

MODELING NITROUS OXIDE EMISSIONS FROM AGRICULTURAL SOURCES WITH THE USE OF LINEAR REGRESSION

Summary

In the article the variables directly related to agricultural nitrous oxide emissions in Poland were studied. Based on a linear regression the model was created to describe the analyzed variables. As a result of Pearson's test and Shapiro-Wilk the variables which did not fulfill the tests assumptions were eliminated. In the resulting linear regression model, 63% of the variability of N₂O emissions is explained by variability in use of nitrogen fertilizers. The study was conducted using the statistical package R-Project.

Key words: nitrous oxide, agriculture, farming animals, nitrogen fertilizers, linear regression, modeling

MODELOWANIE EMISJI PODTLENKU AZOTU ZE ŹRÓDEŁ ROLNICZYCH Z WYKORZYSTANIEM REGRESJI LINIOWEJ

Streszczenie

W artykule opisano przebieg badań zmiennych bezpośrednio związanych z rolniczymi emisjami podtlenku azotu w Polsce. Na podstawie regresji liniowej utworzono model opisujący analizowane zmienne. W wyniku przeprowadzonych testów Pearsona i Shapiro-Wilka wyeliminowano zmienne nie spełniające założeń. W otrzymanym liniowym modelu regresyjnym 63% zmienności emisji N₂O tłumaczona jest zmiennością zużycia nawozów azotowych. Badania prowadzono z wykorzystaniem pakietu statystycznego R-Project.

Słowa kluczowe: podtlenek azotu, uprawy rolne, zwierzęta hodowlane, nawozy azotowe, regresja liniowa, modelowanie

1. Wprowadzenie

Podtlenek azotu (N₂O) ze względu na wysoki potencjał tworzenia efektu cieplarnianego oraz długi czasookres przebywania w stratosferze, jak również z powodu jego udziału w degradacji warstwy ozonowej stał się ważnym zanieczyszczeniem [14]. Źródłem emisji tego gazu jest wiele naturalnie występujących w przyrodzie procesów. W rolnictwie jego emisje nasiliły się głównie w wyniku większej wydajności procesów nityfikacji i denityfikacji. Szacuje się, że rolnictwo i obszary wiejskie są odpowiedzialne za ponad 80% emisji N₂O [16].

W wyniku działalności rolnej można bezpośrednio lub pośrednio przyczynić się do wzrostu zawartości N₂O. W sposób bezpośredni poprzez stosowanie nawozów azotowych, emisję azotu organicznego w odchodach zwierzęcych, gospodarke gruntami, składowanie szlamów ściekowych. Emisje pośrednie pochodzą głównie z parowania opadów atmosferycznych, odpływu powierzchniowego oraz wymywania azotu do wód gruntowych i powierzchniowych. Głównym źródłem N₂O są przede wszystkim emisje pochodzące z nawozów sztucznych i naturalnych. Jego udział w rolnictwie polskim wynosi ok. 72%, przy czym ok. 53% przypisuje się uprawom rolnym, a 19% emitowanych jest z odchodów zwierzęcych. [17].

Scenariusze w zakresie spodziewanych wielkości emisji związków azotu, tj. NH₃, NO_x i N₂O z systemów rolniczych wskazują na dalszy ich wzrost. Alternatywą na ich obniżenie może okazać się zmiana w sposobie konsumpcji żywności lub bardziej efektywne wykorzystanie azotu. Badania rolniczych emisji azotu podążają w dwóch kierunkach: pomiar bezpośredni emisji z danego źródła bądź ośrodka oraz inwentaryzacja tych emisji z różnych źródeł w skali regio-

nalnej i globalnej, z zastosowaniem w modelowaniu wskaźników emisji uzyskanych na podstawie pomiarów [16].

Pierwsza inwentaryzacja w zakresie emisji NH₃ z hodowli zwierząt gospodarskich została przeprowadzona poprzez przemnożenie ilości zwierząt w poszczególnych kategoriach przez współczynnik emisji [1, 5]. Wskaźnik emisji został podany odrębnie dla różnych sytuacji – składowania obornika, stosowania nawozów naturalnych, wypasu. W Polsce pomiary emisji NH₃ zapoczątkowano w IMUZ w 1997 roku, a pierwsze polowe pomiary N₂O przeprowadzono w 1999 r. [16]. Natomiast pierwsza inwentaryzacja emisji N₂O z rolnictwa w Polsce, przy uwzględnieniu polskich realiów, z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody IPCC przeprowadzona została w 2002 r. [15].

Wcześniejsze szacunki *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC) emisji N₂O z rolnictwa i innych źródeł nie obejmowały emisji N₂O z produkcji zwierzęcej [11]. Badania wskazały, że emisje pochodzące z odpadów zwierzęcych mogą być znaczące [np. 3, 9, 12].

Istnieją trzy potencjalne źródła emisji N₂O w produkcji zwierzęcej: emisja zwierząt, emisja z odpadów zwierząt zamkniętych oraz emisja z odchodów pozostawionych na glebie podczas wypasu. Emisje wywoływane przy użyciu obornika jako nawozu (z wyjątkiem emisji z wypasania zwierząt) są uważane za bezpośrednie N₂O emisje z pól uprawnych [13].

Stosowane na świecie modele emisji NO_x z gleb są wykorzystywane do inwentaryzacji globalnej emisji N₂O, choć żaden z nich nie jest stosowany w skali całego świata [16]. Badania powinny uwzględniać m.in. klimat, charakterystykę upraw oraz inne warunki panujące w danym kraju. W zakresie modelowania powstały prace, dzięki którym doko-

nano symulacji emisji NO oraz N₂O z różnych ekosystemów z zastosowaniem wyznaczonych współczynników emisji [2, 6, 7, 13, 14].

Na poziomie gospodarstw rolnych podejmowano próby oszacowania wielkości nadprodukcji azotu przy użyciu analizy regresji, korzystając przy tym z różnych parametrów, np. udział powierzchni gruntów zielonych w ogólnej powierzchni gruntów rolnych, obsada zwierząt, wykształcenie rolników, ilość azotu wniesiona z zakupionymi nawozami, ilość azotu wniesiona z zakupionymi paszami treściwymi, ilość azotu wniesiona z zakupionymi zwierzętami hodowlanymi [15]. Giustini i inni przyjęli w podobnych badaniach następujące czynniki: udział powierzchni gruntów ornych w powierzchni gospodarstw, liczba dni wypasu zwierząt, obsada zwierząt [10] lub zaproponowane przez Verbruggen i innych jeszcze inne: dawka azotu w nawozach mineralnych na użytki zielone, ilość zakupionych suchych koncentratów, ilość zakupionych płynnych koncentratów, ilość użytków zielonych w powierzchni gospodarstwa, ilość zakupionych nawozów naturalnych [18].

W Polsce z gleb rolnych pochodzi ok. 66% emisji N₂O, a z gospodarki odchodami 18%. Spalanie resztek roślinnych stanowi znikome źródło N₂O (tabela).

Tab. 1. Emisje rolnicze N₂O w Polsce w 2009 roku [4, 22]
Table 1. Agricultural N₂O emission in Poland in 2009

	N ₂ O	
	Gg	%
Gleby rolne	58,46	65,85
Odchody zwierzęce	16,26	18,32
Spalanie odpadów roślinnych	0,06	0,06
Rolnictwo ogółem	74,78	84,24

2. Metodyka badań

Celem badań jest próba zdefiniowania modelu opisującego emisję N₂O w Polsce z bezpośrednich źródeł rolniczych. Często stosowaną analizą statystyczną umożliwiającą znalezienie związku pomiędzy zmiennymi objaśniającymi a objaśnianymi jest regresja liniowa. Uwzględnia ona zagadnienie modelowania współzależności badanych cech i polega na estymacji jednych danych na podstawie innych. Regresja liniowa zakłada, że pomiędzy zmiennymi wejściowymi a wyjściowymi istnieje pewna zależność liniowa [8]. Przy takim modelu algorytmem do obliczania współczynników dla wariacji jako miary błędu jest metoda najmniejszych kwadratów (MNK). Ponieważ zakładanym modelem zależności jest funkcja liniowa, do badania siły związku pomiędzy cechami zastosowano współczynnik korelacji liniowej Pearsona. W kolejnym etapie badań, zmienne spełniające warunek korelacji liniowej poddano testowi Shapiro-Wilka. Test informuje, jakie jest prawdopodobieństwo, że próbka pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym.

Ze tego względu, że źródłem emisji bezpośrednich N₂O są nawozy azotowe, emisje związane z produkcją zwierzęcą oraz emisje z gospodarki gruntami, jako dane wejściowe przyjęto następujące zmienne:

- ilość zużytych nawozów azotowych,
- wielkość arealu upraw z uwzględnieniem rodzaju upraw: pszenica, jęczmień, pszenżyto, burak cukrowy, owies, kukurydza, rzepak, żyto,
- pogłowie zwierząt gospodarskich: bydło, trzoda chlewna, drób, konie, owce.

Dane źródłowe pozyskano z baz danych: emisję N₂O z bazy United Nations Framework Convention on Climate Change [19], wielkości poszczególnych upraw oraz pogłowie zwierząt z bazy Food and Agricultural Organization [20] oraz zużycie nawozów azotowych z bazy International Fertilizer Industry Association [21].

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu statystycznego R-Project.

3. Wyniki badań

Porównując wartość p-value z poziomem istotności przyjętym dla $\alpha = 0,05$ stwierdzono, że istnieje zależność liniowa pomiędzy kilkoma zmiennymi, tj. pogłowiem bydła, owiec, zużyciem nawozów, wielkością arealu upraw jęczmienia a emisją N₂O.

Tab. 2. Wyniki testu Pearsona
Table 2. Pearson's test results

Lp.	Zmienne	t	p-value	korelacje
1.	bydło	2,2589	0,018	0,47
2.	drób	0,1831	0,428	0,04
3.	konie	1,0198	0,160	0,233
4.	trzoda chlewna	-0,4046	0,654	-0,09
5.	owce	3,233	0,002	0,606
6.	zużycie nawozów azotowych	5,814	8,26e-06	0,807
7.	pszenica	-1,28	0,891	-0,601
8.	jęczmień	1,759	0,047	0,383
9.	pszenżyto	0,658	0,259	0,153
10.	burak cukrowy	0,269	0,395	0,063
11.	kukurydza	-0,610	0,725	-0,142
12.	rzepak	1,527	0,072	0,338
13.	żyto	0,248	0,403	0,058

Zmienne spełniające warunek korelacji liniowej poddano testowi normalności rozkładu.

Wyniki testu Shapiro-Wilka przedstawiają się następująco:

a) bydło

Shapiro-Wilk normality test

data: test1

W = 0.8735, p-value = 0.01354

b) owce

Shapiro-Wilk normality test

data: test1

W = 0.5954, p-value = 2.64e-06

c) zużycie nawozów azotowych

Shapiro-Wilk normality test

data: test1

W = 0.9322, p-value = 0.1705

d) jęczmień

Shapiro-Wilk normality test

data: test1

W = 0.938, p-value = 0.2195

Rys. 1. Wyniki badań testu Shapiro-Wilka
Fig. 1. Shapiro-Wilk test results

```

a)
Call:
lm(formula = emisja_N2O ~ zuzycie_nawozow_azot. + jeczmien, data = dane)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1065.4  -655.9  -241.7   425.8  2919.2

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  4.714e+03  3.338e+03   1.412   0.176
zuzycie_nawozow_azot.  8.081e+00  1.462e+00   5.526 3.70e-05 ***
jeczmien      4.571e-03  2.977e-03   1.535   0.143
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 969.8 on 17 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6949,    Adjusted R-squared:  0.659
F-statistic: 19.36 on 2 and 17 DF,  p-value: 4.153e-05

```

Wyniki kolejnego dopasowania modelu prezentuje rys. 2b.

```

b)
Call:
lm(formula = emisja_N2O ~ zuzycie_nawozow_azot., data = dane)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-871.6  -731.3  -323.1   350.8  2918.8

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  9434.296   1347.066   7.004 1.54e-06 ***
zuzycie_nawozow_azot.  8.588     1.477   5.814 1.65e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1006 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6526,    Adjusted R-squared:  0.6332
F-statistic: 33.81 on 1 and 18 DF,  p-value: 1.652e-05

```

Rys. 2. Wynik dopasowania modelu
 Fig. 2. The results of fit of the model

Na podstawie wartości poziomu istotności $\alpha = 0,05$ oraz liczby próbek $n = 18$ z tablic testu Shapiro-Wilka odczytano wartość krytyczną, która wynosi $W = 0,897$. Zatem wartości w przypadku zmiennych zużycie nawozów azotowych oraz areal upraw jęczmienia są większe od wartości krytycznej i spełniają założenie o normalności rozkładu. Pozostałe dwie nieistotne zmienne (bydło, owce) pomięto w kolejnym etapie analizy.

Dopasowanie modelu liniowego do danych przedstawiono na rys. 2. Zmienna objaśniająca nieistotnie różna od zera (rys. 2a, zmienna jęczmień) została odrzucona.

O dopasowaniu modelu liniowego świadczy wartość współczynnika R^2 odzwierciedlająca procent wariancji wyjaśnionej przez model. Wartość uwzględniająca liczbę zmiennych w modelu określa zmodyfikowany współczynnik Adjusted R^2 . Im wartość ta bliższa jedności tym lepsze dopasowanie modelu do danych.

Można zatem sformułować następującą postać modelu liniowego:

$$\text{Emisja N}_2\text{O} = 9434,3 + 8,6 \cdot \text{zużycie nawozów azotowych} \quad (1)$$

Wartość współczynnika determinacji Adjusted $R^2 = 0,6332$ oznacza, że ponad 63% zmienności emisji N_2O tłumaczona jest zmiennością zużycia nawozów azotowych.

4. Wnioski

Wynikiem przeprowadzonych badań jest model liniowy opisujący emisję N_2O ze źródeł rolniczych w Polsce. Mimo, iż w oparciu o test Pearsona, wykazano istotne korelacje pomiędzy zmiennymi pogłowiu bydła i owiec a emisją N_2O , odpowiednio równe 0,407 oraz 0,606, to zmienne te nie spełniły założenia o normalności rozkładu i w kolejnym kroku badań zostały odrzucone. Otrzymany współczynnik determinacji wyjaśnia 63% zmienności, które odpowiadają zmiennej związanej ze zużyciem nawozów azotowych.

5. Bibliografia

- [1] Asman W.A.H.: Ammonia emission in Europe: updated emission and emission variations. Report 228471008, National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven, 1992.
- [2] Bouwman A.F.: Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, In: Soils and the greenhouse effect. ed Bouwman A. F., Wiley and Sons, Chichester, United Kingdom, 1990, 61-127.
- [3] Bouwman A.F.: Compilation of a global inventory of emissions of nitrous oxide, Thesis Landbouwniversiteti Wageningen, 143, 1995.

- [4] Bebkiewicz K., Cieślińska J., Dębski B., Kanafa M., Kargulewicz I., Olecka A., Olendrzyński K., Skośkiewicz J., Żaczek M.: Krajowy Raport inwentaryzacyjny 2011. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2009. Raport wykonany na potrzeby Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz Protokołu z Kioto. KOBIZE, Warszawa, 2011.
- [5] Buijsman E., Maas J.F.M., Asman W.A.H.: Anthropogenic NH₃ emissions in Europe. *Atmospheric Environment*, 1987, 21, 1009-1022.
- [6] Davidson E.A.: Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems, In: *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides, and Halomethanes*, eds Rogers J.E., Whitman W.B., American Society for Microbiology, Washington, 1991, 219-235.
- [7] Davidson E. A., Kinglerlee W.: A global inventory of nitric oxide emissions from soils, *Nutrient Cycling Agroecosyst.*, 1997, 48(1/2), 37-50.
- [8] Faraway J. J.: *Practical Regression and Anova using R*, 2002.
- [9] Flessa H., Doersch P., Beese F., Koenig H., Bouwman A.F.: Influence of cattle excrements on nitrous oxide and methane fluxes in pasture land. *J Environ Qual.* 1996, 25: 1366-1370.
- [10] Giustini L., Acciaioli A., Argenti G.: Apparent balance of nitrogen and phosphorous in dairy Mugello (Italy), *Ital. J. Anim. Sci.*, 2007, 6, 175-185.
- [11] IPCC, eds Houghton J.T. Meira Filho L.G., Bruce J., Lee H., Callander B.A., Haites E., Harris N., Maskell K.: *Climate Change (1994) Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Published for the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK 337, 1995.
- [12] Mosier A.R., Duxbury J.M., Freney J.R., Heinemeyer O., Minami K.: Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil*, 1996, 181, 95-108.
- [13] Mosier A.R., Kroeze C., Nevison C., Oenema O., Seitzinger S., Van Cleemput O.: Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr. Cycling in Agroecosyst.*, 1998, 52, 225-248.
- [14] Olivier J.G.J., Bouwman A.F., Van Der Hoek, K.W., Berdowski J.J.M.: Global Air Emission Inventories for Anthropogenic Sources of NO_x, NH₃ and N₂O in 1990, *Env. Poll.*, 1998, 102, 135-148.
- [15] Pietrzak S., Sapek A., Oenema O.: Ocena emisji podtlenku azotu (N₂O) ze źródeł rolniczych w Polsce. *Zeszyty Edukacyjne* 8, IMUZ, Falenty, 2002, 23-36.
- [16] Sapek A.: Emisja tlenków azotu (NO_x) z gleb uprawnych i ekosystemów naturalnych do atmosfery, *Woda – Środowisko – Obszary wiejskie*, 2008, 8, 1(22), 283-304.
- [17] Zaliwski A.: Emisja gazów cieplarnianych przez rolnictwo. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2007, 4, 35-46.
- [18] Verbruggen I., Carlier L., Van Bockstaele E.: Surplus of nutrients on dairy farms in Belgium, W: *Grassland and society. Proc. 15th General Meet. EGF*, 1994, 463-465.
- [19] http://unfccc.int/ghg_data/items/3800.php, 6.07.2012
- [20] <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>, 5.07.2012
- [21] <http://www.fertilizer.org/ifa/ifadata/search>, 5.07.2012
- [22] http://www.stat.gov.pl/gus/srodowisko_energia_PLK_HTML.htm, *Ochrona Środowiska* 2011, GUS Warszawa, 3.06.2012.