

Zuzanna Jarosz, Antoni Faber

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

ANALIZA PRZESTRZENNEGO ZRÓŻNICOWANIA EMISJI PODTLENKU AZOTU Z GRUNTÓW ORNYCH W POLSCE*

Słowa kluczowe: emisja podtlenku azotu, model DNDC, emisja gazów cieplarnianych

Wstęp

Zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej 2284/2016 z dnia 14 grudnia 2016 r., poczyniono znaczne postępy w dziedzinie ograniczania emisji antropogenicznych zanieczyszczeń do atmosfery, a w latach 1990-2010 w Unii Europejskiej emisje tlenków azotu zostały zmniejszone o 47% (1). Jednak w komunikacie Komisji z 18 grudnia 2013 r. „Czyste powietrze dla Europy” stwierdzono, że nadal występują znaczące negatywne skutki i zagrożenia dla zdrowia ludzkiego i środowiska. Emisja N_2O w Polsce w 2012 roku wynosiła około 29,59 mln ton ekwiwalentu CO_2 , a udział emisji podtlenku azotu z gleb użytkowanych rolniczo w całkowitej emisji N_2O stanowił 68,6% (3). W zmienionym protokole z Göteborga określa się, przyjmując 2005 za rok odniesienia, nowe zobowiązania w zakresie redukcji emisji zanieczyszczeń atmosferycznych w tym emisji tlenków azotu. Krajowe zobowiązania w zakresie redukcji emisji podtlenku azotu wynoszą 39% za każdy rok od 2020 do 2029 roku.

Zdecydowana większość emitowanego do atmosfery N_2O pochodzi z mikrobiologicznych procesów (denitryfikacji, nityfikacji) przemian związków azotu zachodzących w glebach i oceanach. Gleby rolnicze należą do największych antropogenicznych źródeł emisji podtlenku azotu. Wielkość bezpośredniej emisji N_2O z gruntów rolnych zależy od złożonych interakcji pomiędzy właściwościami gleby (temperaturą i wilgotnością gleby, dostępnością węgla organicznego, pH i strukturą gleby) a warunkami klimatycznymi oraz czynnikami związanymi z gospodarką rolną (rodzajem uprawy, typem nawozu azotowego, sposobem nawożenia, sposobem uprawy gleby). Zasad-

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.6 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

niczy wpływ na wielkość emisji N_2O ma proces denitryfikacji, który ma tym większe nasilenie, im mniejsza jest w glebie dostępność tlenu i im większe są zasoby węgla organicznego. Większe ilości podtlenku azotu uwalnianie są także po wniesieniu do wilgotnych gleb nawozów azotowych, po przyoraniu nawozów naturalnych oraz bogatych w azot resztek poźniwnych (8).

Metodyka szacowania emisji gazów cieplarnianych, w tym emisji podtlenku azotu, została zaproponowana przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu – IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) i opisana w dokumencie *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (2). Zgodnie z metodyką szacunki można wykonywać na różnym poziomie szczegółowości (poziom 1, 2 i 3). Najprostsza metoda Tier 1 zakłada, że wielkość emisji N_2O jest wprost proporcjonalna do ilości aplikowanego azotu. Przyjęty w tej metodzie standardowy wskaźnik emisji wynosi 0,01 kg N_2O -N na kg zastosowanego nawożenia azotem (9). Metoda Tier 2 bazuje na tych samych założeniach metodologicznych co Tier 1, jednak współczynniki emisji są definiowane na poziomie kraju. Natomiast metoda Tier 3 polega na wykorzystaniu do szacowania emisji podtlenku azotu – modeli. Do symulacji przemian węgla i azotu na poziomie europejskim używano modelu DNDC (5, 6). Model ten zgodnie z metodyką IPCC może być traktowany jako metoda szacunków poziomu 3 (najdokładniejsza).

Celem badań było określenie wpływu czynników decydujących o regionalnym zróżnicowaniu wielkości bezpośredniej emisji podtlenku azotu z rolniczego użytkowania gleb.

Material i metodyka

W badaniach zastosowano, sprawdzony w Europie, model mechanistyczny DNDC głównie do szacunków sekwestracji węgla i emisji N_2O . DNDC jest matematycznym modelem mechanistycznym, który umożliwia symulacje: plonów, bilansów węgla, azotu, wody oraz gazów cieplarnianych. Wymaga na wejściu dziennych danych meteorologicznych (co najmniej temperatury minimalnej i maksymalnej oraz opadu), określenia parametrów charakteryzujących właściwości fizyko-chemiczne gleby (zawartość ilu koloidalnego, ciężar objętościowy, odczyn, zawartości węgla) oraz danych charakteryzujących agrotechnikę (zmianowanie roślin, terminy, rodzaje oraz głębokości wykonywanych zabiegów uprawowych, dawki i terminy stosowania nawozów mineralnych i naturalnych, ilości pozostawianych na polu resztek poźniwnych) (7).

Oszacowane emisje podtlenku azotu wyrażone w kg N ha⁻¹ przeliczono na kg N_2O według formuły: kg N- N_2O * 1,561 = 1,561 kg N_2O . Symulacje prowadzono dla czterech systemów uprawy: plūżnej (pełnej) ze zbiorem całej ilości resztek poźniwnych, plūżnej i przyorywania całej ilości resztek poźniwnych, uproszczonej i pozostawiania całej ilości resztek poźniwnych na polu oraz bezorkowej i pozostawiania całej ilości resztek poźniwnych na polu. Symulacje wykonano dla każdego gatunku roślin uprawianych w zmianowaniu: kukurydza – pszenica ozima – rzepak

ozimy – pszenica ozima. Do określenia wartości charakteryzujących technologię produkcji poszczególnych upraw wykorzystano ankiety z gospodarstw towarowych (kukurydza – 275, pszenica – 272 oraz rzepak – 1218), które były w posiadaniu IUNG-PIB. W celu jak najdokładniejszego określenia wartości analizowanych czynników symulacje wykonano dla sieci 136 kwadratów pokrywających terytorium Polski, a uzyskane wyniki agregowano do poziomu województw. Przestrzenne zróżnicowanie bezpośredniej emisji podtlenku azotu analizowano w zależności od początkowej zawartości węgla organicznego, rocznej sumy opadów, sekwestracji węgla i pH gleby. Zależności badano metodą regresji wielokrotnych liniowych z krokową selekcją zmiennych. Wyniki zaprezentowano wyłącznie dla zmiennych istotnie statystycznie wpływających na symulowane wartości emisji N_2O . Zastosowanie metody analizy skupień k-Warda umożliwiło wyodrębnienie grup województw zróżnicowanych pod względem emisji podtlenku azotu. Do obliczeń wykorzystano pakiet statystyczny Statgraphics Centurion ver. 16.1.11.

Kalibracja i weryfikacja modelu DNDC

Zastosowanie modelu DNDC w innych warunkach niż te, dla których został stworzony, wymaga jego kalibracji i weryfikacji. W rekalkibracji modelu wykorzystano trzy stacjonarne, wieloletnie doświadczenia polowe, prowadzone przez IUNG-PIB w Grabowie (woj. mazowieckie), Baborówku (woj. wielkopolskie) oraz Laskowicach (woj. dolnośląskie).

W doświadczeniu prowadzonym w Grabowie przez 23 lata badano wpływ zbioru i przyorywania całej ilości słomy na plon uprawianych roślin oraz zawartości materii organicznej w glebie w zmianowaniu: jęczmień jary – rzepak – pszenica ozima.

W doświadczeniu prowadzonym w Baborówku przez 17 lat badano wpływ uprawy płuźnej, uproszczonej (ograniczonej) i siewu bezpośredniego na plony uprawianych roślin oraz zawartości substancji organicznej w glebie w zmianowaniu: kukurydza na ziarno – jęczmień jary – pszenica ozima.

W doświadczeniu prowadzonym w Laskowicach przez okres 16 lat badano wpływ uprawy płuźnej, uproszczonej (ograniczonej) i siewu bezpośredniego na plony uprawianych roślin oraz zawartości substancji organicznej w glebach w zmianowaniu: kukurydza na ziarno – pszenica jara – rzepak.

Rekalibracja modelu DNDC dla warunków doświadczalnych polegała na dokonywaniu zmian wartości współczynników alokacji węgla do ziarna (nasion), słomy oraz korzeni, a następnie na dokonywaniu po każdej takiej zmianie wielokrotnych, iteracyjnych symulacji dla okresów trwania doświadczeń polowych. W wykonywanych symulacjach wykorzystywano dane meteorologiczne pochodzące ze stacji meteorologicznych zlokalizowanych w miejscach prowadzenia doświadczeń, wymagane przez model dane charakteryzujące właściwości gleb, na których prowadzone były doświadczenia, oraz wymagane charakterystyki agrotechniczne (technologii produkcji). Zgodność wyników plonów symulowanych z plonami doświadczalnymi była za każdym razem oceniana poprzez obliczanie błędów; średniokwadratowego oraz względnego błędu średniokwadratowego symulacji ze wzorów:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (P_j - O_j)^2}$$

$$\text{RRMSE} = \frac{\text{RMSE} \times 100}{\bar{O}}$$

gdzie: O_j i P_j są odpowiednio plonami doświadczalnymi i symulowanymi z modelu, jest średnią wartością plonów doświadczalnych, n jest liczbą przeprowadzonych symulacji.

W kalibracjach modeli przyjmuje się, że im mniejszy względny błąd średniokwadratowy, tym lepsza kalibracja modelu. Celem, który postawiono sobie w rekaliibracji modelu DNDC, było sprowadzenie względnego błędu średniokwadratowego symulacji plonów do wartości zbliżonej do 20%. W powszechnie przyjętej ocenie oznaczałoby to dobrą zgodność wyników symulacji modelu z wynikami empirycznymi.

Zastosowanie modelu dla doświadczeń z wykorzystaniem wyjściowej kalibracji DNDC-Europe pozwalało symulować plony z błędami RRMSE mieszczącymi się w granicach 28 - 51%, w zależności od doświadczenia. W wyniku przeprowadzenia 339 symulacji rekaliibracyjnych uzyskano zmniejszenie tych błędów i wynosiły one dla zmianowań doświadczalnych odpowiednio: Grabów – 15%, Baborówko i Laskowice 36%. Błędy doświadczeń polowych wynoszą maksymalnie 10%. Przyjmuje się, że kalibracja modelu jest bardzo dobra, jeśli błąd symulacji jest mniejszy od 10%, bądź że kalibracja jest dobra, jeśli błędy zawierają się w przedziale 10-20%. Według przyjętej konwencji błędy stwierdzone w Baborówku i Laskowicach były zbyt duże, co wykluczało możliwość wykorzystywania uzyskanej rekaliibracji w dalszych badaniach.

W celu weryfikacji tych błędów oszacowano je ponownie. Tym razem nie dla zmianowań roślin w lokalizacjach poszczególnych doświadczeń, lecz dla roślin ze wszystkich doświadczeń. Stwierdzono, że błędy RRMSE dla roślin będących w sferze zainteresowań wynosiły odpowiednio: kukurydza na ziarno – 19,4%, pszenica ozima – 20,2% oraz rzepak – 19,9%.

Weryfikację (walidację) rekaliibracji modelu w stosunku do plonów uzyskiwanych w praktyce rolniczej wykonano wykorzystując ankiety inwentaryzujące technologie produkcji badanych roślin w gospodarstwach towarowych, które były w posiadaniu IUNG-PIB. Ankiety pochodziły ze specjalistycznych gospodarstw roślinnych (bezinwentarzowych), które są głównymi dostawcami surowca do produkcji biopaliw w Polsce. Stosownie do istniejących wymagań ankietami objęto ok. 3% gospodarstw dostarczających lub mogących dostarczać surowce do produkcji biopaliw płynnych (kukurydza – 275 gospodarstw, pszenica – 272 gospodarstwa oraz rzepak – 1218 gospodarstw) na terenie kraju. Symulacje wykonano dla parametrów agronomicznych (technologicznych) uśrednionych dla województw. Symulowane plony roślin z wykorzystaniem opracowanej rekaliibracji modelu DNDC obciążone były błędami RRMSE: kukurydza – 26%, pszenica – 21% oraz rzepak – 9%. Uzyskane wyniki uzasadniały twierdzenie, iż dopuszczalnym jest wykorzystywanie opracowanej rekaliibracji modelu DNDC w dalszych symulacjach.

Wyniki badań

Działalność rolnicza wywiera znaczący wpływ na przemiany azotu i węgla w glebach. W wyniku rolniczego użytkowania gruntów ornych ilość węgla organicznego zmniejsza się w Polsce średnio o $0,31 \text{ t ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ (4). Straty węgla z gleb mogą być kompensowane poprzez stosowanie praktyk rolniczych zwiększających sekwestrację węgla. Praktyki te polegają na modyfikacji standardowych płodozmianów, poprzez pozostawianie na polu wszystkich resztek poźniwnych z jednoczesnym wprowadzeniem uproszczeń w uprawie lub stosowaniem systemu bezorkowego (siewu bezpośredniego). Zwiększenie sekwestracji węgla wskutek zagospodarowania słomy może prowadzić także do nasilenia niekorzystnych następstw. Z punktu widzenia ochrony środowiska, pozostawienie na polu dużych ilości słomy przyczyniać się może do zwiększenia emisji N_2O oraz ograniczania lub zwiększania wymywania azotu i azotanów. Zarówno wielkość sekwestracji węgla, jak i emisji N_2O są zróżnicowane regionalnie i zależą od warunków glebowo-klimatycznych. W związku z tym ważnym było wskazanie zależności między poszczególnymi czynnikami i określenie, które z analizowanych parametrów w sposób istotny wpływają na wielkość emisji podtlenku azotu w uprawie kukurydzy, pszenicy ozimej i rzepaku ozimego.

Wielkości emisji N_2O z uprawy kukurydzy w systemie uprawy płuźnej ze zbiorem resztek poźniwnych modyfikowane były głównie przez wielkości początkowej zawartości materii organicznej oraz przez opad (Tab. 1). Emisje N_2O rosły wraz ze wzrostem początkowej zawartości węgla w glebie i malały wraz ze wzrostem opadu. W systemie uprawy płuźnej z przyorywaniem słomy wielkości emisji zależały tylko od początkowej zawartości węgla w glebie. W uproszczonym systemie uprawy kukurydzy wielkości emisji N_2O rosły wraz ze wzrostem początkowej zawartości węgla oraz pH gleby i malały wraz ze wzrostem sekwestracji węgla organicznego. Natomiast w systemie siewu bezpośredniego emisje malały głównie ze wzrostem sekwestracji węgla i rosły ze wzrostem pH gleby (Tab. 1).

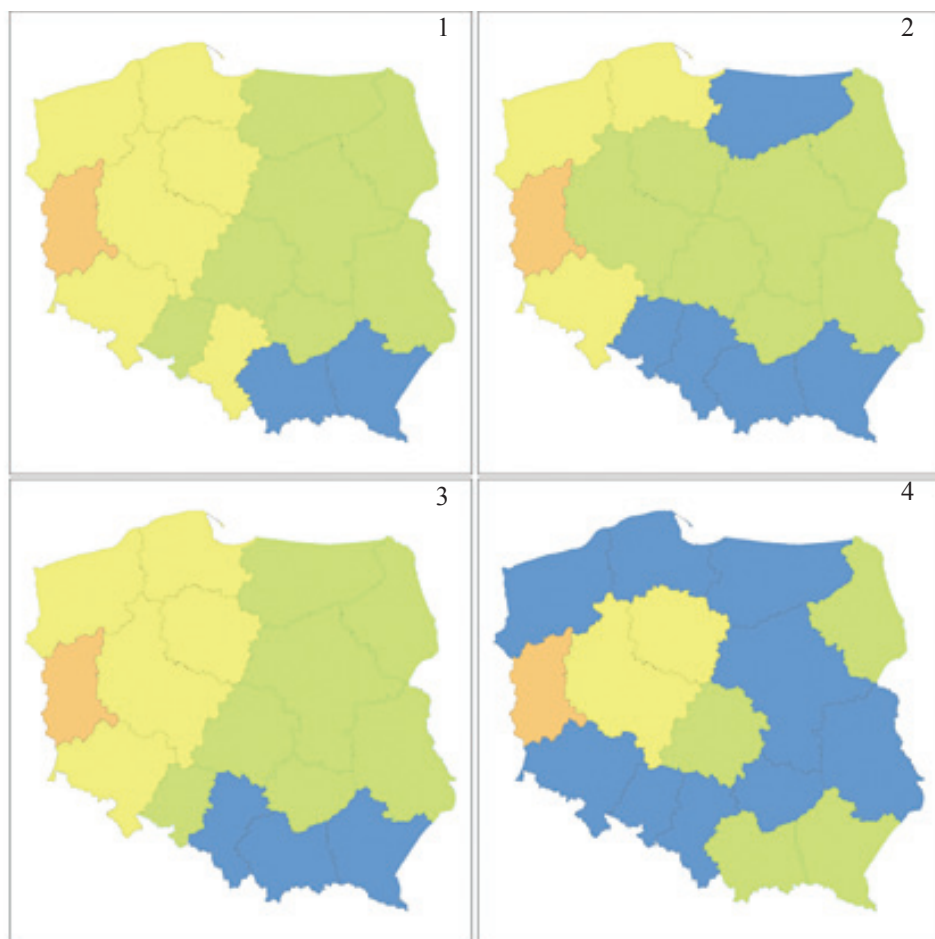
Tabela 1

Zależności między emisjami N_2O (kg N ha^{-1}) z uprawy kukurydzy a zawartościami węgla organicznego w glebie (SOC, t C ha^{-1}), sekwestracjami węgla (Cseq, $\text{t C ha}^{-1} \text{ r}^{-1}$), opadem (mm) oraz pH gleby

System uprawy (warianty)	Regresja	R ² (%)
1 - uprawa płuźna przy zbiorze całej ilości resztek poźniwnych	$\text{N}_2\text{O} = 0,028 \text{ SOC} - 0,001 \text{ Op}$	92,2
2 - uprawa płuźna i przyorywanie całej ilości resztek poźniwnych	$\text{N}_2\text{O} = 0,020 \text{ SOC}$	91,9
3 - uprawa uproszczona i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu	$\text{N}_2\text{O} = 0,029 \text{ SOC} - 4,538 \text{ Cseq} + 0,308 \text{ pH}$	94,2
4 - uprawa bezorkowa i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu	$\text{N}_2\text{O} = 11,7 - 2,044 \text{ Cseq} + 0,883 \text{ pH}$	87,7

Źródło: opracowanie własne

Regionalne zróżnicowanie emisji podtlenku azotu z różnych systemów uprawy kukurydzy scharakteryzowano wynikami analizy skupień (Rys. 1). Przeprowadzona analiza umożliwiła wyróżnienie czterech grup województw (skupień) zróżnicowanych ze względu na wielkości emisji N_2O we wszystkich systemach uprawy kukurydzy. Wspólne wartości analizowanych zmiennych w grupach województw przedstawia Tab. 2. Uzyskane wyniki pokazują duży wpływ małych wartości sekwestracji węgla (Cseq) i dużych wartości początkowych zawartości węgla (SOC) oraz przeciętny wpływ wartości pH gleby na wielkość emisji N_2O . Zależność ta jest szczególnie widoczna w skupieniu trzecim (województwo lubuskie). Emisje N_2O w tym skupieniu są od 2,8 do 4,0 razy większe niż w pozostałych grupach. Większe emisje podtlenku azotu wynikają z dużo większych początkowych zawartości węgla w glebach tego województwa w porównaniu do pozostałych rejonów.



Rys. 1. Podział województw na grupy zróżnicowane pod względem emisji N_2O z różnych systemów uprawy kukurydzy w zależności od zawartości węgla organicznego w glebie, sekwestracji węgla, opadu i pH gleby

*systemy uprawy kukurydzy: oznaczenia 1- 4 jak w Tab. 1

Źródło: opracowanie własne

Wielkości emisji podtlenku azotu z uprawy pszenicy ozimej w systemie płużnym ze zbiorem słomy zależały głównie od początkowej zawartości węgla w glebie i w niewielkim stopniu od opadu (Tab. 3). W uprawie płużnej z przyorywaniem resztek poźniwnych oraz uproszczonej z pozostawianiem słomy na polu, emisje N_2O rosły wraz ze wzrostem początkowej zawartości węgla w glebie i malały wraz ze wzrostem sekwestracji węgla. W systemie bezorkowym z pozostawianiem resztek poźniwnych na polu, emisje N_2O rosły w miarę wzrostu początkowej zawartości węgla i pH gleby i malały ze wzrostem sekwestracji węgla (Tab. 3).

Tabela 3

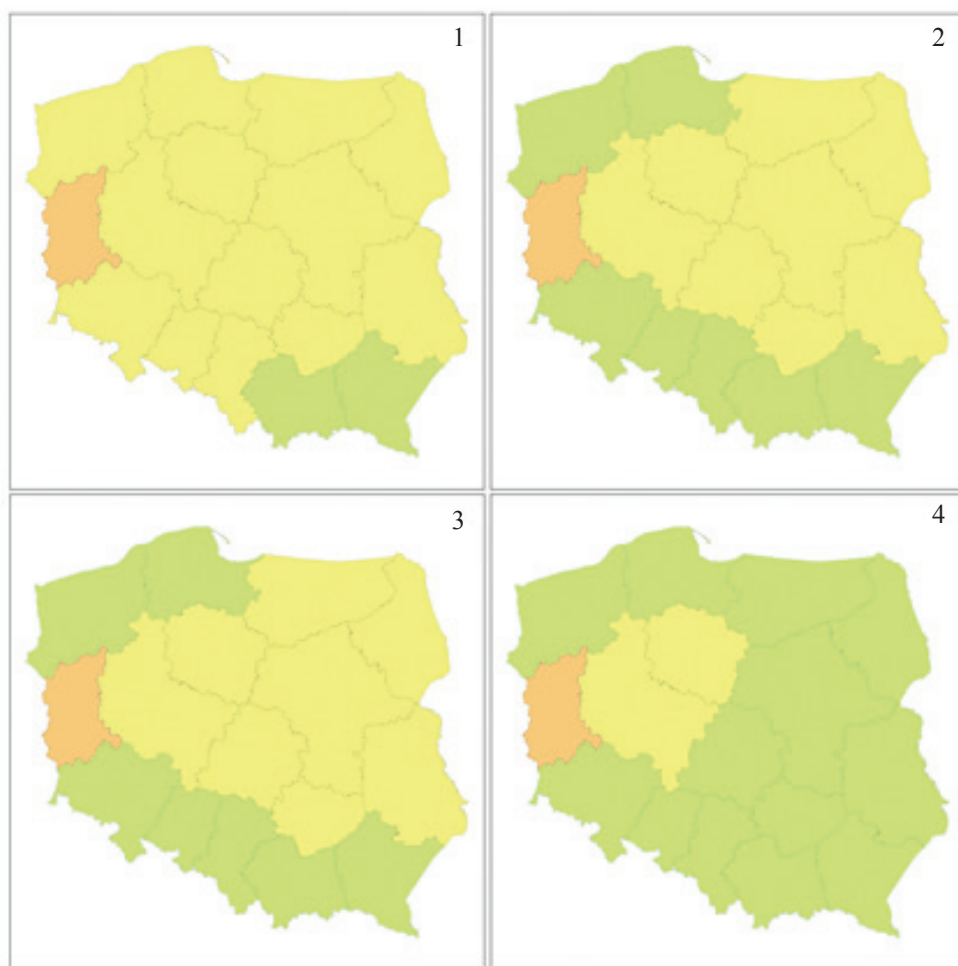
Zależności między emisjami N_2O ($kg\ N \cdot ha^{-1}$) z uprawy pszenicy ozimej a zawartościami węgla organicznego w glebie (SOC, $t\ C\ ha^{-1}$), sekwestracjami węgla (Cseq, $t\ C\ ha^{-1}\ r^{-1}$), opadem (mm) oraz pH gleby

System uprawy	Regresja	R ² (%)
uprawa płużna przy zbiorze całej ilości resztek poźniwnych	$N_2O = 0,017\ SOC - 0,001\ Op$	78,7
uprawa płużna i przyorywanie całej ilości resztek poźniwnych	$N_2O = 0,032\ SOC - 2,687\ Cseq$	83,2
uprawa uproszczona i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu	$N_2O = 0,028\ SOC - 2,295\ Cseq$	82,6
uprawa bezorkowa i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu	$N_2O = 3,22 + 0,008\ SOC - 0,738\ Cseq + 0,250\ pH$	82,9

Źródło : opracowanie własne

Analiza skupień umożliwiła wyodrębnienie grup województw o zbliżonej wielkości emisji N_2O ze względu na wpływ analizowanych zmiennych (Rys. 2). Charakterystykę zmiennych w wydzielonych grupach przedstawiono w tabeli 4.

Wielkości emisji N_2O w poszczególnych systemach uprawy pszenicy ozimej były niższe w stosunku do emisji z uprawy kukurydzy. W systemie uprawy płużnej ze zbiorem resztek poźniwnych wielkości emisji N_2O zależały głównie od początkowej zawartości węgla w glebie i opadu. Najmniejsze wartości emisji stwierdzono w województwach: małopolskim i podkarpackim (skupienie 3). Regiony te wyróżniają się przeciętną zawartością początkową węgla w glebie i najwyższymi wartościami opadów (Tab. 4). Najwyższe wartości emisji wystąpiły w skupieniu drugim, charakteryzującym się najwyższą zawartością węgla i najniższymi wartościami opadów. Większość województw, w których uprawiano pszenicę ozimą w systemie płużnym z przyorywaniem słomy i uproszczonym z pozostawianiem resztek poźniwnych na polu, charakteryzowała się przeciętnymi wartościami analizowanych zmiennych (Tab. 4 – skupienie 2, Rys. 2 – kolor żółty). W tych systemach uprawy pszenicy ozimej najwyższe wartości emisji N_2O wystąpiły w skupieniu trzecim, wyróżniającym się wysokimi wartościami początkowej zawartości węgla w glebie i niskimi wartościami sekwestracji. W bezorkowym systemie uprawy pszenicy ozimej większość regionów wyróżniała się najniższymi wielkościami emisji N_2O , najwyższymi wartościami sekwestracji węgla i średnimi wartościami pH gleby (Tab. 4 – skupienie 1, Rys. 2 – kolor zielony).



Rys. 2. Podział województw na grupy zróżnicowane pod względem emisji N_2O z różnych systemów uprawy pszenicy ozimej w zależności od zawartości węgla organicznego w glebie, sekwestracji węgla, opadu i pH gleby

*systemy uprawy kukurydzy: oznaczenia 1- 4 jak w Tab. 1

Źródło : opracowanie własne

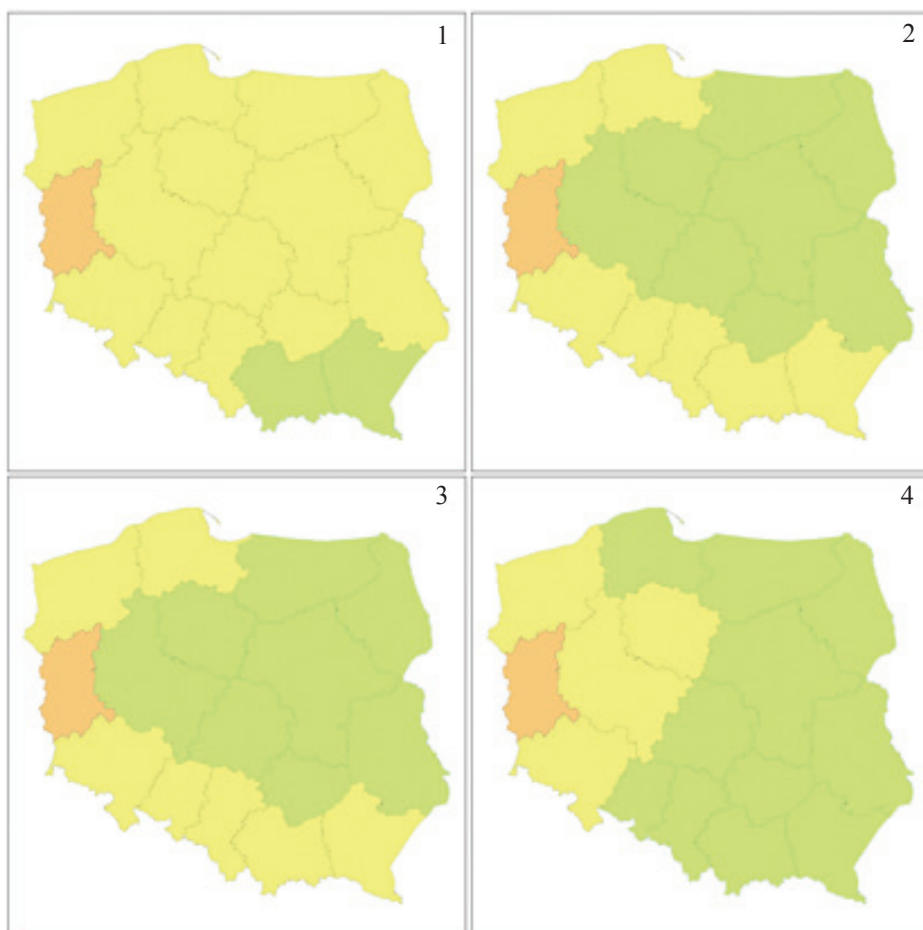
Podobne zależności stwierdzono w poszczególnych systemach uprawy rzepaku ozimego. W uprawie płużnej ze zbiorem słomy z pola wielkości emisji N_2O zależały przede wszystkim od początkowej zawartości węgla oraz opadu (Tab. 5). Natomiast w pozostałych systemach uprawy rzepaku wielkości emisji podtlenku azotu modyfikowane były wielkością początkowej zawartości węgla i jego sekwestracją.

Tabela 5

Zależności między emisjami N_2O ($kg\ N\ ha^{-1}$) z uprawy rzepaku ozimego a zawartościami węgla organicznego w glebie (SOC, $t\ C\ ha^{-1}$), sekwestracjami węgla (Cseq, $t\ C\ ha^{-1}\ r^{-1}$) oraz opadem (mm)

System uprawy	Regresja	R ² (%)
uprawa płuzna przy zbiorze całej ilości resztek poźniwnych	$N_2O = 0,017\ SOC - 0,001\ Op$	89,5
uprawa płuzna i przyorywanie całej ilości resztek poźniwnych	$N_2O = 0,024\ SOC - 1,617\ Cseq$	93,7
uprawa uproszczona i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu	$N_2O = 0,020\ SOC - 1,222\ Cseq$	94,8
uprawa bezorkowa i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu	$N_2O = 0,61 + 0,006\ SOC - 0,233\ Cseq$	69,0

Źródło : opracowanie własne



Rys. 3. Podział województw na grupy zróżnicowane pod względem emisji N_2O z różnych systemów uprawy rzepaku ozimego w zależności od zawartości węgla organicznego w glebie, sekwestracji węgla, opadu i pH gleby

*systemy uprawy kukurydzy: oznaczenia 1- 4 jak w Tab. 1

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2
Wartości zmiennych w wydzielonych rejonach w uprawie kukurydzy

Skupienie	Systemy uprawy												
	uprawa płuzna przy zbiorze całej ilości resztek poźniwnych			uprawa płuzna i przyorywanie całej ilości resztek poźniwnych			uprawa uproszczona i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu			uprawa bezorkowa i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu			
	N ₂ O	SOC	Op	N ₂ O	SOC		N ₂ O	SOC	Cseq	pH	N ₂ O	Cseq	pH
1	0,94	64,3	569,0	1,37	68,0		1,41	63,4	0,53	6,77	0,94	2,43	6,57
2	0,74	52,7	600,7	1,17	52,3		1,09	52,7	0,56	6,49	1,22	2,02	7,08
3	1,92	80,0	535,0	2,48	80,0		2,76	80,0	0,46	6,44	2,76	1,93	6,44
4	0,52	59,5	729,0	0,82	60,4		0,68	62,7	0,63	6,21	0,99	2,55	6,15

Źródło : opracowanie własne

Tabela 4
Wartości zmiennych w wydzielonych rejonach w uprawie pszenicy ozimej

Skupienie	Systemy uprawy																									
	uprawa płuzna przy zbiorze całej ilości resztek poźniwnych						uprawa płuzna i przyorywanie całej ilości resztek poźniwnych						uprawa uproszczona i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu						uprawa bezorkowa i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu							
	N ₂ O		SOC		Op		N ₂ O		SOC		Cseq		N ₂ O		SOC		Cseq		N ₂ O		SOC		Cseq		pH	
1	0,23	58,1	586,5	0,27	64,3		0,27	64,3	0,60	0,27	64,3	0,59	0,23	58,5	2,47	6,44										
2	1,18	80,0	535,0	0,30	53,0		0,31	53,0	0,54	0,31	53,0	0,54	0,37	56,5	2,02	7,08										
3	0,15	59,5	729,0	1,73	80,0		1,63	80,0	0,47	1,63	80,0	0,46	0,97	80,0	1,93	6,44										

Źródło : opracowanie własne

Tabela 6
Wartości zmiennych w wydzielonych rejonach w uprawie rzepaku ozimego

Skupienie	Systemy uprawy											
	uprawa pluzna przy zbiorze całej ilości resztek poźniwnych			uprawa pluzna i przyorywanie całej ilości resztek poźniwnych			uprawa uproszczona i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu			uprawa bezorkowa i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu		
	N ₂ O	SOC	Op	N ₂ O	SOC	Cseq	N ₂ O	SOC	Cseq	N ₂ O	SOC	Cseq
1	0,28	58,1	586,5	0,52	64,3	0,60	0,49	64,3	0,59	0,47	62,3	2,13
2	1,05	80,0	535,0	0,43	53,0	0,54	0,43	53,0	0,54	0,37	56,8	2,51
3	0,22	59,5	729,0	1,46	80,0	0,47	1,27	80,0	0,46	0,74	80,0	1,93

Źródło : opracowanie własne

Podsumowanie

Analiza przeprowadzona w zależności od zmiennych modyfikujących wielkości emisji N_2O umożliwiła wyróżnienie trzech skupień dla każdego systemu uprawy rzepaku (Rys. 3). Średnie wartości zmiennych w skupieniach przedstawiono w Tab. 6.

W systemie uprawy płużnej ze zbiorem resztek poźniwnych najmniejsze wartości emisji N_2O stwierdzono w województwach: małopolskim i podkarpackim, a najwyższe w województwie lubuskim. W pozostałych systemach uprawy rzepaku najmniejsze wartości emisji podtlenku azotu stwierdzono w regionach zgrupowanych w skupieniu 1, które charakteryzowało się wysokimi wartościami sekwestracji węgla. Przeprowadzona analiza wykazała wpływ warunków przyrodniczych na wielkość zróżnicowania emisji podtlenku azotu. W uprawie wszystkich analizowanych gatunków w systemie płużnym ze zbiorem resztek poźniwnych wielkości emisji N_2O zależały od początkowych zawartości węgla w glebie i opadu. Najmniejsze wielkości emisji stwierdzono w województwach: małopolskim i podlaskim, charakteryzującymi się przeciętnymi wartościami początkowej zawartości węgla w glebie i największymi rocznymi sumami opadów. Największe zaś wielkości emisji stwierdzono w województwie lubuskim. Rejon ten wyróżnia się największą początkową zawartością węgla w glebie i najmniejszą roczną sumą opadów. W uprawie kukurydzy w systemie uproszczonym i bezorkowym z pozostawianiem słomy na polu, wielkości emisji N_2O modyfikowane były wielkością sekwestracji węgla oraz odczynem pH gleby. W uprawie uproszczonej kukurydzy największymi wartościami sekwestracji węgla, a tym samym najmniejszymi wielkościami emisji N_2O z gruntów ornych, odznaczają się województwa: małopolskie, podkarpackie i śląskie. Poprawa agrotechniki poprzez wprowadzenie uprawy bezorkowej prowadzi do zwiększenia sekwestracji węgla i zmniejszenia emisji podtlenku azotu. Obszary o najniższej emisji N_2O z gruntów ornych występują w północnej, południowo-zachodniej i wschodniej części kraju.

Wielkości emisji N_2O w uprawie pszenicy i rzepaku w systemie płużnym z przyorywaniem słomy i uproszczonym z pozostawianiem całej ilości resztek poźniwnych na polu zależały głównie od sekwestracji węgla w glebie. Obszary o najniższej wielkości emisji podtlenku azotu z uprawy pszenicy koncentrowały się w południowej, południowo-zachodniej i północno-zachodniej Polsce, a z uprawy rzepaku w centralnej, wschodniej i północno-wschodniej części kraju. Natomiast w uprawie pszenicy w systemie bezorkowym wielkości emisji modyfikowane były wielkością sekwestracji węgla oraz pH gleby. Obszary o najwyższej wartości sekwestracji węgla, przeciętnej wielkości odczynu pH gleby i najniższej wartości emisji N_2O obejmowały prawie cały kraj z wyjątkiem województw: kujawsko-pomorskiego, wielkopolskiego i lubuskiego. Większe wartości sekwestracji i wskutek tego mniejsze wartości początkowej zawartości węgla miały istotny wpływ na zmniejszenie wartości emisji podtlenku azotu w uprawie rzepaku ozimego w systemie bezorkowym. Najmniejsze wielkości emisji wystąpiły na terenie południowej, wschodniej i północno-wschodniej części kraju.

Literatura

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/2284 z dnia 14 grudnia 2016 r. w sprawie redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych, zmiany dyrektywy 2003/35/WE oraz uchylenia dyrektywy 2001/81/WE.
2. IPCC.: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. A report prepared by the Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI) of the IPCC. 2006, Hayama, Japan: IGES.
3. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE). Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2014. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2012, KOBiZE, 2014.
4. Kuś J., Madej A., Kopieński J.: Bilans słomy w ujęciu regionalnym, Wyd. IUNG, Raporty PIB, 2006, **3**: 211-225.
5. Leip A., Marchi G., Koebler R., Kempen M., Britz W., Li C.: Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen losses from cropland soil in Europe. *Biogeoscience Discussion*, 2007, **4**: 2215–2278.
6. Leip A., Marchi G., Koebler R., Kempen M., Britz W., Li C.: Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen and carbon losses from arable soils in Europe. *Biogeosciences*, 2008, **5**: 73-94.
7. Li C.: Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, **53**: 344–352.
8. Pietrzak S., Sapek A., Oenema O.: Ocena emisji podtlenku azotu (N₂O) ze źródeł rolniczych w Polsce. Pomiar i symulacja emisji podtlenku azotu z gleb trwałych użytków zielonych. *Zeszyty Edukacyjne*, 2002, **8**: 23–36.
9. Stehfest E., Bouwman L.: N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, **74**: 207–228.

Adres do korespondencji:

dr Zuzanna Jarosz
Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 4786 766
e-mail: bloch@iung.pulawy.pl