Table 2. Water consumption in the production of various agricultural products [PACHAURI, 2008]

Rodzaj produktu Product	Ilość wody potrzebnej do wyprodukowania 1 kg produktu, dm ³ The amount of water needed to produce 1 kg of product, dm ³
Kukurydza Maize	900
Ryż Rice	3 000
Drób (kurczęta) Poultry (chicken)	3 900
Wieprzowina Pork	4 900
Wołowina Beef	15 500

Z przeprowadzonej analizy wynika, że poprzez sam wybór rodzaju diety konsumenci w zasadniczy sposób warunkują ilość azotu wprowadzanego do obiegu rolniczego i jego straty. Również swoją postawą i zachowaniami dotyczącymi sposobu wykorzystania żywności wpływają oni na wielkość strat tego składnika z rolnictwa. Nie dopuszczając do powstawania nieuzasadnionych odpadów żywności, jej nabywcy pośrednio zmniejszają ilość azotu wprowadzanego do produkcji rolnej i jego straty do środowiska. Problem marnotrawienia żywności w wielu krajach, zwłaszcza zamożnych, występuje na dużą skalę. Jak obliczył SMIL [2002], przeciętna wartość kaloryczna żywności dostarczanej codziennie konsumentom przez zasobne kraje Europy, Ameryki Północnej i Oceanii wynosi w przeliczeniu na osobę ok. 3200 kcal, a w Stanach Zjednoczonych przekracza nawet 3600 kcal. Wartość kaloryczna spożywanych artykułów w tych krajach wynosi natomiast średnio 2000 kcal na dzień. W konsekwencji marnowane jest w nich między 25 a 55% (przeciętnie ok. 30%) całej dostępnej żywności²⁾. Wymieniony wyżej autor określił tę sytuację jako niemoralną. W kontekście powyższego jakże wymownie brzmią słowa poety Cypriana Norwida (1821–1883), wyrażające tradycyjny polski stosunek do płodów ziemi: „Do kraju tego, gdzie kruszynę chleba / Podnoszą z ziemi przez uszanowanie Dla darów Nieba... Tęskno mi, Panie...”. Niewątpliwie byłoby

²⁾ Mieszkańcy Wielkiej Brytanii wyrzucają co roku na śmietnik produkty spożywcze warte 10 mld funtów. Przeciętnie każdego dnia wyrzucają m.in. 220 tys. bochenków chleba, przeszło 5 mln szt. ziemniaków, ponad 1 mln szt. kiełbasek, tyleż jogurtów i ponad 600 tys. jajek [Puls Biznesu z 13.05.2008 za The Independent].

bardzo pożądane, żeby nakreślona w podanych słowach postawa wobec żywności dominowała we współczesnym społeczeństwie.

CZYNNIKI KSZTAŁTUJĄCE OBIEG AZOTU W MIKROSYSTEMACH ROLNICZYCH

Obieg azotu w mikrosystemie rolniczym, którego reprezentantem jest gospodarstwo rolne, jest kształtowany przez zespół różnorodnych czynników działających w sposób jednoczesny i wzajemnie uwikłany. W celu zidentyfikowania i oceny tych czynników wykorzystuje się metody statystyczne. W tym zakresie stosuje się m.in. metodę korelacji i regresji wielokrotnej do określenia zależności między nadmiarem N, który jest podstawową miarą oceny sprawności obiegu tego składnika, a wybranymi do analizy zmiennymi (czynnikami). W ramach dotychczasowych prac z tym związanych stwierdzono, że istnieje wiele czynników, mających istotny statystycznie wpływ na nadmiar N, generowany w gospodarstwie rolnym (tab. 3).

Podstawową grupę stanowią czynniki, które decydują o wielkości strumienia azotu wprowadzanego do gospodarstwa rolnego. W jej skład wchodzi nośniki azotu, pochodzące z zakupu, takie jak: mineralne nawozy azotowe, nawozy naturalne, pasze, zwierzęta do chowu, a poza tym areał uprawy roślin motylkowatych (źródło biologicznie wiązane N). Najważniejsze znaczenie w tej grupie ze względu na nadmiar N mają sprowadzane z zewnątrz do gospodarstwa mineralne nawozy azotowe oraz pasze treściwe. W przypadku gospodarstw ukierunkowanych na produkcję zwierzęcą wraz z nimi wnosi się ok. 80%, a bywa, że i ponad 95% całkowitej ilości azotu trafiającego do tych gospodarstw ze źródeł zewnętrznych (w gospodarstwach zajmujących się wyłącznie lub głównie produkcją trzody chlewnej ilość azotu wnoszona w paszach przekracza ilość tego składnika wnoszoną w nawozach mineralnych) – tabela 4. Azot dostarczany do produkcji rolnej z wymienionych źródeł silnie oddziałuje na wielkość nadmiaru tego składnika. Oszacowano, że wprowadzenie do gospodarstwa z nawozami mineralnymi od 1,11 do 1,13 kg N·ha⁻¹ lub z paszami treściwymi od 0,78 kg do 1,06 kg N·ha⁻¹ może spowodować zwiększenie w nim nadwyżki azotu o 1 kg N·ha⁻¹ [PIETRZAK, 2002].

Inną grupą czynników, mającą istotny statystycznie wpływ na nadmiar N w gospodarstwie, stanowią czynniki związane ze strukturą i organizacją produkcji rolnej. Zaliczyć do nich można m.in. udział powierzchni użytków zielonych w powierzchni gospodarstwa, udział powierzchni gruntów ornych w powierzchni gospodarstwa, obsadę zwierząt i długość okresu wypasu zwierząt. Wielu różnych autorów, w tym Dalgaard i in. [2002] przywołani przez KJELDSENA, DALGAARDA i BØCHERA [2006], stwierdziło, że nadmiar azotu w gospodarstwie rośnie wraz ze zwiększaniem w nich obsady zwierząt (rys. 5). Wykazano też, że nadmiar ten zwiększa się wraz ze zwiększeniem udziału użytków zielonych w powierzchni gospodarstwa [PIETRZAK, 2002; VERBRUGGEN, CARLIER, VAN BOCKSTAELE, 1994].

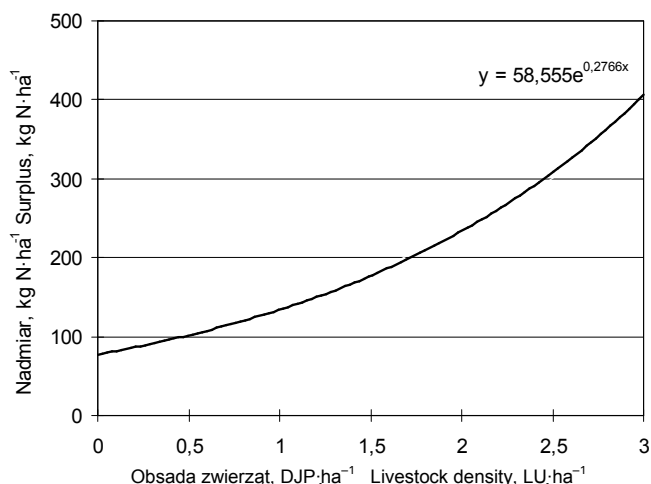
Tabela 3. Równania regresji wielokrotnej opisujące zależność nadmiaru azotu od różnych czynników w gospodarstwie rolnym**Table 3.** Equation of the multiple regression of nitrogen surplus on various factors in a farm

Postać równania regresji wielokrotnej Equation	Źródło Source
Nadmiar N (kg N·ha ⁻¹) = -55,59 + 0,648·(dawka N w nawozach mineralnych na użytki zielone, kg N·ha ⁻¹) + 0,04317·(ilość zakupionych suchych koncentratów, kg·krowa ⁻¹) + 0,12469·(ilość zakupionych płynnych koncentratów, kg·krowa ⁻¹) + 1,097·(udział użytków zielonych w powierzchni gospodarstwa, %) + 0,919·(ilość zakupionych nawozów naturalnych, kg N·ha ⁻¹); R ² = 0,85; n = 48	VERBRUGGEN, CARLIER, VAN BOCKSTAELE [1994]
N surplus (kg N·ha ⁻¹) = -55.59 + 0.648 (N dose in mineral fertilisers applied on grasslands, kg N·ha ⁻¹) + 0.04317 (the amount of purchased dry concentrated fodder, kg·cow ⁻¹) + 0.12469 (the amount of purchased liquid concentrated fodder, kg·cow ⁻¹) + 1.097 (percent of grasslands in farm area) + 0.919 (the amount of purchased natural fertilisers, kg N·ha ⁻¹); R ² = 0,85; n = 48	
Nadmiar N (kg N·ha ⁻¹) = -1,952 + 0,35·(udział użytków zielonych w powierzchni użytków rolnych, w %) - 3,169·(obsada zwierząt, DJP·ha ⁻¹) - 3,012·(wykształcenie rolników ^a) + 0,904·(ilość azotu wniesiona z zakupionymi nawozami, kg N·ha ⁻¹) + 0,948·(ilość azotu wniesiona z zakupionymi paszami treściwymi, kg N·ha ⁻¹) + 1,068·(ilość azotu wniesiona z zakupionymi zwierzętami hodowlanymi, kg N·ha ⁻¹); R ² = 0,917; n = 230	PIETRZAK [2002]
N surplus (kg N·ha ⁻¹) = -1.952 + 0.35 (percentage share of grasslands in croplands) - 3.196 (animal stock, LU·ha ⁻¹) - 3.012 (farmers' education ^a) + 0.904 (N input with purchased fertilisers, kg N·ha ⁻¹) + 0.948 (N input with purchased concentrated fodder, kg N·ha ⁻¹) + 1.068 (N input with purchased farm animals, kg N·ha ⁻¹); R ² = 0,917; n = 230	
Nadmiar N ^b) (kg N·ha ⁻¹) = 18 + 0,184·(udział powierzchni gruntów ornych w powierzchni gospodarstwa, %) - 0,193·(liczba dni wypasu zwierząt) + 84,713·(obsada zwierząt, DJP·ha ⁻¹); R ² = 0,80; n = 36	GIUSTINI, ACCIAIOLI, ARGENTI [2007]
N surplus ^b) (kg N·ha ⁻¹) = 18 + 0.184 (percent of arable lands in farm area) - 0.193 (number of days of animal grazing) + 84.713 (animal stock, LU·ha ⁻¹); R ² = 0,80; n = 36	
Nadmiar N ^c) (kg N·ha ⁻¹) = -7,608 + 0,945·(dawka mineralnych nawozów azotowych, kg N·ha ⁻¹) + 0,746·(ilość N w paszy z zakupu, kg N·ha ⁻¹) + 0,962·(ilość N biologicznie związanego, kg N·ha ⁻¹); R ² = 0,98; n = 36	GIUSTINI, ACCIAIOLI, ARGENTI [2007]
N surplus ^c) (kg N·ha ⁻¹) = -7.608 + 0.945 (the dose of mineral N fertilisers, kg N·ha ⁻¹) + 0.746 (N in purchased fodder, kg N·ha ⁻¹) + 0.962 (biologically fixed N, kg N·ha ⁻¹); R ² = 0,98; n = 36	

^a) Wykształcenie rolników – przyjęto skalę: 1 – podstawowe; 2 – zasadnicze; 3 – średnie; 4 – wyższe.^b) W zależności od charakterystyki gospodarstwa.^c) W zależności od wnoszonych składników.^a) Farmers' education: 1 – primary, 2 – vocational, 3 – secondary, 4 – higher.^b) Depending on farm characteristics.^c) Depending on input components.

Tabela 4. Udział różnych źródeł w całkowitym przychodzie azotu w pięciu przykładowych gospodarstwach (na podstawie: PIETRZAK [2009])
Table 4. The contribution of various sources to the total N input in five farms (based on PIETRZAK [2009])

Źródła przychodu azotu w gospodarstwie Sources of N input	Udział źródła w całkowitym przychodzie azotu (%) w zależności od profilu produkcji gospodarstwa Percent contribution to the total N input depending on productive profile of a farm				
	produkcja mleczna dairy production	produkcja mleczna + produkcja roślinna dairy and plant production	trzoda chlewna + produkcja roślinna pigs and plant production	głównie trzoda chlewna mainly pigs	wyłącznie trzoda chlewna exclusively pigs
Nawozy mineralne Mineral fertilisers	72,7	72,1	60,8	35,9	9,1
Pasze treściwe Concentrated fodder	8,6	6,1	20,9	55,1	86,3
Zwierzęta (materiał hodowlany) Animals	0,0	0,2	0,2	0,4	0,2
Rośliny motylkowate w uprawie polowej Legumes in field crops	1,5	3,2	–	–	–
Mikroorganizmy wolnożyjące Free living microorganisms	6,7	8,1	5,9	2,9	1,3
Opad atmosferyczny Atmospheric precipitation	7,1	8,6	10,7	5,2	2,4
Inne (materiał siewny, pasze objętościowe, słoma) Other (seeds, bulk fodder, straw)	3,2	1,6	1,4	0,5	0,5



Rys. 5. Nadmiar azotu w zależności od obsady zwierząt w 41 duńskich gospodarstwach rolnych (adaptowane na podstawie: KJELDEN, DALGAARD, BØCHER [2006] za: Dalgaard i in. [2002])

Fig. 5. N surplus in relation to animal stock in 41 Danish farms (modified from KJELDEN, DALGAARD, BØCHER [2006] after: Dalgaard *et al.* [2002])

Dowiedziano, że – poza wymienionymi grupami czynników – istnieje również istotny statystycznie wpływ wykształcenia rolników na wielkość nadmiaru azotu generowanego w ich gospodarstwach. Wraz ze wzrostem poziomu wykształcenia zwiększa się wiedza rolnika, a ta przekłada się na jakość zarządzania składnikami nawozowymi w gospodarstwie rolnym. Dzięki dobremu zarządzaniu azotem następuje poprawa efektywności jego wykorzystania w produkcji rolnej, co jest ewidentnie korzystne zarówno ze względu na ochronę środowiska, jak i ze względów gospodarczych. W praktyce rolniczej wykorzystanie tego składnika nie jest duże. Na przykład w przeciętnych gospodarstwach rolnych specjalizujących się w produkcji mleka na Podlasiu wynosi ono zaledwie 18,5%, podczas gdy wielkość nadwyżki – 131,3 kg N·ha⁻¹. Jeśliby w tych gospodarstwach zwiększyć wykorzystanie N do wartości, którą JARVIS i AARTS [2000] uważają za technicznie osiągalną, tj. do 36%, to zmniejszyłby się nadmiar azotu o 77,8 kg N·ha⁻¹ [PIETRZAK, 2008] i tym samym znacznie zmniejszyłoby się jego negatywne oddziaływanie na jakość wody i innych komponentów środowiska. Zmalałyby zarazem w tych gospodarstwach potrzeby w zakresie zakupu nawozów i pasz w ilościach ekwiwalentnych do tych wskaźników.

Jak wynika z powyższego, na poziomie gospodarstwa rolnego (mikrosystemu rolniczego) występują czynniki o zróżnicowanym charakterze (zaprezentowaną listę niewątpliwie można byłoby jeszcze rozszerzyć), które wpływają na wielkość wytwarzanej nadwyżki azotu. Znajomość tych czynników ułatwia podejmowanie działań służących ograniczeniu dyspersji azotu z produkcji rolnej.

PODSUMOWANIE

Między 1890 a 1990 r. globalne zasoby azotu reaktywnego powiększyły się prawie o 50%. W tym okresie emisja gazowych form azotu do atmosfery zwiększyła się o 250%, a ich depozycja do morskich i lądowych ekosystemów – ponad 200%. Jednocześnie czterokrotnie zwiększyła się ilość rozpuszczalnego azotu nieorganicznego w odpływie rzeczonym do wybrzeży morskich [GALLOWAY, COWLING, 2002]. Zmiany w naturalnym obiegu azotu i jego nagromadzenie się w środowisku wywarły niekorzystny wpływ na zdrowie ludzi oraz funkcjonowanie ekosystemów, czego pierwsze symptomy naukowcy zaczęli dostrzegać w latach 70. ubiegłego wieku. Wraz z postępami w rozpoznaniu problemu zaczęto wprowadzać środki zaradcze, mające przeciwdziałać nagromadzeniu się azotu reaktywnego w środowisku. W rolnictwie wysiłki w tym zakresie są prowadzone przede wszystkim na poziomie gospodarstwa rolnego, jednak ich skuteczność jest ograniczona. Trzeba sobie bowiem uświadomić, że „ujarzmienie” azotu reaktywnego jest przedsięwzięciem niezwykle trudnym. Składają się na to m.in.:

- łatwość azotu reaktywnego do rozległego przestrzennie przemieszczania się (drogą powietrzną i wodną);
- przewaga szybkości procesów tworzenia się azotu reaktywnego nad tempem jego przemiany do formy niereaktywnej (N_2) w procesie denitryfikacji, co prowadzi do zwiększania się zasobów N_r w środowisku naturalnym;
- postępujący proces zwiększania się ilości azotu reaktywnego wprowadzanego do obiegu ze względu na wzrost liczby ludności i zwiększające się zapotrzebowanie na żywność.

W związku z powyższym należy się spodziewać dalszego nagromadzenia się azotu reaktywnego w środowisku, jak też zwiększenia się związanych z tym zagrożeń. Sytuacja ta wymagać będzie zintensyfikowania i rozszerzenia działań ograniczających dyspersję azotu z sektora rolno-spożywczego. W tym zakresie niezbędny będzie udział nie tylko, jak dotychczas rolników, ale i całego społeczeństwa – konsumentów. W istocie bowiem za nadwyżki azotu generowane w związku z wytwarzaniem żywności odpowiadają wszyscy konsumenci, jako że są one uwarunkowane ludzką dietą.

Konsument może wpływać na zmniejszenie ładunku azotu wprowadzanego z rolnictwa do środowiska poprzez:

- ograniczenie ilości białka zwierzęcego w diecie;
- wybór mniej „azotochłonnego” asortymentu białka zwierzęcego w przypadku preferowania tego rodzaju białka (np. zamiast wołowego – wieprzowe lub drobiowe);
- ograniczenie ilości odpadów żywnościowych.

Możliwości w tym zakresie są bardzo duże. Zdaniem SMILA [1997] „Jeżeli nawet w Ameryce Północnej i Europie konsumpcja białka zwierzęcego zmniejszy-

łaby się średnio o połowę (dzięki skłonieniu ludzi do spożywania mniejszych ilości mięsa), to i tak wyżywienie będzie na wystarczającym poziomie”.

Wskazując na potrzebę i możliwości minimalizowania ilości azotu trafiającego z systemu gospodarki rolno-żywnościowej do środowiska (w makroskali), należy stwierdzić zarazem, że niezbędne jest dalsze pogłębianie działań ukierunkowanych na zmniejszenie nadmiaru oraz poprawę efektywności wykorzystania tego składnika bezpośrednio w produkcji rolnej. Należy do tego dążyć, zwłaszcza poprzez poprawę jakości zarządzania azotem, które w praktyce odbywa się przez wybór i realizację konkretnych praktyk produkcyjnych. Przyjmując właściwe rozwiązania w tym względzie, rolnik może świadomie sterować przepływem azotu i innych składników nawozowych w gospodarstwie, tak aby straty tych składników były jak najmniejsze.

Rozważając problem ograniczenia dyspersji azotu z rolnictwa do środowiska, trzeba mieć na uwadze, że bardzo ważną rolę w tym zakresie ma do spełnienia odpowiednio ukierunkowana edukacja. Wiedza dotycząca negatywnych skutków oddziaływania azotu na środowisko, jak też metod zmniejszenia tego oddziaływania, powinna być udostępniana w szerokim wymiarze i stosownej formie rolnikom oraz ogółowi społeczeństwa. Zadanie to powinno być podejmowane w coraz większym stopniu przez placówki naukowe, oświatowe oraz media.

LITERATURA

- BLEKEN M.A., BAKKEN L.R., 1997. The nitrogen cost of food production. *Ambio* vol. 26 no. 3 s. 134–142.
- GALLOWAY J.N., 1998. The global nitrogen cycle: Changes and consequences. *Env. Pollut.* vol. 102 Iss. 1 Suppl. 1 s. 15–24.
- GALLOWAY J.N., COWLING E.B., 2002. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio* vol. 31 s. 64–71.
- GALLOWAY J.N., ABER J.D., ERISMAN J. W., SEITZINGER S.P., HOWARTH R. W., COWLING E.B., COMBY B.J., 2003. The nitrogen cascade. *BioSci.* vol. 53 no. 4 s. 341–356.
- GIUSTINI L., ACCIAIOLI A., ARGENTI G., 2007. Apparent balance of nitrogen and phosphorus in dairy farms in Mugello (Italy). *Ital. J. Anim. Sci.* vol. 6 s. 175–185.
- Human impacts on the nitrogen cycle: <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Human+impacts+on+the+nitrogen+cycle>
- JARVIS S.C., AARTS H.F.M., 2000. Nutrient management from a farming systems perspective. W: *Grassland farming: Balancing environmental and economic demands. Proc. 18th Gen. Meet. EGF.* Pr. zbior. Red. K. Søgaard, C. Ohlsson, J. Sehested, N.J. Hutchings, T. Kristensen. Aalborg, Denmark, 22–25 May 2000 s. 363–373.
- KAWASHIMA H., BAZIN M.J., LYNCH J.M., 1997. A modelling study of world protein supply and nitrogen fertilizer demand in the 21st century. *Env. Conserv.* 24 (1) s. 50–57.
- KJELDSEN C., DALGAARD T., BØCHER P. K., 2006. A GIS-based Framework to model farm and landscape scale indicators for sustainable rural development. W: *Summit on environmental modelling and software.* Pr. zbior. Red. A. Voinov, A.J. Jakeman, A.E. Rizzoli. Proc. iEMSs 3rd Biennial Meet. Intern. Env. Modell. Burlington, USA: Software Soc.

- PIETRZAK S., 2002. Ocena potencjalnych strat azotu na podstawie bilansu w gospodarstwach rolnych o zróżnicowanym udziale użytków zielonych. Woda Środ. Obsz. Wiej. Rozpr. nauk. monogr. nr 2 ss. 58.
- PIETRZAK S., 2008. Efektywność wykorzystania azotu i fosforu w gospodarstwach ukierunkowanych na produkcję mleka oraz analiza możliwości jej maksymalizacji za pomocą modelu matematycznego. Probl. Inż. Rol. 1(59) s. 133–142.
- PIETRZAK S., 2009. Straty azotu i fosforu z gospodarstw rolnych. W: Udział rolnictwa w emisji związków azotu i fosforu z obszaru Polski do Bałtyku. Puławy: IUNG-PIB (w druku).
- PACHAURI R.K., 2008. Less meat, less heat: Impacts of livestock on climate change: <http://www.vegetarisme.be/download/pub/pachauripers/Rachendra%20Pachauri%20-%20less%20meat%20less%20heat.ppt>
- REJMAN K., HALICKA E., 2001. Gospodarka żywnościowa. Przewodnik do ćwiczeń. Warszawa: Wydaw. SGGW ss. 124.
- SMIL V., 1997. Ludzkość a obieg azotu. Świat Nauki wrzesień s. 62–67.
- SMIL V., 2002. Nitrogen and food production: proteins for human diets. Ambio vol. 31 no. 2 s. 126–131.
- SUTTON M., 2008. Eat less meat! Acid News no. 4 s. 22–23.
- VERBRUGGEN I., CARLIER L., VAN BOCKSTAELE E., 1994. Surplus of nutrients on dairy farms in Belgium. W: Grassland and society. Proc. 15th Gen. Meet. EGF s. 463–465.

Stefan PIETRZAK

NITROGEN CYCLING IN AGRICULTURAL MACRO- AND MICROSYSTEMS

Key words: environmental protection, farm, food industry, nitrogen cycling, reactive nitrogen

S u m m a r y

The amount of reactive nitrogen in the environment has markedly increased in the recent decades. This is due to increased consumption of mineral nitrogen fertilisers produced in the Haber-Bosch process and to exploitation of fossil fuels for transport and energy. The reactive nitrogen coupling in the environment produces many unfavourable consequences. To minimise the negative environmental impact of this element one should undertake actions to limit its losses. Possibilities of such actions were evaluated in this paper based on the analysis of the factors affecting nitrogen cycling in agricultural macrosystem (food and agriculture sector of the national economy) and in the scale of a farm as a specific agricultural microsystem. It was found that nitrogen losses in the macro scale might be minimised by decreasing the consumption of animal protein (mainly by limited beef consumption) and by decreasing the amount of food wastes and in the micro scale (farm) – by improving nitrogen management.

Recenzenci:

prof. dr hab. Jan Łabętowicz

doc. dr hab. Tadeusz Marcinkowski

Praca wpłynęła do Redakcji 23.04.2009 r.