



INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

**STUDIA I RAPORTY
IUNG-PIB**

50(4)

**TECHNOLOGIE PRODUKCJI ROŚLINNEJ
W WARUNKACH
ZMIENIAJĄCEGO SIĘ KLIMATU**

**PROGRAM WIELOLETNI
2016-2020**

**WSPIERANIE DZIAŁAŃ W ZAKRESIE OCHRONY
I RACJONALNEGO WYKORZYSTANIA
ROLNICZEJ PRZESTRZENI PRODUKCYJNEJ W POLSCE
ORAZ KSZTAŁTOWANIA JAKOŚCI SUROWCÓW ROŚLINNYCH**

Puławy 2016

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Dyrektor: *prof. dr hab. Wiesław Oleszek*

Redakcja naukowa:
dr hab. Jerzy Grabiński, prof. nadzw.

Autorzy:
*dr hab. Hanna Gołębiowska, prof. nadzw.; dr hab. Jerzy Grabiński, prof. nadzw.;
dr hab. Bogusława Jaśkiewicz, mgr Aleksandra Król, dr hab. Danuta Leszczyńska,
prof. dr hab. Kazimierz Noworolnik, dr hab. Alicja Sulek, mgr Tomasz Żyłowski*

Recenzenci:
*prof. dr hab. Antoni Faber, prof. dr hab. Mariusz Kucharski, prof. dr hab. Jan Kuś,
prof. dr hab. Kazimierz Noworolnik, prof. dr hab. Janusz Podleśny,
dr hab. Mariola Staniak, prof. nadzw.*

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Ewa Decka-Cywińska*
Okładka: krajobraz okolic Rogowa (fot. *dr Anna Nieróbca*)

ISBN 978-83-7562-237-9

Egzemplarz bezpłatny

Nakład 300 egz., B5, zam. 3/K/17
Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB w Puławach
tel. (81) 47 86 720; fax (81) 47 86 721
e-mail: iung@pulawy.pl; <http://www.iung.pulawy.pl>

**TECHNOLOGIE PRODUKCJI ROŚLINNEJ
W WARUNKACH
ZMIENIAJĄCEGO SIĘ KLIMATU**

SPIS TREŚCI

Wstęp	7
1. J. G r a b i ń s k i – Plonowanie zbóż w zależności od warunków pogodowych i regionalnych	9
2. K. N o w o r o l n i k – Wpływ terminu siewu w aspekcie zmiennych warunków pogodowych na plonowanie jęczmienia jarego.....	23
3. D. L e s z c z y ń s k a , B. J a ś k i e w i c z – Znaczenie gęstości siewu zbóż jarych w różnych warunkach agrotechniki w aspekcie zmian klimatu	39
4. A. S u ł e k , D. L e s z c z y ń s k a – Nawożenie zbóż jarych w warunkach zmieniającego się klimatu	53
5. H. G o ł ę b i o w s k a – Zróżnicowanie w zachwaszczeniu oraz oddziaływanie herbicydów w zasiewach roślin uprawnych w kontekście krótko- i długotermionowych zmian pogodowych	65
6. A. K r ó l – Modelowanie wpływu wybranych praktyk rolniczych na stosunki wodne gleb	79
7. T. Ż y ł o w s k i – Czynniki wpływające na emisję podtlenku azotu z rolnictwa	97

Wstęp

Ostatnie dekady przynoszą coraz więcej naukowych dowodów wskazujących na to, że warunki klimatyczne na naszym globie zmieniają się. Przejawem tych zmian są między innymi anomalie pogodowe, czyli układy warunków pogody w dużym stopniu odbiegające od normy. Dochodzi do nich w różnych rejonach naszego kraju prawie corocznie. Wpływają one niekorzystnie na wzrost i rozwój roślin i bardzo często prowadzą do bardzo dużych strat plonu i jego jakości.

Jednym z najważniejszych wyzwań dla nauk rolniczych jest określenie takich sposobów realizacji technologii produkcji, które wpływ niekorzystnej pogody na plon i jego jakość wyeliminują bądź ograniczą. Wiedza na ten temat jest istotna przede wszystkim dla producentów płodów rolnych, dla których odpowiednie decyzje dotyczące technologii przekładają się na wyższy dochód, a te chybione tylko zwiększają niepotrzebnie koszty.

W IUNG-PIB większość badań dotyczących technologii produkcji prowadzi się w warunkach polowych, przy czym część z nich także w cyklach wieloletnich, co daje możliwość dość szczegółowej oceny wpływu różnych układów pogody na plony, a także na określenie współdziałania czynników pogody z elementami agrotechniki jakie w tych eksperymentach są badane. Właśnie temu poświęcony jest głównie ten zeszyt, ale poszczególne prace konfrontują wyniki uzyskane w badaniach IUNG-PIB także z wynikami z innych ośrodków.

Całość przedstawionej w zeszycie problematyki związana jest głównie z zakresem zadania 2.4 programu wieloletniego „Ocena możliwości kształtowania poziomu i jakości produkcji roślinnej z uwzględnieniem przewidywanych zmian klimatu”. Dołączono też do zeszytu dwie prace z zadania programu wieloletniego 1.7 „Opracowanie i doskonalenie metod oceny oraz prognozowania skutków środowiskowych i produkcyjno-ekonomicznych WPR i zmian klimatu”, które poszerzają poruszoną w zeszycie tematykę o zagadnienia związane z możliwością wykorzystania technik modelowania do oceny zjawisk związanych z realizacją różnych technologii produkcji, oraz o nieodłącznie związane ze zmianami klimatu zjawisko emisji gazów cieplarnianych.

Kierownik zadania 2.4

dr hab. Jerzy Grabiński, prof. nadzw.

Jerzy Grabiński

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

PLONOWANIE ZBÓŻ W ZALEŻNOŚCI OD WARUNKÓW POGODOWYCH I REGIONALNYCH*

Słowa kluczowe: rośliny zbożowe, zmienność plonowania, warunki meteorologiczne, rejony kraju

Wstęp

Zboża w Polsce, podobnie jak w innych krajach, to najważniejsza grupa roślin uprawnych (9). Z tej grupy zajmującej w naszym kraju ponad 70% powierzchni zasiewów największe znaczenie mają: pszenica, jęczmień, pszenżyto, kukurydza, żyto i owies. Przy czym w przypadku trzech pierwszych gatunków znaczenie gospodarcze mają obie formy: jara i ozima. Dużą rolę w bilansie zbożowym w Polsce odgrywają także zasiewy mieszane – głównie zbóż jarych, które są szczególnie przydatne do ekstensywnej produkcji (9). Oprócz tego do roślin zbożowych zalicza się w naszym kraju grykę, mającą regionalnie dość duże znaczenie. Plony ziarna każdego z wymienionych gatunków kształtowane są przez technologię produkcji, ale często większy wpływ na ich wysokość ma przebieg pogody, którego najważniejszymi elementami są opady oraz warunki termiczne. Celem pracy jest określenie roli warunków pogody w kształtowaniu plonów ziarna różnych gatunków zbóż uprawianych w Polsce w oparciu o analizy statystyczne danych GUS, doniesienia literaturowe oraz wyniki wybranych badań realizowanych w IUNG-PIB uzyskanych w ramach programu wieloletniego.

Warunki pogody w Polsce

Czynniki pogodowe są w Polsce bardzo zróżnicowane regionalnie (7). Najlepsze warunki termiczne i związana z tym największa długość okresu wegetacyjnego występuje na krańcach południowych i zachodnich kraju – w Kotlinach Podkarpackich i wzdłuż całej Doliny Odry, gdzie przekracza 220 dni (6, 7). Natomiast

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.4 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

najzimniejszym rejonem Polski (oprócz rejonów górskich) są jej krańce północno-wschodnie (Suwalszczyzna). Tam długość okresu wegetacyjnego jest na ogół o około 2 dekady krótsza (7). Dłuższy okres wegetacyjny oznacza wcześniejsze jego rozpoczęcie wiosną i tym samym możliwość zastosowania wcześniejszego terminu siewu zbóż jarych, czy też rozpoczęcia wiosennych prac pielęgnacyjnych w zasiewach zbóż ozimych. Jednocześnie wcześniejsze rozpoczęcie wegetacji oznacza także wcześniejsze terminy zbiorów.

Największymi opadami charakteryzują się w Polsce rejony górskie i podgórskie, które jednak nie mają większego znaczenia rolniczego i w tej pracy nie będą szczegółowo omawiane. Natomiast w rejonach wyżynnych i nizinnych kraju częstszym problemem jest niedobór opadów niż ich nadmiar, przy czym zjawiska dużego niedoboru opadów nie dotyczą na ogół tych samych obszarów w kolejnych latach. Jednak są rejony, w których częstotliwość występowania zjawiska suszy jest wyraźnie większa. Znakomitym na to przykładem jest Pojezierze Kujawskie, które liczni autorzy (7) zgodnie wskazują jako rejon obecnie najsuchszy. Częstotliwość wystąpienia obniżonych opadów w stosunku do średniej jest tam zdecydowanie większa niż w pozostałej części kraju.

Podkreślając dużą wagę problemu niedoboru opadów nie można nie zauważyć, że okresowe nadmiary opadów również występują dość często w Polsce, ale ich negatywna rola zwykle związana jest raczej z dużymi zmianami jakościowymi ziarna zbóż, przy względnie niewielkim wpływie na wysokość plonów.

Wpływ warunków pogody w okresie zimy na plonowanie zbóż

Bardzo duży wpływ na plonowanie roślin zbożowych mają opady zimowe. W przypadku ograniczonych opadów wiosną, to właśnie zapasy wody pozimowej decydują o tym, czy na danym polu wystąpi stres suszy czy też nie (1, 6, 7, 8, 10). Ponadto opady w formie śniegu stanowią naturalną warstwę izolacyjną chroniącą rośliny przed niskimi temperaturami. Nierzadko, gdy duży spadek temperatury trwa krótko, to wystarczająca dla ochrony przed wymarznieniem zasiewu zboża jest warstwa śniegu nie przekraczająca 1 cm. Brak opadów śniegu w połączeniu z dużymi spadkami temperatur prowadzi nieuchronnie do powstania dużych zniszczeń, nierzadko związanych z koniecznością stosowania przesiewów. Przykładem tego jest sytuacja jaka miała miejsce w Polsce w roku 2016 (8). Rejonami bez większych strat w zasiewach zbóż ozimych były tylko województwa południowe kraju, oraz południowa i środkowa część województwa wielkopolskiego. Natomiast na pozostałej części Polski stwierdzono mniej lub bardziej silne uszkodzenia mrozowe. W przypadku zbóż uszkodzenia te wystąpiły przede wszystkim w jęczmieniu ozimym, (charakteryzującym się najniższym ze zbóż poziomem mrozoodporności), którego plantacje zostały w wyżej wymienionych rejonach na ogół całkowicie zniszczone. Stosunkowo duże straty stwierdzono także w pszenicy ozimej. Przy czym największe znaczenie miał tutaj poziom genetycznie uwarunkowanej mrozoodporności oraz

wielkość spadków temperatury. Na przykład w woj. lubuskim zostały uszkodzone w stopniu silnym lub bardzo silnym odmiany pszenicy charakteryzujące się poziomem mrozoodporności 2-2,5 (w skali 9°), ale w rejonach centralnych i północnych kraju, gdzie spadki temperatury były większe, uszkodzenia w stopniu silnym dotyczyły także pszenic charakteryzujących się poziomem mrozoodporności 4-5 (w skali 9°); (8). Pewien wpływ na zimowanie pszenicy miał stopień jej zaawansowania w rozwoju przed zimą tzn. lepiej zimowały zasiewy wczesne, silniej rozwinięte. Formy „przewódkowe”, których znaczenie w ostatniej dekadzie wyraźnie wzrosło (18) również zostały silnie uszkodzone przez mróz w rejonach bezśnieżnych (8).

Niskie temperatury nie mają na ogół większego wpływu na plonowanie żyta, którego mrozoodporność jest najwyższa ze zbóż (8, 9). Natomiast groźne są dla tego gatunku sytuacje związane z długim zaleganiem śniegu.

Jak wynika z powyższego opisu, opady śniegu zimą są pożądane, ale jeśli są one bardzo duże to mogą być powodem dużych strat, na przykład spowodowanych wystąpieniem pleśni śniegowej, niebezpiecznej zwłaszcza dla wczesnych siewów zbóż ozimych, głównie żyta i pszenżyta. Choroba ta związana jest z zaleganiem pokrywy śniegowej przez okres przekraczający kilka tygodni. Pleśń śniegowa może obniżyć plon ziarna nawet o 50%. Powoduje przerzedzenie zasiewów i niedorozwój roślin. Sprawcą choroby jest grzyb występujący w dwóch stadiach rozwojowych: workowym - *Monographella nivalis* i konidialnym - *Microdochium nivale*. Po stopnieniu śniegów, wiosną widać placowo zmarłe rośliny, które są przyciśnięte do ziemi i pokryte brudnobiałym lub jasnoróżowym nalotem grzybni i zarodników. Rośliny porażone obumierają, a te które przeżyją są bardzo osłabione, mają uszkodzony węzeł krzewienia i w związku z tym ograniczoną możliwość regeneracji. Zwykle straty wywołane pleśnią śniegową mają charakter regionalny, a na konkretnych polach występują jedynie w obniżeniach terenu, gdzie tworzą się często zaspy śniegowe.

Plonowanie zbóż w zależności od rejonu

Jak potwierdzają liczne eksperymenty polowe (także autora tej pracy) w danym rejonie, w kolejnych latach warunki pogody są nierzadko diametralnie różne (2, 3, 4, 6, 8, 14). Dlatego dla określenia rzeczywistej roli warunków pogody w kształtowaniu plonów zbóż w poszczególnych rejonach należy analizować dłuższe okresy czasowe. Grabiński (7) w swoich badaniach dla określenia roli regionu w kształtowaniu plonów zbóż wziął pod uwagę okres dziesięcioletni. Z badań tego autora wynika, że wśród rejonów nizinnych i wyżynnych zboża ozime wydają najwyższe plony w rejonie Polski środkowo-zachodniej (oprócz jęczmienia ozimego) oraz w rejonie północno-wschodnim (oprócz żyta i jęczmienia ozimego). Dobre warunki do uzyskiwania wysokich plonów zbóż ozimych panują także w rejonie południowo-wschodnim (z wyjątkiem żyta); (tab.1). Ten sam autor (7) zauważa również, że w większości rejonów do najplenniejszych gatunków zbóż ozimych należy pszenica ozima i pszenżyto, a w rejonie I, V i VI także jęczmień, natomiast w rejonach podgórskich

pszenżyto i jęczmień (tab. 1). Żyto w każdym rejonie plonuje najniżej, co ma jednak związek z przeznaczaniem go (nawet w eksperymentach) na najgorsze gleby. W dalszej części pracy podany zostanie przykład doświadczeń, w których mieszańcowe formy żyta uprawiane na dobrej glebie przewyższały plennością pozostałe gatunki zbóż ozimych.

W omawianych badaniach określono także średnią plenność w regionach poszczególnych gatunków zbóż jarych. Najmniej korzystnym dla uprawy tej formy zbóż okazał się rejon środkowo-wschodni oraz południowo-zachodni. Ze wszystkich zbóż jarych najmniej stabilnie plonował owies (7).

Tabela 1

Plonowanie zbóż ozimych w różnych rejonach kraju (COBORU – średnia z lat 1990-2000)

Rejon wg COBORU								
	I*	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Pszenica ozima								
Średnia	66,2	72,62	71,16	67,25	67,99	70,89	60,26	66,91
Odchylenie standardowe	7,21	8,23	7,04	4,81	5,71	5,24	7,43	8,35
Minimum	55	62,6	60,4	56,8	57,1	61,2	45,9	52,3
Maksimum	82,2	89,4	82,2	73,4	74,1	77,2	71,4	79,3
Żyto ozime								
Średnia	62,51	60,15	65,48	60,10	61,92	57,80	61,82	59,55
Odchylenie standardowe	7,05	6,84	6,44	4,60	5,11	8,55	9,01	7,28
Minimum	55,10	49,40	57,60	52,70	48,90	44,00	48,10	46,20
Maksimum	79,40	69,10	79,40	67,90	69,20	75,00	77,30	75,00
Pszenżyto ozime								
Średnia	70,56	76,55	72,40	67,19	66,38	70,16	66,38	68,98
Odchylenie standardowe	5,33	10,92	7,75	5,89	6,49	7,98	6,49	7,33
Minimum	62,1	63,9	58,1	57,4	54,7	58,6	54,7	58,6
Maksimum	81	100,2	84,1	77,4	74,7	82	74,7	80,5
Jęczmień ozimy								
Średnia	70,16	66,47	63,45	59,98	69,29	70,00	68,11	70,07
Odchylenie standardowe	7,34	10,45	11,46	8,23	6,96	6,83	8,57	7,56
Minimum	57,5	50,9	44,5	47,1	52,5	60,7	52,5	60,7
Maksimum	79,9	84,2	78	71,6	75,9	83,1	75,9	83,1

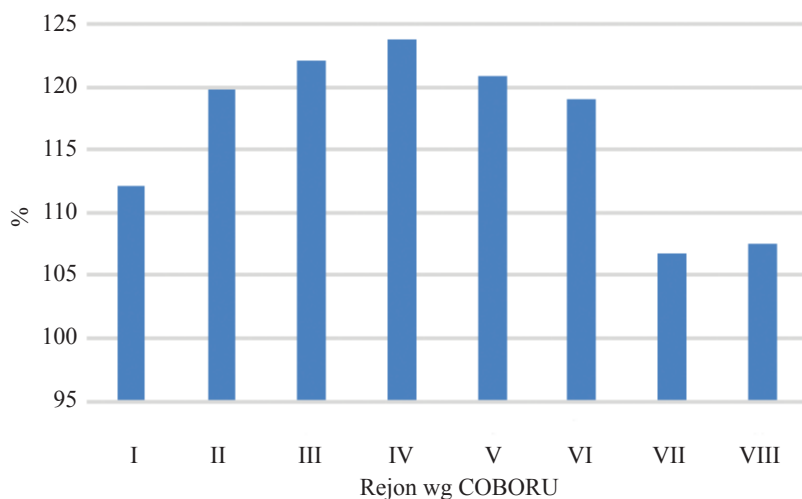
*Rejony COBORU:

I – Północno-zachodni; II – Północno-wschodni; III – Środkowo-zachodni; IV – Środkowo-wschodni; V – Południowo-zachodni; VI – Południowo-wschodni; VII – Sudecki; VIII – Karpacki

Źródło: Grabiński i Mazurek, 2001 (7)

W naszych warunkach klimatycznych zboża jare są wyraźnie mniej plenne niż zboża ozime (10), co związane jest bezpośrednio z mniejszą odpornością na suszę.

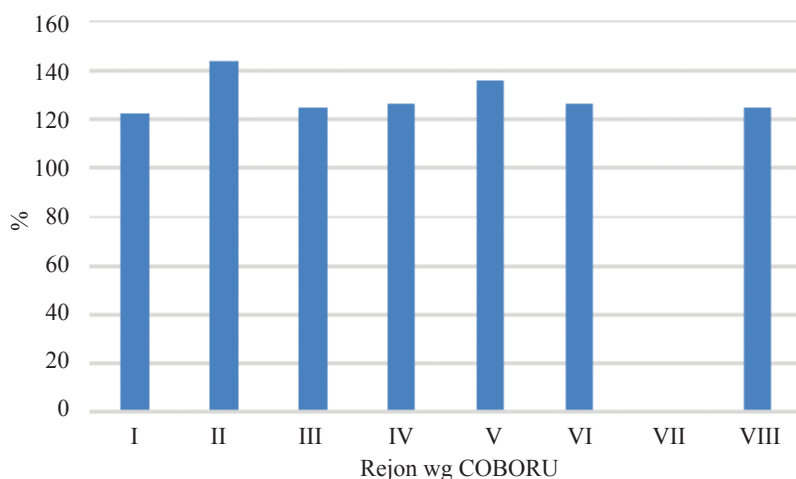
Mimo to ich popularność jest stosunkowo duża zwłaszcza w rejonach, gdzie odsetek przedplonów późno schodzących z pola jest duży (np. w rejonach z produkcją buraka cukrowego). W przypadku pszenicy, najważniejszego gospodarczo gatunku wyższość formy ozimej nad jara zaznacza się najsilniej w rejonie IV (najślabsze gleby); (10), a najslabiej w rejonach podgórskich (VII i VIII) oraz w rejonie I (północno-zachodnim); (rys.1).



Rys. 1. Plonowanie formy ozimej pszenicy w stosunku do formy jarej tego gatunku

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych COBORU (17)

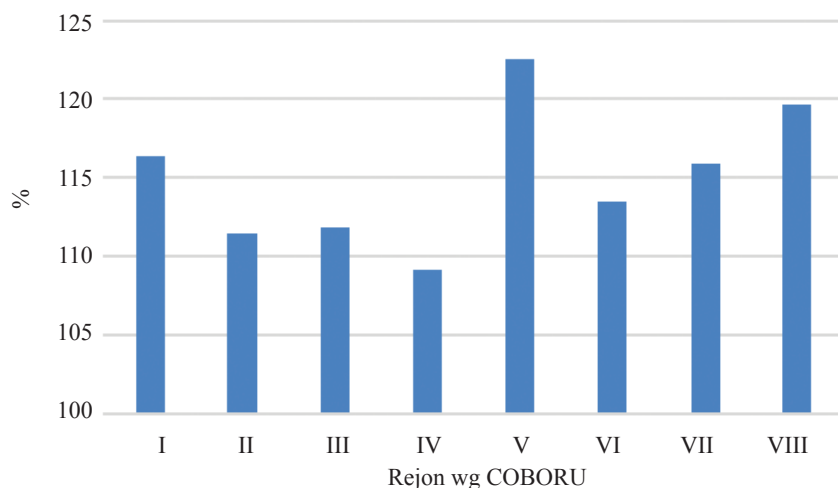
Różnice w plenności ozimej i jarej formy pszenżyta w każdym z rejonów przekraczały 20%, a w rejonie północno-wschodnim, najzimniejszym w naszym kraju – aż 40% (rys. 2).



Rys. 2. Plonowanie formy ozimej pszenżyta w stosunku do formy jarej tego gatunku (w %)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych COBORU (17)

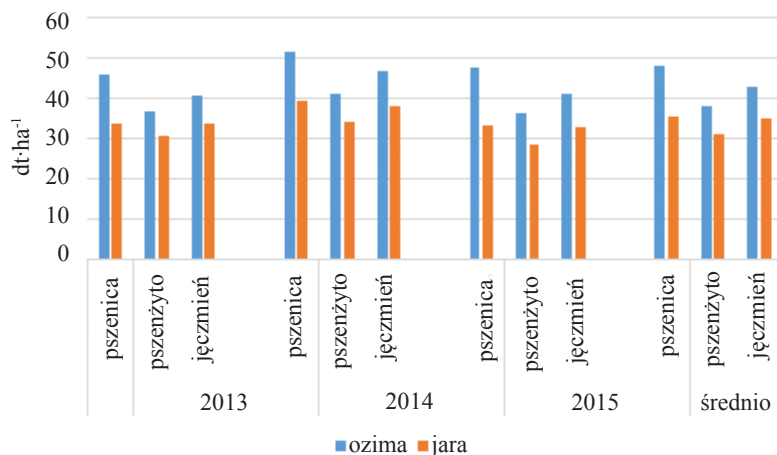
Przewaga jęczmienia ozimego nad jarym pod względem plenności najsilniej zaznaczyła się w rejonach największej popularności pierwszej z wymienionych form, tzn. w rejonie południowo-zachodnim i północno-zachodnim. Natomiast w rejonie środkowo-wschodnim (IV) różnica w poziomie plonów obu form omawianego gatunku była względnie mała (rys. 3).



Rys. 3. Plonowanie formy ozimej jęczmienia w stosunku do formy jarej tego gatunku (w %)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych COBORU (17)

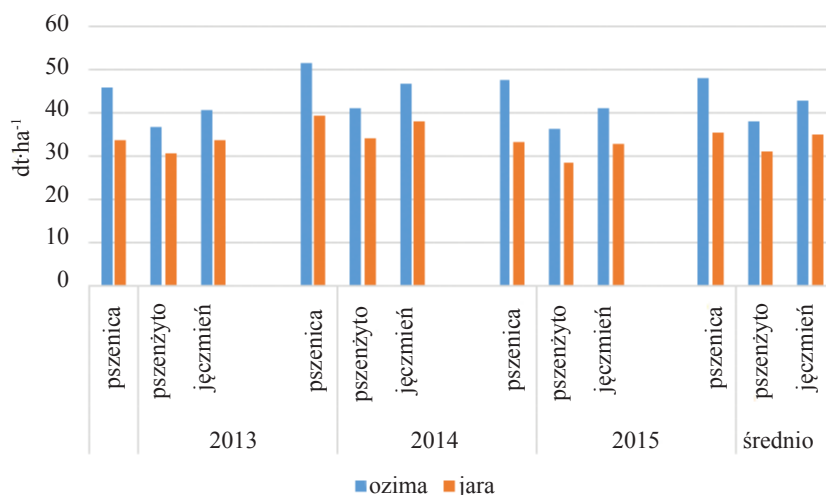
Na potrzeby realizacji tej pracy wykonano także ocenę różnic w plonowaniu form ozimych i jarych zbóż średnio na poziomie kraju na podstawie danych GUS z ostatnich lat. Wynika z niej, że wyższość formy ozimej nad jarą pod względem plenności najsilniej zaznacza się w przypadku pszenicy. Plon pszenicy ozimej z 3 lat był średnio w kraju wyższy od jarej o 26% (rys. 4).



Rys. 4. Plony form ozimych i jarych pszenicy, pszenżyta i jęczmienia

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS (12)

Omawiając problematykę wpływu warunków pogody i plonowanie zbóż nie można nie wspomnieć o mieszankach zbożowych, których rolą w gospodarstwach jest właśnie między innymi stabilizowanie zbiorów w warunkach dużej zmienności pogody. Najbardziej popularną jest mieszanka jęczmienia jarego z owsem. Z najnowszych danych GUS (rys. 2) wynika, że plenność mieszanek jest w praktyce nieco niższa niż owsa. Najprawdopodobniej wpływ na to ma jednak nie fakt ich niższego potencjału plonotwórczego, ale zwykle bardziej ekstensywna niż w przypadku siewów czystych technologia produkcji (rys. 5).



Rys. 5. Plonowanie zbóż jarych i ich mieszanek w latach 2013-2014

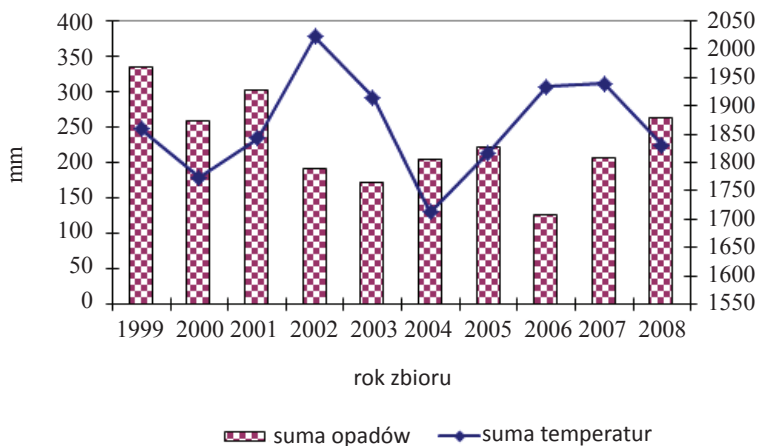
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS (12)

Porównanie plenności gatunków zbóż w wieloletnim eksperymencie łanowym

Dla określenia roli warunków pogody w kształtowaniu plenności roślin w uprawie polowej najlepiej jest przeprowadzić stacjonarny, wieloletni eksperyment. Warunek ten spełnia eksperyment łanowy przeprowadzony w RZD Osiny w latach 1998-2008, na glebie zaliczanej do kompleksu żytznego bardzo dobrego o składzie mechanicznym piasku gliniastego mocnego, o wysokiej zawartości składników pokarmowych i uregulowanym pH (11). Poszczególne gatunki były uprawiane według technologii o różnej intensywności, ale w tej ocenie uwzględniona zostanie tylko technologia średnio-intensywna. Zboża ozime (pszenica, pszenżyto i żyto) wysiewano po rzepaku ozimym, natomiast zboża jare (pszenica, jęczmień, owies) po zbożach. Wszystkie zabiegi były wykonywane za pomocą maszyn i narzędzi stosowanych w praktyce rolniczej.

Warunki atmosferyczne w analizowanym okresie były bardzo zróżnicowane, co obrazuje poniższy wykres (rys. 6). W 1999 roku, najobfitszym w opady spadło

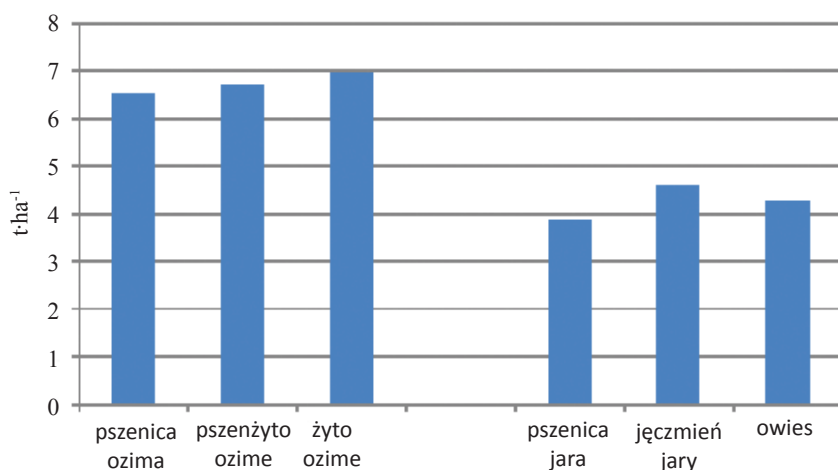
w okresie wegetacji wiosennej ponad 330 mm deszczu. Niewiele mniejsze opady w tym okresie stwierdzono także w roku 2001 (302 mm), natomiast zdecydowanie najmniejsze w roku 2006, w którym suma wiosennych opadów była prawie trzykrotnie mniejsza niż w wymienionych latach (rys. 6). Różnice w zakresie sumy temperatur były relatywnie mniejsze. Pomiędzy najzimniejszym rokiem 2004 i najcieplejszym 2002 różnica w zakresie wiosennej sumy temperatur nie przekroczyła 20 % (rys. 6).



Rys. 6. Sumy temperatur i opadów w okresie kwiecień-lipiec (Osiny 1999-2008)

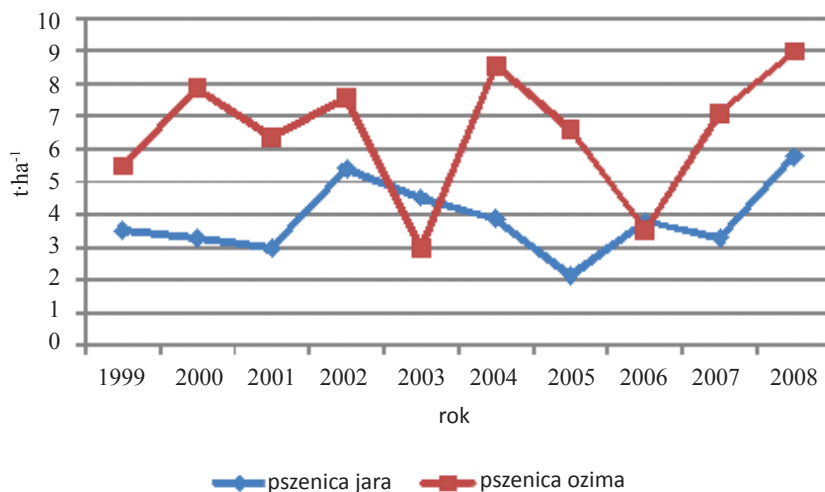
Źródło: Grabiński, 2009 (11)

Średnio za okres badań najwyższym plonem ziarna spośród zbóż jarych charakteryzował się jęczmień, a spośród ozimych żyto mieszańcowe (rys. 7).



Rys. 7. Średnie piony ziarna zbóż ozimych i jarych RZD Osiny (1998-2008)

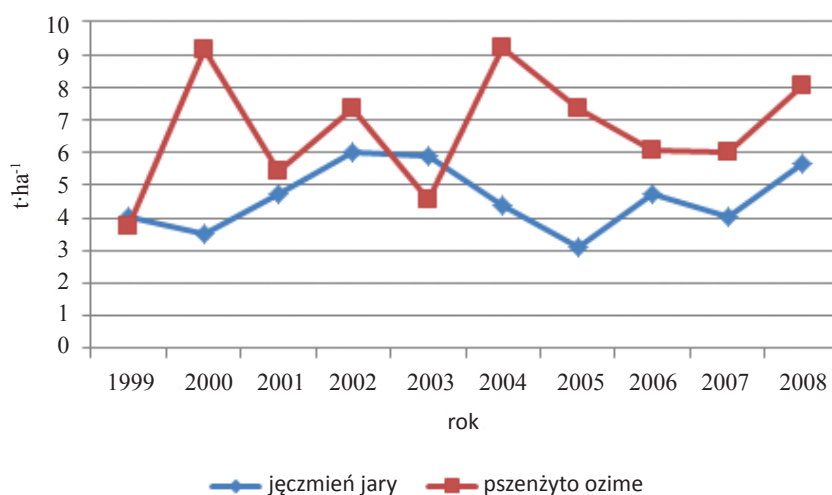
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS (12)



Rys. 8. Plonowanie pszenicy ozimej i jarej uprawianego według technologii średnio-intensywnej (RZD Osiny 1999-2008)

Źródło: opracowanie własne

Plony pszenicy ozimej były na ogół zdecydowanie wyższe niż jarej. Tylko dwukrotnie (lata 2003 i 2006) z uwagi na złe warunki zimowania stwierdzono odstępstwo od tej zasady, kiedy to plony ziarna pszenicy ozimej były niższe lub równe pszenicy jarej (rys. 8). Najwyższy plon pszenicy ozimej i jarej osiągnięto w 2008, w którym opady w okresie strzelanie w źdźbło-kłoszenie wyniosły 95,6 mm i należały do zdecydowanie najwyższych w całym okresie badań.

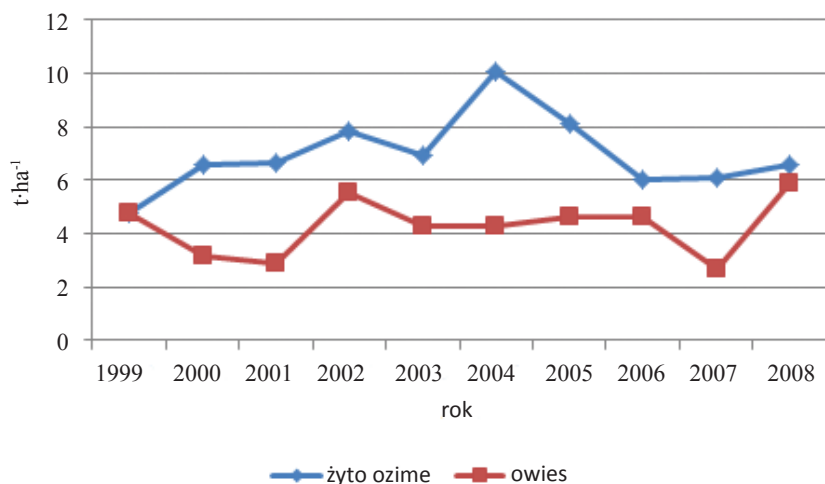


Rys. 9. Plonowanie pszenżyta ozimego i jęczmienia jarego uprawianego według technologii średnio-intensywnej (RZD Osiny 1999-2008)

Źródło: opracowanie własne

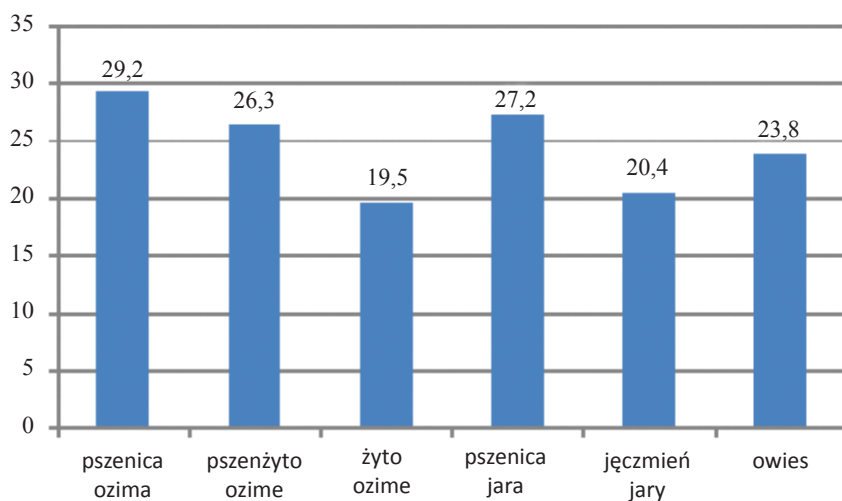
Pszenżyto ozime na ogół zdecydowanie przewyższało pod względem plonów inny gatunek paszowy jakim jest jęczmień jary. Wyjątkiem był rok 1999 i wymieniany już 2003 o niekorzystnych warunkach zimowania (rys. 9).

Niekorzystny dla pszenżyta rok 1999 nie sprzyjał także wysokiemu plonowaniu żyta ozimego. W wymienionym roku plony ziarna tego gatunku osiągnęły poziom zbliżony do owsa. Najwyższy plon ziarna żyta ($10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) osiągnięty został w 2004 roku (rys. 10), w którym opady w okresie strzelanie w źdźbło-kłoszenie były wprawdzie bardzo niskie, ale w okresie kłoszenie-dojrzałość woskowa były intensywne.



Rys. 10. Plonowanie żyta ozimego i owsa uprawianego według technologii średnio-intensywnej (RZD Osiny 1999-2008)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 11. Współczynnik zmienności plonu ziarna różnych gatunków zbóż w latach 1999-2008 (RZD Osiny)

Źródło: opracowanie własne

Współczynnik zmienności plonów w badanym dziesięcioleciu wahał się w stosunkowo wąskich granicach, nie przekraczających 10%. Spośród zbóż ozimych najmniejszym współczynnikiem zmienności charakteryzowały się plony ziarna żyta (19,5%) a spośród jarych – jęczmień (20,4%). Natomiast niezależnie od formy największą zmienność plonów stwierdzono u obu form pszenicy (rys. 11).

W oparciu o dane pochodzące z omawianego eksperymentu Grabiński (11) określił związki pomiędzy przebiegiem pogody, a poziomem plonów poszczególnych gatunków. Wynika z nich, że duża ilość opadów na polach o dużej pojemności wodnej może być czynnikiem wpływającym istotnie negatywnie na plonowanie zbóż. Nawet w przypadku najbardziej wymagającego owsa korelacja ilości opadów z plonem ziarna w okresie strzelanie w źdźbło-wiechowanie, a więc w czasie dużego zapotrzebowania na wodę, ze względu na intensywny wzrost, była wyraźnie ujemna (tab. 2). Dodatni związek plonowania z opadami określony dla owsa stwierdzono dopiero dla okresu wiechowanie-dojrzałość woskowa. Ponadto wykazano, że związek plonów poszczególnych gatunków zbóż ozimych z opadami w okresach intensywnego wzrostu (od fazy strzelania w źdźbło) jest wyraźnie słabszy. Istotne korelacje ujemne stwierdzono tylko w przypadku żyta, i to zarówno w okresie strzelanie w źdźbło-kłoszenie, jak i kłoszenie-dojrzałość woskowa (tab. 3).

Tabela 2

Współczynniki korelacji plonu ziarna poszczególnych gatunków zbóż jarych z ilością opadów i współczynnikiem Sielianinowa w różnych okresach wegetacji

Wyszczególnienie	Plon ziarna					
	Pszenica jara	Jęczmień jary	Owies	Pszenica jara	Jęczmień jary	Owies
Opady (współczynnik Sielianinowa) w fazie strzelanie w źdźbło-kłoszenie	-0,588*	-0,442	-0,511	<u>-0,578**</u>	<u>-0,643</u>	<u>-0,465</u>
Opady (współczynnik Sielianinowa) w fazie kłoszenie-dojrzałość woskowa	0,144	0,168	0,504	<u>0,054</u>	<u>0,134</u>	<u>0,524</u>

* – pogrubiono korelacje istotne

** – podkreślono współczynniki korelacji dla plonów i współczynnika Sielianinowa

Źródło: Grabiński, 2009 (11)

Tabela 3

Współczynniki korelacji plonu ziarna poszczególnych gatunków zbóż ozimych z ilością opadów i współczynnikiem Sielianinowa w różnych okresach wegetacji

Wyszczególnienie	Plon ziarna					
	Pszenica ozima	Pszenżyto ozime	Żyto	Pszenica ozima	Pszenżyto ozime	Żyto
Opady (współczynnik Sielianinowa) w fazie strzelanie w źdźbło-kłoszenie	-0,228	-0,165	-0,361*	<u>-0,254**</u>	<u>-0,201</u>	<u>-0,398</u>
Opady (współczynnik Sielianinowa) w fazie kłoszenie-dojrzałość woskowa	0,202	-0,200	-0,281	<u>0,108</u>	<u>-0,292</u>	<u>-0,411</u>

* – pogrubiono korelacje istotne

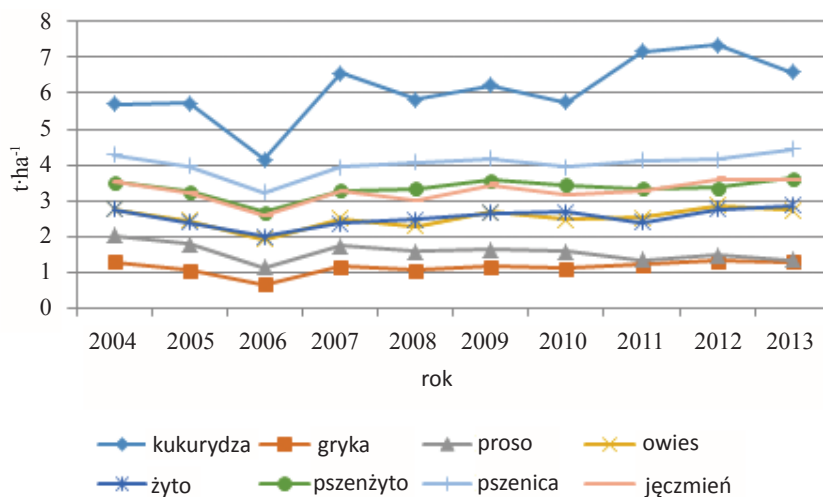
** – podkreślono współczynniki korelacji dla plonów i współczynnika Sielianinowa

Źródło: Grabiński, 2009 (11)

Zmienność plonów ziarna zbóż w Polsce

Dla określenia roli klimatu w kształtowaniu średnich w kraju plonów ziarna poszczególnych gatunków zbóż wykorzystano dane GUS za okres dziesięciolecia 2004-2013 (12). Z analiz tych wynika, że niezależnie od roku gatunkiem zdecydowanie najplenniejszym jest w naszym kraju kukurydza a następnie pszenica (rys. 12). Odchylenie standardowe określone dla plonów zbóż podstawowych są stosunkowo podobne (tylko nieco wyższe w przypadku zbóż ozimych niż jarych) (tab. 4). Zdecydowanie największe odchylenie standardowe ($0,86 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) stwierdzono u najplenniejszej kukurydzy. Wykonana ocena współczynnika zmienności wykazała, że największą zmiennością plonów ziarna charakteryzują się gryka i proso i tylko nieco mniejszą kukurydza. Spośród zbóż podstawowych najwyższą zmienność plonów stwierdzono u owsa, natomiast najniższą u pszenicy i pszenżyta. Należy jednak zaznaczyć, że przedstawione w tabeli 4 analizy nie uwzględniają podziału gatunków na formy.

Tabela 4



Rys. 12. Plony ziarna roślin zbożowych w Polsce w latach 2004-2013

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS (12)

Analiza statystyczna plonów roślin zbożowych w Polsce w latach 2004-20013

	Odchylenie standardowe	Średnia	Plony relatywne* w %	Współczynnik zmienności
Kukurydza	0,863683	6,10574	100	14,14543
Gryka	0,178818	1,1364	18,6	15,73546
PROSO	0,244709	1,56342	25,6	15,65214
Owies	0,25813	2,52301	41,3	10,23104
Żyto	0,248527	2,53753	41,6	9,794039
Pszenżyto	0,250906	3,34565	54,8	7,499481
Pszenica	0,301227	4,03143	66,0	7,471965
Jęczmień	0,291002	3,2625	53,4	8,919594

*- za 100% przyjęto plony ziarna kukurydzy

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS (12)

Podsumowanie

Reasumując należy stwierdzić, że warunki pogodowe są czynnikiem bardzo silnie wpływającym na poziom uzyskiwanych plonów ziarna zbóż, przy czym ten wpływ jest zróżnicowany regionalnie- nierzadko silnie. W związku z tym plony ziarna z różnych regionów wykazują sporą zmienność, różną dla poszczególnych gatunków. Największą zmiennością plonów spośród wszystkich roślin zbożowych charakteryzuje się w naszym kraju, coraz bardziej popularna kukurydza, oraz gatunki małoobszarowe – gryka i proso. Ze zbóż podstawowych pogoda wywiera stosunkowo największy wpływ na najcenniejszą na rynku pszenicę (obu form), natomiast najmniejszy na jęczmień jary i żyto.

Szczególne znaczenie dla plonowania formy ozimej zboża ma przebieg pogody zimą. Brak dostatecznych opadów śniegu w tym okresie może prowadzić nawet do całkowitego zniszczenia plantacji danego gatunku, przy czym ważną, pozytywną rolę w ograniczaniu skutków takiej sytuacji może odegrać dobór odmian. Wybór odmiany (gatunku) charakteryzującej się dużą zimotrwałością (mrozoodpornością) może nawet całkowicie wyeliminować niebezpieczeństwo strat zimowych i w związku z tym ograniczyć do minimum negatywny wpływ niekorzystnego przebiegu pogody na poziom plonowania.

Literatura

1. Deputat T., Marcinkowska I.: Wymagania termiczne pszenicy ozimej. Pam. Puł., 1999, **118**: 87-98.
2. Filipiak K., Kukuła S., Zarychta M.: Czynniki decydujące o produkcji jęczmienia jarego w Polsce. Pam. Puł., 1999, **118**: 83-91.
3. Gąsiorowska B., Koc G., Buraczyńska D., Struk K.: Wpływ warunków pogodowych na plonowanie zbóż uprawianych w rolniczej stacji doświadczalnej w Zawadach. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2013, **2/1**: 91-99.

4. Gąsiorowska, Płaza A., Makarewicz A., Cybulska A.: Wpływ warunków termiczno-opadowych na rozwój i plon owsa uprawianego w rejonie środkowo-wschodniej Polski. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2013, **2/1**: 53-63.
5. Gilewska M., Otremba K.: Wpływ warunków meteorologicznych na plonowanie zbóż ozimych uprawianych na glebach tworzących się na obszarach pogórnich. *Roczn. Glebozn.*, **LIX**, **2**: 56-61.
6. Górski T., Krasowicz S., Kuś J.: Glebowo-klimatyczny potencjał Polski w produkcji zbóż. *Pam. Puł.*, 1999, **114**: 127-142.
7. Grabiński J., Mazurek J.: Regionalne uwarunkowania produkcji zbożowej w Polsce. *Pam. Puł.*, 2001, **124**: 153-160.
8. Grabiński J.: Ocena stanu przezimowania głównych upraw polowych w Polsce wykonana w II dekadzie marca 2016 roku. http://iung.pulawy.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=1501:ocena-stanu-przezimowania-gownych-upraw-polowych-w-polsce-wykonana-w-ii-dekadzie-marca-2016-roku.
9. Grabiński J., Podolska G.: Stan aktualny i perspektywy zmian w produkcji zbóż w Polsce. *Studia i Raporty IUNG PIB, Puławy*, 2009, **14**: 55-70.
10. Grabiński J.: Porównanie plonowania zbóż jarych i ozimych. *Pam. Puł.*, 2002, **130**: 261-267.
11. Grabiński J.: Porównanie produktywności gatunków zbóż uprawianych w Polsce. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2009, **542**: 167-175.
12. GUS, Dane statystyczne.
13. Kozyra J.: System informacji o wpływie zmian klimatycznych na rolnictwo oraz metodach adaptacji. <http://www.klimat.iung.pulawy.pl/informacje-podstawowe/ogolna-charakterystyka-wplywu-zmiany-klimatu-na-rolnictwo>.
14. Lekan Sz., Terelak H., Strzelec H.: Zróżnicowanie warunków przyrodniczych rolnictwa w Polsce. *Fragm. Agron.*, 1996, **1**: 5-27.
15. Orzech K., Marks M., Dragańska E., Stępień A.: Plonowanie pszenicy ozimej w zależności od warunków pogodowych i różnych sposobów uprawy gleby średniej. *Ann. UMCS*, **LXIV(4)**: 122-129.
16. Skowera B., Kołodziej J.: Wpływ czynników termiczno-opadowych na plonowanie owsa w Kotlinie Orawsko-Nowotarskiej. *Biul. IHAR*. 2003, **229**: 185-192.
17. Syntezy wyników doświadczeń odmianowych. COBORU 1990-2000.
18. Wenda-Piesik A., Wasilewski P.: Reakcja pszenicy jarej Monsun i żyta jarego Bojko na późnojesienne terminy siewu. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2015, **580**: 149-159.

Adres do korespondencji:

*dr hab. Jerzy Grabiński, prof. nadzw.
Zakład Uprawy Roślin Zbożowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. (81) 4786 811
e-mail: jurek@iung.pulawy.pl*

Kazimierz Noworolnik

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

WPLYW TERMINU SIEWU W ASPEKCIE ZMIENNYCH WARUNKÓW POGODOWYCH NA PLONOWANIE JĘCZMIENIA JAREGO*

Słowa kluczowe: jęczmień jary, odmiany, termin siewu, warunki meteorologiczne, plon ziarna

Wstęp

Analizując zmienność plonów ziarna jęczmienia jarego pod wpływem różnych czynników siedliskowo-agrotechnicznych (na podstawie licznych doświadczeń polowych), można stwierdzić, że największe znaczenie w tym względzie mają warunki meteorologiczne i warunki glebowe (3, 20, 21, 28). Stwierdzenie to dotyczy też innych gatunków zbóż. Spośród czynników meteorologicznych w okresie wiosny, największy wpływ na plonowanie zbóż jarych ma ilość opadów, następnie temperatura powietrza i usłonecznienie (6, 15, 42, 43, 46). Warunki pogodowe w okresie zimy też mają znaczenie dla zbóż jarych. Obfite opady śniegu zapewniają duże zasoby wody w glebie, korzystnie oddziałujące na wzrost roślin po wschodach i w okresie krzewienia. Przedłużone trwanie mroźnej zimy jest przyczyną opóźnienia terminu siewu, ujemnie wpływając na plonowanie zbóż jarych. Znajomość współdziałań terminu siewu z gęstością siewu, właściwościami odmian i dawką azotu umożliwia łagodzenie niekorzystnych skutków opóźnienia terminu siewu zbóż jarych.

Wpływ różnych czynników agrotechnicznych na plonowanie jęczmienia jarego jest modyfikowany przez warunki pogodowe w okresie wiosny. Konkurencja o wodę między roślinami w łanie jęczmienia zależy głównie od gęstości siewu, oraz od jego terminu siewu. Im więcej roślin i źdźbeł na jednostce powierzchni, tym większe zapotrzebowanie łanu na wodę. W przypadku suszy, w krytycznym okresie zapotrzebowania na wodę, niekorzystne jest zbyt duże zwarcie łanu. Rozkrzewienie produkcyjne jęczmienia jarego zależy od terminu i gęstości siewu (19, 23, 25, 30, 31, 38, 39).

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.3 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Celem niniejszego opracowania jest ocena wpływu opóźnienia terminu siewu generowanego przez długość trwania warunków zimowych na plonowanie jęczmienia jarego oraz określenie współdziałań między warunkami meteorologicznymi, terminem siewu, głównymi czynnikami agrotechnicznymi i warunkami glebowymi.

Plonowanie jęczmienia jarego w zależności od warunków pogodowych i agrotechniki

W literaturze naukowej, odnośnie zależności plonowania jęczmienia jarego od czynników siedliskowych, znakomita większość prac dotyczy warunków glebowych, a wpływ warunków meteorologicznych prezentowany jest w nielicznych publikacjach. W syntezie 8-letnich doświadczeń mikropoletkowych (36) oceniono wpływ ilości opadów, temperatury powietrza, terminu siewu i gęstości siewu na plon ziarna i białka jęczmienia jarego. Wysokie plony uzyskano w latach o ilości opadów zbliżonej do średniej wieloletniej lub mniejszej od niej o 20%, pod warunkiem równomiernego rozłożenia opadów w okresie wegetacji. Niższe plony otrzymano w latach o zbyt dużej ilości opadów, zwłaszcza w czerwcu i lipcu. W latach wysokiego plonowania jęczmienia wystąpiły większe niższe jego plonu pod wpływem opóźnienia terminu siewu. Wpływ temperatury powietrza na plonowanie jęczmienia jarego był znacznie mniejszy niż wpływ ilości opadów. W latach o mniej korzystnych warunkach dla plonowania jęczmienia otrzymano wyższą zawartość białka w ziarnie.

W innych badaniach (8) określono wpływ ilości opadów na plonowanie jęczmienia jarego, w zależności od kompleksu glebowo-rolniczego. Na glebach kompleksów żytnich, zwłaszcza na żytnim bardzo słabym, stwierdzono ujemny wpływ małej ilości opadów na plon ziarna, ale na glebach kompleksu pszennego dobrego ten wpływ był nieistotny. Deficyt wody na glebach słabszych powodował zmniejszenie udziału w łanie roślin lepiej rozkrzewionych i o wysokich pędach kłosonośnych, które charakteryzowały się niższą liczbą ziaren w kłosie.

W badaniach nad wpływem niedoboru wody w glebie (w różnych fazach rozwoju roślin) na wzrost i wydajność jęczmienia jarego ustalono, że stres suszy jest najdotkliwszy dla niego w fazie strzelania w źdźbło i kłoszenia (6, 15, 40, 42, 43, 46). Zróżnicowanie wśród odmian jęczmienia pod względem ich tolerancyjności na suszę, wynika z niejednakowej wielkości systemu korzeniowego i współczynnika transpiracji. Odporność na suszę można zwiększyć stymulując budowę dużego systemu korzeniowego. O dynamice przyrostu korzeni decyduje zasobność gleby w potas (pierwiastek regulujący gospodarkę wodną rośliny), a ponadto zawartość azotu mineralnego w glebie i warunki jego pobierania z gleby. Dlatego ważne jest stosowanie optymalnych dawek nawozów mineralnych. W okresie suszy ważne jest też ograniczenie strat wody z gleby o charakterze spływowo-prześciąkowym. Większe możliwości magazynowania wody posiadają gleby zwarte, z dużym kompleksem

sorpcyjnym, dzięki wysokiej zawartości próchnicy i gruzelkowej strukturze gleby. Sprzyja temu nawożenie organiczne i wapnowanie gleby.

W ramach doświadczalnictwa terenowego w Wojewódzkich Ośrodkach Postępu Rolniczego i późniejszych Ośrodkach Doradztwa Rolniczego, koordynowanych przez IUNG-PIB w Puławach, przeprowadzono serię polowych doświadczeń agrotechnicznych z jęczmieniem jarym. W syntezie wyników tych badań (20) określono wpływ nawożenia azotem i gęstości siewu na plon ziarna i białka jęczmienia jarego w zależności od warunków glebowych, właściwości odmian i terminu siewu. Dla niniejszego opracowania, na podstawie tej bazy wyników, przedstawiono plony ziarna jęczmienia jarego (średnio z odmian) w zależności od ilości opadów, temperatury powietrza, jakości gleby, dawki azotu, terminu i gęstości siewu (tab. 1-4). Do opracowania wykorzystano wyniki 197 doświadczeń jednorocznych wykonanych w pobliżu Stacji Meteorologicznej. Do właściwych obliczeń doświadczenia te podzielono, w zależności od ilości opadów w maju i czerwcu, na 3 grupy: 1 – duża ilość opadów (większa, o co najmniej 10% od średniej wieloletniej krajowej), 2 – ilość opadów zbliżona do średniej wieloletniej, 3 – mała ilość opadów (mniejsza, o co najmniej 10% od średniej wieloletniej krajowej). Ponadto, w zależności od sumy temperatur w wymienionym okresie, utworzono podgrupy: a – z temperaturą wyższą i b – z temperaturą niższą od średniej wieloletniej krajowej.

Tabela 1

Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego w zależności od warunków glebowych i warunków meteorologicznych

Ilość opadów	Temperatura powietrza	Kompleks glebowo-rolniczy		
		pszenny dobry	żytni b. dobry	żytni dobry
Duża	wyższa	4,92	4,47	4,25
	niższa	4,68	4,16	4,03
Średnia	wyższa	5,03	4,58	4,21
	niższa	4,91	4,39	4,25
Mała	wyższa	4,25	3,77	3,26
	niższa	4,50	3,98	3,67

Źródło: opracowanie własne

Stwierdzono duży wpływ warunków glebowych i ilości opadów na plonowanie jęczmienia jarego, przy mniejszym znaczeniu temperatury (tab. 1). Największe plony ziarna jęczmienia jarego uzyskano na glebach kompleksu pszenno dobrego, a najmniejsze na glebach kompleksu żytniego dobrego. Wysokie plony uzyskano w latach o ilości opadów zbliżonej do średniej wieloletniej lub wyższej od średniej wieloletniej, a znacznie niższe plony otrzymano w warunkach małej ilości opadów. W warunkach dużej ilości opadów korzystna dla plonowania jęczmienia jarego okazała się wyższa temperatura, natomiast w warunkach małej ilości opadów było od-

wrotnie. Zbyt duża ilość opadów sprzyja silniejszemu wyleganiu roślin i większemu nasileniu chorób, co wpływa ujemnie na wielkość i jakość plonu ziarna jęczmienia. Jeszcze bardziej ujemnie wpływa na to znaczny niedobór wody dla roślin.

Reakcja jęczmienia jarego na dawkę azotu zależała od ilości opadów w krytycznym okresie (maj-czerwiec); (tab. 2). W warunkach dużej ilości opadów nie stwierdzono wzrostu jego plonu pod wpływem dużej dawki azotu. Dodatni wpływ większych dawek azotu na plonowanie jęczmienia stwierdzono w warunkach średniej ilości opadów (niezależnie od temperatury) i w warunkach małej ilości opadów, przy niższej temperaturze.

Tabela 2

Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego w zależności od nawożenia azotem i warunków meteorologicznych

Ilość opadów	Temperatura powietrza	Nawożenie azotem ($kg N \cdot ha^{-1}$)		
		30	60	90
Duża	wyższa	4,48	4,55	4,37
	niższa	4,32	4,40	4,18
Średnia	wyższa	4,16	4,47	4,60
	niższa	4,14	4,43	4,54
Mała	wyższa	3,50	3,61	3,65
	niższa	3,63	3,92	4,03

Źródło: opracowanie własne

Wpływ gęstości siewu na plonowanie jęczmienia był zależny od ilości opadów (tab. 3). Wyraźny wzrost plonu ziarna przy dużej gęstości siewu uzyskano w warunkach małej ilości opadów. Przy dużej ilości opadów najwyższe plony jęczmienia jarego stwierdzono na średniej gęstości siewu. Reakcja jęczmienia jarego na gęstość siewu nie zależała od temperatury.

Ilość opadów modyfikowała też reakcję jęczmienia jarego na termin siewu (tab. 4). Większe zniżki jego plonu ziarna stwierdzono w warunkach małej ilości opadów i większej sumy temperatur w okresie maj – czerwiec, a mniejsze zniżki plonu – w warunkach dużej ilości opadów (niezależnie od temperatury).

W podobnej syntezie wyników badań nad jęczmieniem jarym ze starszymi odmianami (28), oprócz plonu ziarna analizowano też zawartość białka w ziarnie i plon białka. Układ wyników plonu ziarna pod wpływem ilości opadów, temperatury, warunków glebowych, nawożenia azotem i gęstości siewu był zbliżony do wyników wyżej omówionej syntezy. Wyższą zawartość białka w ziarnie jęczmienia jarego uzyskano w warunkach małej ilości opadów, większej sumy temperatur, większej dawki azotu i na gorszych glebach. Wzrost plonu białka jęczmienia przy dużej dawce azotu ($90 \text{ kg N} \cdot ha^{-1}$) był zależny głównie od ilości opadów,

a w przypadku ich niedoboru, także od temperatury. Największy wzrost tego plonu pod wpływem dużej dawki azotu uzyskano w warunkach średniej ilości opadów (niezależnie od temperatury), zwłaszcza na gorszych glebach. W warunkach małej ilości opadów korzystna była niższa suma temperatur. Niewielki wpływ dawki azotu na plon białka jęczmienia obserwowano w warunkach dużej ilości opadów, na lepszych glebach, gdzie wystąpiło wzmożone wyleganie roślin i porażenie chorobami, co niekorzystnie oddziaływało na efektywność większych dawek azotu.

Tabela 3

Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego w zależności od gęstości siewu i warunków meteorologicznych

Ilość opadów	Temperatura powietrza	Gęstość siewu (liczba ziaren na $1 m^2$)		
		240	310	380
Duża	wyższa	4,37	4,49	4,42
	niższa	4,28	4,33	4,21
Średnia	wyższa	4,22	4,47	4,60
	niższa	4,16	4,44	4,48
Mała	wyższa	3,58	3,91	4,17
	niższa	3,92	4,24	4,43

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4

Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego w zależności od terminu siewu i warunków meteorologicznych

Ilość opadów	Temperatura powietrza	Termin siewu		
		25 III-5 IV	6 IV-15 IV	16 IV-23 IV
Duża	wyższa	4,63	4,47	4,20
	niższa	4,46	4,35	4,01
Średnia	wyższa	4,66	4,49	4,12
	niższa	4,57	4,45	4,06
Mała	wyższa	4,32	3,96	3,43
	niższa	4,48	4,27	3,72

Źródło: opracowanie własne

Reakcja odmian jęczmienia i innych zbóż jarych na termin siewu

Potencjalny plon ziarna danej odmiany zależy od różnych cech tworzących pokrój roślin. Szczególnie duże znaczenie ma zdolność do rozkrzewienia produkcyjnego roślin, czyli do wytworzenia optymalnie dużej liczby kłosów w łanie. Ponadto ważne są też cechy produkcyjności kłosa. Zróżnicowanie międzyodmianowe cech morfologicznych jęczmienia i innych zbóż może generować zróżnicowaną reakcję odmian na główne czynniki agrotechniczne (w tym termin siewu). Stwierdzono słabszą reakcję na wzrastającą gęstość siewu silniej krzewiących się odmian

jęczmienia, natomiast słabiej krzewiące się odmiany reagowały zwiększeniem plonu na wzrost dawek nawożenia azotem (13, 20, 26, 27, 33, 39). Różna zdolność odmian jęczmienia jarego do rozkrzewienia produkcyjnego roślin powoduje też ich niejednakową reakcję na opóźnienie terminu siewu. Częste przedłużanie się w różnych rejonach okresu trwania warunków zimowych wymusza stosowanie opóźnionych terminów siewu zbóż jarych. W doświadczeniach należy więc porównywać niżki plonu ziarna nowych odmian jęczmienia przy opóźnieniu terminu siewu, w powiązaniu z cechami morfologicznymi roślin silnie wpływającymi na plon ziarna.

W latach 2008-2011 przeprowadzono doświadczenia mikropoletkowe z jęczmieniem jarym na polu doświadczalnym Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB w Puławach, na glebie kompleksu pszennego dobrego (24, 25). Porównywano odmiany: Basza, Rubinek, Signora, Serwal, Xanadu (seria I) i Bordo, Henrike, KWS Olof, Suweren i Victoriana (seria II) pod względem cech decydujących o wielkości plonu ziarna oraz ich reakcji na termin siewu: 5-10 IV i 15-20 IV. Wśród badanych odmian wystąpiło znaczne zróżnicowanie rozkrzewienia produkcyjnego roślin i liczby kłosów na jednostce powierzchni oraz plonu ziarna (tab. 5, 6, 7). Mniejsze zróżnicowanie dotyczyło liczby ziaren w kłosie i masy 1000 ziaren. Wysokim plonem ziarna, dzięki silniejszemu rozkrzewieniu roślin i liczbie kłosów, charakteryzowały się odmiany: KWS Olof, Suweren i Signora. Najwyższą liczbą ziaren w kłosie wyróżniały się odmiany: Rubinek i Bordo, a najwyższą masą 1000 ziaren – odmiana Signora. Opóźnienie terminu siewu wpłynęło ujemnie na liczbę kłosów na jednostce powierzchni i na plon ziarna wszystkich odmian, dodatnio na zawartość białka w ziarnie, natomiast nie powodowało istotnych zmian liczby ziaren w kłosie, masy 1000 ziaren i celności ziarna. Do odmian bardziej tolerancyjnych na opóźnienie terminu siewu (wykazujących nieistotne niżki plonu) można zaliczyć Baszę, Xanadu, Suweren i KWS Olof, czyli odmiany silniej krzewiące się.

Tabela 5

Wpływ terminu siewu na cechy odmian jęczmienia jarego (2009-2010)

Odmiany	Termin siewu	Współczynnik rozkrzewienia produkcyjnego	Liczba ziaren w kłosie	Plon ziarna (g·m ²)	Zawartość białka w ziarnie (% s.m.)	Celność ziarna (%)
Basza	5-10 IV	3,20	19,6 a*	883 a	10,9 a	81,8 a
	15-20 IV	3,08	19,3 a	798 a	11,1 a	81,4 a
Rubinek	5-10 IV	2,87	21,3 a	950 a	11,7 b	87,8 a
	15-20 IV	2,36	21,7 a	805 b	12,5 a	91,0 a
Signora	5-10 IV	3,13	21,6 a	974 a	10,4 b	87,4 a
	15-20 IV	2,70	20,2 a	825 b	11,2 a	89,6 a
Serwal	5-10 IV	3,02	19,6 a	864 a	11,2 a	83,8 a
	15-20 IV	2,68	18,9 a	759 b	11,7 a	86,8 a
Xanadu	5-10 IV	3,24	19,8 a	878 a	10,9 a	83,9 a
	15-20 IV	3,01	20,0 a	821 a	11,3 a	84,3 a

* Wartości w obrębie danej odmiany oznaczone innymi literami różnią się istotnie

Źródło: Noworolnik, 2013 (25)

Tabela 6

Wpływ terminu siewu na cechy odmian jęczmienia jarego (2010-2011)

Odmiany	Termin siewu	Współczynnik rozkrzewienia produkcyjnego	Liczba ziaren w kłosie	Plon ziarna (g·m ²)	Zawartość białka w ziarnie (% s.m.)	Celność ziarna (%)
Bordo	5-10 IV	3,01	21,2 a*	903 a	10,5 b	83,8 a
	15-20 IV	2,52	21,6 a	760 b	11,1 a	86,5 a
Henrike	5-10 IV	3,03	19,4 a	897 a	10,5 a	86,9 a
	15-20 IV	2,62	20,6 a	803 b	11,0 a	87,9 a
KWS Olof	5-10 IV	3,43	19,5 a	952 a	11,4 a	82,3 a
	15-20 IV	3,06	20,3 a	884 a	11,8 a	81,9 a
Suweren	5-10 IV	3,61	18,4 a	929 a	11,9 a	81,4 a
	15-20 IV	3,18	19,7 a	876 a	12,1 a	81,2 a
Victoriana	5-10 IV	3,09	21,2 a	935 a	10,9 b	86,8 a
	15-20 IV	2,62	20,3 a	804 b	11,5 a	84,4 a

* Wartości w obrębie danej odmiany oznaczone innymi literami różnią się istotnie

Źródło: Noworolnik, 2013 (25)

Tabela 7

Wpływ terminu siewu na cechy jęczmienia jarego (średnio z odmian) 2009-2011

Termin siewu	Liczba kłosów na 1m ²	Współczynnik rozkrzewienia produkcyjnego	Liczba ziaren w kłosie	Masa 1000 ziaren (g)	Plon ziarna (g·m ²)	Zawartość białka w ziarnie (% s.m.)	Celność ziarna (%)
5-10 IV	1035 b	3,15 b	18,2 a	47,4 a	892 b	11,0 a	84,5 a
15-20 IV	897 a	2,77 a	18,8 a	48,2 a	815 a	11,6 b	85,6 a

Źródło: Noworolnik, 2013 (25)

W poprzedniej serii doświadczeń (2008-2009) również stwierdzono niejednakową reakcję odmian na opóźnienie terminu siewu (24). Najbardziej tolerancyjna na to opóźnienie okazała się odmiana Skarb (charakteryzująca się najwyższym współczynnikiem rozkrzewienia produkcyjnego roślin), a najmniej tolerancyjną – odmiana Conchita (tab. 8). Określenie w niniejszych badaniach współczynników rozkrzewienia produkcyjnego roślin nowych odmian może sugerować tolerancyjność danej odmiany na opóźnienie terminu siewu oraz jej wymagania co do gęstości siewu. Odmiany silniej krzewiące się mogą być bardziej tolerancyjne na opóźnienie terminu siewu i wymagające mniejszej gęstości siewu.

Tabela 8

Wpływ terminu siewu na cechy odmian jęczmienia jarego (2008-2009)

Odmiany	Termin siewu	Współczynnik rozkrzewienia produkcyjnego	Liczba ziaren w kłosie	Masa 1000 ziaren (g)	Plon ziarna (g·m ²)
Conchita	7-12 IV	3,46	17,9	47,9	914
	17-22 IV	2,98	18,2	48,2	706
Kormoran	7-12 IV	3,71	18,1	48,3	866
	17-22 IV	3,50	17,0	49,4	798
Rufus	7-12 IV	3,82	18,4	44,5	887
	17-22 IV	3,53	17,9	46,4	825
Skald	7-12 IV	3,67	17,2	45,4	848
	17-22 IV	3,28	17,6	47,1	759
Skarb	7-12 IV	4,21	17,4	47,2	925
	17-22 IV	3,93	18,3	49,4	880

Źródło: Noworolnik, 2012 (24)

Wpływ terminu siewu na plonowanie odmian jęczmienia jarego badano też w doświadczalnictwie terenowym WODR. Stwierdzono silniejszą ujemną reakcję na opóźnienie terminu siewu jęczmienia nagoziarnistego odmiany Rastik w porównaniu z oplewionymi odmianami Rataj i Rodion (32, 34).

We wcześniejszych pracach krajowych (4, 12, 16, 29, 30, 31, 33, 38) i zagranicznych (1, 13) porównywano stopień tolerancyjności na opóźnienie terminu siewu starszych odmian jęczmienia jarego, obecnie już nie uprawianych. W tych pracach stwierdzono również niejednakową ujemną reakcję odmian na opóźnienie terminu siewu wyrażoną plonem ziarna i rozkrzewieniem produkcyjnym roślin.

Duży ujemny wpływ opóźnienia terminu siewu na plon ziarna wszystkich badanych odmian owsa stwierdzono w doświadczeniach mikropoletkowych (9, 10, 11, 37) i polowych (2, 5, 14, 16, 18, 35). Było to spowodowane głównie zmniejszeniem liczby wiech na jednostce powierzchni, a także liczby ziaren w wieszce, przy niewielkich zmianach masy 1000 ziaren. Badania wykazały, że liczba odmian owsa charakteryzujących się mniejszymi niżkami plonu ziarna pod wpływem opóźnienia terminu siewu jest mniejsza niż w przypadku jęczmienia. Można to tłumaczyć tym, że owies wykazuje największe wymagania wśród zbóż jarych co do ilości dostępnej wody w glebie, a w warunkach wczesnego terminu siewu może korzystać z zapasów wody pozimowej.

W najnowszych doświadczeniach (22) badano wpływ 2 terminów siewu (optymalny i opóźniony o 10 dni) oraz 3 terminów zbioru (optymalny, opóźniony o 7 dni i opóźniony o 14 dni) na plonowanie i zawartość białka w ziarnie owsa. Opóźnienie terminu siewu wpływało negatywnie na plon ziarna owsa, wskutek zmniejszenia liczby wiech na jednostce powierzchni, przy niewielkim zmniejszeniu liczby ziaren w wieszce i masy 1000 ziaren (tab. 9). Zawartość białka właściwego w ziarnie owsa

zmniejszała się pod wpływem opóźnienia terminu siewu, przy zwiększeniu zawartości azotu niebiałkowego i braku istotnych zmian w zawartości białka ogólnego. Przy opóźnieniu terminu zbioru zmniejszał się plon ziarna owsa, wskutek osypywania się ziarna; nie zmieniała się natomiast istotnie zawartość białka ogólnego i właściwego oraz zawartość azotu niebiałkowego w ziarnie owsa. Zawartość albumin i globulin w białku właściwym ziarna owsa zależała od terminu siewu. Zmniejszała się ona w warunkach opóźnionego terminu siewu. Ponadto obserwowano tendencję do zmniejszenia zawartości albumin i globulin w białku owsa przy późnym terminie zbioru. Nie stwierdzono istotnego współdziałania terminu siewu z terminem zbioru.

Tabela 9

Plon ziarna ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) owsa w zależności od terminu siewu i terminu zbioru

Termin siewu	Termin zbioru			Średnio
	optymalny	opóźniony 7 dni	opóźniony 14 dni	
8-14. IV.	865	818	756	813 b
18-24. IV	730	701	650	694 a
Średnio	798 b	760 b	703 a	-

Źródło: Noworolnik, 2011 (22)

W badaniach nad pszenicą jarą, podobnie jak w przypadku owsa, stwierdzono duży ujemny wpływ opóźnienia terminu siewu na plon ziarna wszystkich badanych odmian (16, 17, 41, 44, 45). Jest to skutkiem głównie zmniejszenia liczby kłosów na jednostce powierzchni, a także liczby ziaren w kłosie i masy 1000 ziaren. Opóźnienie terminu siewu wiąże się ze zwiększeniem długości dnia w poszczególnych fazach rozwojowych roślin, co negatywnie wpływa na morfogenezę roślin pszenicy (7). Odnosi się to także do innych gatunków zbóż. Dotyczy to późniejszej inicjacji i wałeczkowania stożka wzrostu, gorszego rozkrzewienia produkcyjnego roślin i słabszego wytwarzania kwiatków w kłosie. Liczba odmian pszenicy charakteryzujących się mniejszymi zniżkami plonu ziarna pod wpływem opóźnienia terminu siewu jest nieduża.

Reasumując można stwierdzić, że jęczmień charakteryzuje się najmniejszymi zniżkami plonu ziarna pod wpływem opóźnienia terminu siewu spośród zbóż jarych. Liczba jego odmian zaliczonych do grupy tolerancyjniejszych na opóźnienie siewu jest większa niż w przypadku owsa i pszenicy.

Współdziałania terminu siewu z różnymi czynnikami agrotechnicznymi i siedliskowymi w aspekcie plonowania jęczmienia jarego

Optymalny termin siewu jęczmienia jarego zależy głównie od długości trwania zimy i waha się w granicach od 20 marca do 10 kwietnia. W przypadku opóźnienia terminu siewu skraca się okres wegetacyjny jęczmienia, ponieważ wydłużony dzień i wyższa temperatura przyspieszają rozwój i dojrzewanie roślin, co przyczynia się do

zniżki plonu ziarna, głównie z powodu zmniejszenia rozkrzewienia produkcyjnego i liczby kłosów w łanie. Wielkość tej zniżki zależy od wielu czynników siedlisko-wo-agrotechnicznych, wpływających na stopień rozkrzewienia roślin, co decyduje o różnej tolerancji na opóźnienie siewu w zależności od warunków ich uprawy. Im większa zniżka plonu, tym większy wzrost zawartości białka w ziarnie, co obniża jakość słodowniczą ziarna. Dlatego jęczmień browarny powinien być wysiewany jak najwcześniej, przed innymi gatunkami zbóż uprawianymi na cele pastewne i konsumpcyjne, dla których wzrost zawartości białka w ziarnie nie jest niekorzystny.

Na podstawie wyników licznych doświadczeń (5, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 25, 29, 31, 32, 35), w których badano wpływ różnych czynników agrotechnicznych na plonowanie jęczmienia jarego w różnych warunkach glebowych, określono zależności między terminem siewu a poszczególnymi czynnikami agrotechnicznymi. Fragmenty wyników badań w tym zakresie nad jęczmieniem jarym przedstawiono w tabelach 10-12. Silniejszą negatywną reakcję jęczmienia jarego na opóźnienie terminu siewu obserwowano w gorszych warunkach glebowych (kompleks żytni dobry, pH poniżej 5), przy słabszym i średnim zachwaszczeniu pola, niskich dawkach azotu i mniejszej gęstości siewu (20).

Tabela 10

Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego w zależności od terminu siewu i jakości gleby

Termin siewu	Kompleks glebowo-rolniczy			Średnio
	pszenny dobry	żytni bardzo dobry	żytni dobry	
25 III-5 IV	4,88* a	4,65 a	4,42 a	4,65 a
6-15 IV	4,75 ab	4,37 a	3,96 b	4,35 ab
16-23 IV	4,41 b	3,97 b	3,48 c	3,95 b

*Wartości w tych samych kolumnach oznaczone innymi literami różnią się istotnie

Źródło: Noworolnik, 2003 (20)

Tabela 11

Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego w zależności od terminu siewu i pH gleby

Termin siewu	pH gleby			Średnio
	powyżej 6	5-6	poniżej 5	
25 III-5 IV	4,92 *a	4,78 a	4,26 a	4,65 a
6-15 IV	4,77 ab	4,49 ab	3,86 b	4,36 a
16-23 IV	4,39 b	4,22 b	3,34 c	3,98 b

* Wartości w tych samych kolumnach oznaczone innymi literami różnią się istotnie

Źródło: Noworolnik, 2003 (20)

Tabela 12

Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego w zależności od terminu siewu i stopnia zachwaszczenia

Termin siewu	Zachwaszczenie (skala 1-9)			Średnio
	małe (poniżej 3)	średnie (3-7)	duże (powyżej 7)	
25 III-5 IV	5,05* a	4,72 a	4,02 a	4,60 a
6-15 IV	4,73 a	4,42 a	3,95 ab	4,36 a
16-23 IV	4,11 b	4,01 b	3,60 b	3,91 b

* Wartości w tych samych kolumnach oznaczone innymi literami różnią się istotnie

Źródło: Noworolnik, 2003 (20)

Wyżej wymienione prace uprawniają do następujących stwierdzeń dotyczących współdziałania termin siewu z różnymi czynnikami agrotechnicznymi:

Termin siewu x gleba

Opóźnienie terminu siewu wywiera większy ujemny wpływ na plonowanie jęczmienia na glebach słabszych niż na glebach lepszych. Wczesny termin siewu w połączeniu z dobrymi warunkami glebowymi sprzyja wytwarzaniu większej masy wegetatywnej zbóż, co powoduje zagrożenie wyleganiem roślin. W takim przypadku ważny jest dobór odmiany odpornej na wyleganie.

Termin siewu x warunki pogodowe

Późniejszy wysiew jęczmienia jest w praktyce powodowany głównie przedłużeniem warunków zimowych (często do 10 kwietnia). Ujemna reakcja jęczmienia jarego na opóźnienie terminu siewu jest modyfikowana przez ilość opadów. Większe zniżki plonu ziarna występują w warunkach małej ilości opadów i większej sumy temperatur w okresie maj – czerwiec, a mniejsze zniżki plonu – w warunkach dużej ilości opadów (niezależnie od temperatury).

Termin siewu x odmiana

Zróznicowanie cech fizjologiczno-pokrojowych odmian jęczmienia (w szczególności dotyczy to niejednakowej zdolności do krzewienia się roślin) powoduje różną tolerancję odmian na opóźnienie terminu siewu. Niektóre odmiany (Suweren, Natasia, Nagradowski, Rufus, Kormoran, Goodluck, Sebastian, Granal, Żeglarsz i Signora) charakteryzują się mniejszymi zniżkami plonu przy wysiewie w terminie opóźnionym i można zalecać ich uprawę w sezonach z późną wiosną. Jest to spowodowane zachowaniem lepszej zdolności do rozkrzewienia produkcyjnego tych odmian w warunkach skróconego okresu ich krzewienia.

Termin siewu x dawka azotu

Niekorzystny wpływ opóźnienia terminu siewu na plonowanie zbóż można ograniczyć w pewnym stopniu poprzez zwiększenie dawki azotu. Silniej zaznacza się to w gorszych warunkach glebowych. Azot jest czynnikiem pobudzającym rośliny do lepszego krzewienia się, natomiast opóźnienie siewu poprzez skrócenie fazy krzewienia roślin wpływa na to odwrotnie. Jednak przy dużym opóźnieniu terminu siewu

(po 20 kwietnia) stosowanie wysokich dawek azotu jest nieuzasadnione, w związku z mniejszym pobraniem tego składnika przez rośliny w krótszym okresie wegetacji.

Termin siewu x gęstość siewu

W miarę opóźniania terminu siewu coraz efektywniejsze stają się większe gęstości siewu. Jest to spowodowane słabszym krzewieniem się roślin pod wpływem opóźnienia siewu i gorszym zwarcie łanu. Uzyskanie optymalnej liczby kłosów w łanie przy opóźnieniu terminu siewu jest możliwe poprzez zwiększenie gęstości siewu. Bardziej efektywne jest to na glebach słabszych. Zwiększenie ilości wysiewu ziarna nie wyrównuje w pełni ujemnego wpływu opóźnienia siewu na plon jęczmienia jarego, zwłaszcza przy dużym opóźnieniu, gdyż oprócz spadku liczby kłosów z rośliny, zmniejsza się także liczba ziaren w kłosie oraz nasila się wypadanie roślin.

Termin siewu x zachwaszczenie

Przy wczesnym terminie siewu zboża jare spotykają się z silniejszą konkurencją chwastów w porównaniu ze stwierdzoną przy późnym wysiewie. Spowodowane jest to niższą temperaturą występującą na przełomie marca i kwietnia, która nie sprzyja szybkim wschodom zbóż, zwłaszcza ciepłolubnego jęczmienia. W takich warunkach chwasty mogą wschodzić szybciej od jęczmienia, ograniczając jego przestrzeń życiową, co wymusza stosowanie pielęgnacji mechanicznej (brona lekka) tuż przed jego wschodami, a następnie na początku ich krzewienia i w dalszej kolejności stosowania oprysku herbicydem.

Podsumowanie

Termin siewu jęczmienia i innych zbóż jarych w praktyce zależy głównie od długości trwania warunków zimowych, które w niektórych latach i rejonach przedłużają się aż do 10 kwietnia. W licznych badaniach stwierdzono ujemny wpływ opóźnienia terminu siewu na plon ziarna wszystkich badanych odmian zbóż. Jest to spowodowane głównie zmniejszeniem liczby kłosów na jednostce powierzchni, ale także liczby ziaren w kłosie, przy niewielkich zmianach masy 1000 ziaren. Negatywna reakcja jęczmienia jarego na opóźnienie terminu siewu jest modyfikowana przez ilość opadów wiosną. Większe niżki plonu ziarna występują w warunkach małej ilości opadów i większej sumy temperatur w okresie maj – czerwiec.

Jęczmień charakteryzuje się najmniejszymi niżkami plonu ziarna pod wpływem opóźnienia terminu siewu spośród zbóż jarych. Liczba jego odmian zaliczonych do grupy bardziej tolerancyjnych na opóźnienie siewu jest większa niż w przypadku owsa i pszenicy. Zróżnicowanie cech fizjologiczno-pokrojowych odmian jęczmienia (w szczególności dotyczy to niejednakowej zdolności do krzewienia się roślin) powoduje różną tolerancję odmian na opóźnienie siewu. Niektóre odmiany (Suweren, Natasia, Nagradowski, Rufus, Kormoran, Goodluck, Sebastian, Granal, Żeglarczyk i Signora) charakteryzują się mniejszymi niżkami plonu przy wysiewie w terminie

opóźnionym i można zalecać ich uprawę w sezonach z późną wiosną. Jest to spowodowane zachowaniem lepszej zdolności do rozkrzewienia produkcyjnego tych odmian w warunkach skróconego okresu ich krzewienia.

Silniejszą negatywną reakcję jęczmienia jarego na opóźnienie terminu siewu obserwowano w gorszych warunkach glebowych (kompleks żytni dobry, pH poniżej 5) i przy mniejszym zachwaszczeniu pola.

Literatura

1. Conry M.J.: Comparison of early, normal and late sowing at three rates of nitrogen on the yield, grain nitrogen and screenings content of Blenheim spring malting barley in Ireland. *J. Agric. Sci.-Cambridge*, 1995, **125**: 183-188.
2. Dubis B., Budzyński W.: Reakcja owsa nagoziarnistego i oplewionego na termin i gęstość siewu. *Biul. IHAR*, 2003, **229**: 139-146.
3. Eagles H., Bedgood A., Martin P.: Cultivar and environmental effects on malting quality in barley. *Aust. J. Agric. Res.* 1995, **46**: 831-844.
4. Fatyga J., Chrzanowska-Drożdż B., Liszewski M.: Wpływ terminów siewu na wysokość plonów ziarna i słomy jęczmienia jarego. *Rocz. Nauk Rol.* 1993, **109(4)**: 143-152.
5. Gooding R. W., Lafever H. N.: Yield and yield components of spring oat for various planting dates. *J. Prod. Agric.*, 1991, **4**: 382-385.
6. Haddadin M. F.: Assessment of drought tolerant barley varieties under water stress. *Intern. J. Agric. Forest.*, 2015, **5(2)**: 131-137.
7. Hotsonym G. K., Hunt L. A.: Sowing date and photoperiod effects on leaf appearance in field-grown wheat. *Can. J. Plant Sci.*, 1997, **77**: 23-31.
8. Kozłowska-Ptaszyńska Z.: Wpływ okresowych niedoborów wody na architekturę i wydajność łanu jęczmienia jarego uprawianego na różnych glebach. W: *Ekofizjologiczne aspekty reakcji roślin na działanie abiotycznych czynników stresowych*. Kraków, 1996, 153-160.
9. Kozłowska-Ptaszyńska Z., Pawłowska J., Woch J.: Termin i gęstość siewu nowych odmian owsa, *IUNG Puławy*, 1997, **R(344)**: 1-24.
10. Kozłowska-Ptaszyńska Z.: Zmiany w plonowaniu i budowie przestrzennej łanu owsa pod wpływem opóźnienia siewu, *Pam. Puł.*, 1999, **114**: 177-184.
11. Kozłowska-Ptaszyńska Z., Pawłowska J., Woch J.: Wpływ terminu i gęstości siewu na plonowanie nowych odmian owsa, *Biul. IHAR*, 2001, **217**: 121-126.
12. Kukuła S., Pecio A.: Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na plon i jakość ziarna browarnych odmian jęczmienia jarego. *Pam. Puł.*, 1998, **113**: 53-60.
13. Lauer J.G., Partridge J.R.: Planting date and nitrogen rate effect of spring malting barley. *Agron. J.*, 1990, **82(6)**: 1083-1088.
14. Leszczyńska D.: Siew jako ważny element integrowanej technologii owsa. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2012, **30(4)**: 59-67.
15. Lomas J.: Climate and agricultural production. *Agrometeorology of the cereals*, Poznań, 1995: 41-58.
16. Maćkowiak W., Budzianowski G., Goworko W., Woś H.: Reakcja odmian zbóż jarych: pszenżyta, owsa, pszenicy i jęczmienia na termin siewu. *Fol. Univ. Agricult. Stetin, Agricult.* 2000, **82**: 159-162.
17. Mazurek J., Kuś J.: Wpływ nawożenia azotem, terminu siewu i na plonowanie pszenicy jarej po różnych przedplonach i na różnych glebach. *Biul. IHAR*, 1991, **177**: 137-143.

18. Noworolnik K.: Plonowanie mieszanek oraz czystych siewów jęczmienia jarego i owsa w zależności od terminu siewu. *Fragm. Agron.*, 1994, **4(44)**: 65-70.
19. Noworolnik K.: Znaczenie gęstości siewu jęczmienia jarego wysiewanego w różnych terminach na trzech kompleksach glebowo-rolniczych. *Pam. Puł.*, 1999, **126**: 71-76.
20. Noworolnik K.: Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na plonowanie jęczmienia jarego w różnych warunkach siedliska. IUNG Puławy, Monografie i Rozprawy Naukowe, 2003, **8**, ss. 66.
21. Noworolnik K.: Kształtowanie jakości ziarna jęczmienia jarego browarnego poprzez zabiegi agrotechniczne z uwzględnieniem czynników siedliskowych. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2007a, **9**: 65-75.
22. Noworolnik K.: Wpływ terminu siewu i terminu zbioru na plonowanie i zawartość białka w ziarnie owsa. *Polish J. Agron.*, 2011, **6**: 35-38.
23. Noworolnik K.: Znaczenie parametrów siewu w integrowanej technologii produkcji jęczmienia jarego. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2012, **30(4)**: 23-40.
24. Noworolnik K. Morphological characters, plant phenology and yield of spring barley (*Hordeum sativum* L.) depending on cultivar properties and sowing date. *Acta Agrobotanica*, 2012, **65(2)**: 171-176.
25. Noworolnik K.: Cechy morfologiczne i jakościowe oraz plonowanie jęczmienia jarego w zależności od właściwości odmian i terminu siewu. *Fragm. Agron.*, 2013, **30(4)**: 105-113.
26. Noworolnik K.: Agrotechnika w kształtowaniu plonu i jakości ziarna jęczmienia jarego na cele pastewne i spożywcze. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2014, **41(15)**: 21-37.
27. Noworolnik K.: Plonowanie i jakość ziarna jęczmienia jarego browarnego w zależności od wybranych czynników agrotechnicznych. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2014, **41(15)**: 129-146.
28. Noworolnik K., Kozłowska-Ptaszyńska Z., Pecio A.: The effect of weather conditions on spring barley yielding and its response to nitrogen fertilization and sowing density. *Agrometeorology of the cereals*. Poznań, 1995: 195-198.
29. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Plonowanie odmian i rodów jęczmienia jarego w zależności od terminów siewu. *Biul. IHAR*, 1997, **201**: 225-230.
30. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Porównanie reakcji odmian jęczmienia jarego na termin i gęstość siewu. *Pam. Puł.* 1998, **112**: 163-168.
31. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Wpływ terminu i gęstości siewu na plonowanie mieszanin odmian jęczmienia jarego. *Biul. IHAR*, 2001, **217**: 107-110.
32. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Plon ziarna i białka jęczmienia nagoziarnistego i oplewionego w różnych warunkach siedliska w zależności od gęstości siewu. *Pam. Puł.*, 2004, **138**: 117-123.
33. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Wpływ gęstości i terminu siewu na wielkość i strukturę plonu ziarna odmian jęczmienia jarego. *Biul. IHAR*, 2004, **231**: 357-363.
34. Noworolnik K., Leszczyńska D., Dworakowski T.: Wpływ nawożenia azotem na plon ziarna i białka jęczmienia nagoziarnistego i oplewionego. *Pam. Puł.* 2004, **135**: 213-221.
35. Noworolnik K., Maj L.: Wpływ gęstości siewu na plonowanie owsa nagoziarnistego i oplewionego. *Pam. Puł.*, 2005, **139**: 137-143.
36. Noworolnik K., Ruszkowski M.: Wpływ terminu i gęstości siewu na plon białka jęczmienia jarego. IUNG Puławy, 1985, **R(197)**: 41-50.
37. Noworolnik K., Sułek A.: Agrotechnika owsa na cele pastewne i spożywcze. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2014, **41(15)**: 167-180.
38. Pecio A.: Studia nad modelem rośliny i łanu jęczmienia jarego. IUNG Puławy, 1995, **R(325)**: ss. 84.
39. Pecio A.: Środowiskowe i agrotechniczne uwarunkowania wielkości i jakości plonu ziarna jęczmienia browarnego. *Fragm. Agron.*, 2002, **4(76)**: 4-112.

40. P e c i o A., W a c h D.: Grain yield and yield components of spring barley genotypes as the indicators of their tolerance to temporal drought stress. Polish J. Agron., 2015, **21**: 19-27.
 41. P o d o l s k a G., S u ł e k A.: Głównie elementy technologii produkcji decydujące o wysokiej jakości ziarna pszenicy. Pam. Puł., 2002, **130**: 597-605.
 42. P l e n z l e r W.: The impact of agroclimatical conditions on the agricultural production in Poland. Agrometeorology of the cereals, Poznań, 1995: 123-132.
 43. S a m o r a h N.H.: Effects of drought stress on growth and yield of barley. Agron. Sustain. Develop., 2005, **25**: 145-149.
 44. S u ł e k A.: Określenie reakcji nowych rodów i odmian pszenicy jarej na wybrane czynniki agrotechniczne. Biul. IHAR, 2004, **231**: 139-145.
 45. S u ł e k A.: Wpływ terminu siewu i terminu zbioru na plonowanie oraz zawartość białka w ziarnie pszenicy jarej odmiany Nawra. Fragm. Agron., 2009, **2**: 138-144.
 46. Z a r e M., A z i z i M.H., B a z r a f s h a n F.: Effect of drought stress on some agronomic traits in ten barley (*Hordeum vulgare*) cultivars. Techn. J. Engin. Appl. Sci., 2011, **1(3)**: 57-62.
-

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Kazimierz Noworolnik
Zakład Uprawy Roślin Zbożowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
Tel.: 81 4786 818
e-mail: knoworolnik@iung.pulawy.pl

Danuta Leszczyńska, Bogusława Jaśkiewicz

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

ZNACZENIE GĘSTOŚCI SIEWU ZBÓŻ JARYCH W RÓŻNYCH WARUNKACH AGROTECHNIKI W ASPEKCIE ZMIAN KLIMATU *

Słowa kluczowe: gęstość siewu, zboża jare, plon ziarna, czynniki agrotechniczne i siedliskowe, zmiany klimatu

Wstęp

Warunkiem uzyskania wysokich plonów ziarna zbóż o dobrej jakości jest odpowiednie zsynchronizowanie zespołu zabiegów agrotechnicznych z warunkami siedliska w warunkach zmian klimatu. W ostatnich latach na efekt produkcyjny roślin zbożowych silniej oddziałują zmienne w latach i rejonach warunki pogody (4). Gęstość siewu jest jednym z ważniejszych czynników agrotechnicznych, determinujących podstawowy element plonotwórczy – liczbę kłosów (wiech) na jednostce powierzchni (3, 7, 30). Duża ilość wysiewu (pomimo zwiększenia obsady roślin) nie powoduje wzrostu plonu ziarna, wskutek zmniejszenia się krzewienia roślin, redukcji plenności pojedynczego kłosa i wzrostu stopnia wylegania, zwłaszcza przy wyższym poziomie nawożenia azotem.

W pracy dokonano przeglądu literatury dotyczącej doskonalenia siewu zbóż jarych, a także niepublikowanych materiałów Zakładu Uprawy Roślin Zbożowych.

Zmiany klimatu a efekty produkcyjne roślin

Według Mrówczyńskiego i in. (16) rolnictwo jest tą dziedziną gospodarki, która najmocniej reaguje na zmiany klimatu. Wpływ zmian klimatu na efekty produkcyjne roślin zbożowych wymaga modyfikacji zaleceń agrotechnicznych zbóż. Zdaniem Koziry i in. (8, 9) prognozowane zmiany klimatu mogą przyczynić się do zmian warunków wegetacji roślin z powodu częstszego występowania susz

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.4 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

i innych zjawisk ekstremalnych. Niedobory wody w glebie oraz rozkład opadów niedostosowany do zapotrzebowania roślin w okresach tzw. krytycznych, powodują straty w plonach roślin. Podkreśla się, że mogą wystąpić dogodniejsze warunki wzrostu dla roślin zbożowych ciepłolubnych takich jak kukurydza i sorgo. W celu wskazania obszarów, na których potencjalnie wystąpiły bądź mogą wystąpić straty spowodowane warunkami suszy dla uwzględnionych upraw rolniczych, opracowano System Monitoringu Suszy Rolniczej w Polsce. Serwis jest prowadzony przez IUNG-PIB w Puławach.

Cechą charakterystyczną produkcji roślinnej w Polsce jest jej znaczne zróżnicowanie regionalne, które ulega ciągłemu pogłębieniu. Według Krasowicza i in. (10) decydują o tym głównie zmiany czynników organizacyjno-ekonomicznych, których siła oddziaływania jest obecnie większa niż warunków przyrodniczych, określających potencjał rolniczej przestrzeni produkcyjnej, w waloryzacji której szczególnie znacznie mają warunki glebowe. Zdaniem Górskiego i in. (5) znamieną dla klimatu Polski jest większa zmienność plonu w latach niż zróżnicowanie regionalne. Wraz ze zmianą klimatu zmieniają się czynniki pośrednio decydujące o plonowaniu, takie jak wymagania dotyczące wysiewu zbóż.

Wyniki syntezy dużej serii doświadczeń wielopunktowych i wieloletnich z jęczmieniem jarym wskazują na znaczną zależność wielkości jego plonu ziarna od warunków pogodowych i gęstości siewu (26). Wyższe plony ziarna uzyskano w warunkach umiarkowanej ilości opadów, a także przy dużej ilości opadów w połączeniu z wysoką temperaturą w okresie strzelania w źdźbło i kłoszenia roślin. Niższe plony otrzymano przy małej ilości opadów i niższej temperaturze, a jeszcze niższe plony wystąpiły przy małej ilości opadów w połączeniu z wysoką temperaturą (tab. 1)

Tabela 1

Wpływ gęstości siewu na plon ziarna w zależności od ilości opadów

Ilość opadów	Plon ziarna t·ha ⁻¹			NIR
	Gęstość siewu – liczba ziaren/m ²			
	240	310	380	
Duża	3,62	3,77	3,71	0,12
Średnia	3,75	3,98	4,10	0,14
Mała a*	2,75	3,05	3,30	0,17
Mała b**	3,11	3,34	3,52	0,18

a* temperatura wyższa od średniej z wielolecia

b** temperatura niższa od średniej z wielolecia

Źródło: Noworolnik i in., 1995 (26)

Wpływ gęstości siewu na plonowanie jęczmienia jarego był zależny od ilości opadów. W warunkach małej ilości opadów uzyskano istotny wzrost plonu ziarna przy dużej gęstości siewu (380 ziaren na 1 m²). Przy dużej ilości opadów wystarczającą dla dobrego plonowania okazała się średnia gęstość siewu (tab. 1). Reakcja na gęstość siewu przy dużej i średniej ilości opadów nie zależała od temperatury.

Uwarunkowania wpływu gęstości siewu zbóż na ich plonowanie w różnych warunkach

Racjonalna ilość wysiewu zależy od gatunku zboża, odmiany oraz szeregu czynników siedliskowo-agrotechnicznych takich jak: jakość gleby, przedplon, poziom nawożenia mineralnego (zwłaszcza azotowego), termin siewu, zamierzonego poziomu ochrony roślin, stopnia zachwaszczenia oraz nasilenia chorób w rejonie uprawy (15, 17, 21, 22).

Zboża jare są bardzo wrażliwe na niedobory wody w glebie. Dlatego bardzo ważna jest znajomość współdziałania ilości wysiewu z innymi czynnikami.

Istnieje duże zróżnicowanie w reakcji poszczególnych gatunków i odmian na zagęszczenia siewu, uwarunkowane odmiennymi wymaganiami świetlnymi i zdolnością krzewienia się roślin (29). Odmiany wymagające dużego natężenia światła w okresie przejścia z fazy wegetatywnej w generatywną, charakteryzuje znaczne zmniejszenie liczby kłosków w kłosie w miarę zagęszczenia wysiewu. Natomiast odmiany wymagające mniejszej ilości światła, wykazują niewielki spadek liczby kłosków w kłosie i reagują wzrostem plonu na zagęszczony siew, ponieważ niewielkie zmniejszenie liczby ziarn w pojedynczym kłosie jest kompensowane zwiększeniem liczby kłosów na jednostce powierzchni. W miarę zagęszczania roślin na jednostce powierzchni, wzajemne zacienianie się ich ogranicza ilość światła przypadającego na jednostkę powierzchni liści w niższych piętrach łanu (30). W warunkach gęstych siewów występuje ograniczenie procesu fotosyntezy, powodujące zmniejszenie przyrostu suchej masy oraz wielkości pojedynczej rośliny (31).

W badaniach naukowych podkreśla się, że liczba roślin na jednostce powierzchni nie jest wprost proporcjonalna do liczby wysianych ziarn, ponieważ w miarę zagęszczania siewu obserwuje się zwiększenie wypadania roślin w okresie wegetacji (3). Zjawisko to jest wynikiem konkurencji między roślinami o wodę, światło i składniki pokarmowe (14). Podkreśla się, że rośliny zasiane gęsto wykazują mniejsze tempo wzrostu. W przypadku małej gęstości siewu zbóż występuje zwiększone rozkrzewienie produkcyjne roślin, przy niewielkim wypadaniu roślin. Zachodzi więc zjawisko samoregulacji zagęszczania łanu.

Wyniki wielu badań (23, 27, 28, 36, 37) wykazują, że w miarę zwiększania ilości wysiewu wzrasta liczba kłosów (wiech) na 1m^2 , lecz jednocześnie zmniejsza się masa 1000 ziarn i liczba ziarn w kłosie. Ze wzrostem ilości wysiewu do poziomu optymalnego zagęszczenia łanu – plon rośnie, następnie ulega stagnacji, a przy dalszym zwiększaniu ilości wysiewu – maleje. W aktualnie lansowanych, integrowanych technologiach produkcji zbóż, rola siewu powinna być niewątpliwie jednym z ważniejszych elementów agrotechniki, zwłaszcza w warunkach różnych scenariuszy zmian klimatu.

Nasze rodzime odmiany zbóż są lepiej niż zagraniczne przystosowane do warunków klimatyczno – glebowych Polski (6, 24, 34, 35). Ważnym kryterium wyboru odmiany

jest odporność na choroby, podatność na wyleganie, odporność na stresy abiotyczne. Cattivelli i in. (1) uważają, że „(...) Codziennie staje się bardziej oczywiste, że postęp w kierunku stabilnych, wysokich plonów w warunkach suszy będzie możliwy tylko wtedy, gdy osiągnięta zostanie prawdziwa integracja tradycyjnej hodowli z fizjologią i genomiką”.

Stosowanie kwalifikowanego materiału siewnego jest jednym z tańszych sposobów zwiększania produkcji rolnej. Jednak ten element agrotechniki nadal w Polsce jest niedoceniany, o czym świadczą dane wskazujące, że zaledwie 10% powierzchni upraw jest obsiewana kwalifikowanym materiałem siewnym.

Ziarno zbóż owsa i jęczmienia, zwłaszcza form nieoplewionych (nie chronione łuską) jest bardziej narażone na działanie patogenów, zwłaszcza przy wilgotnej i chłodnej wiosnie. Powinno być zatem przed siewem obowiązkowo zaprawiane preparatami polecanymi aktualnie przez Instytut Ochrony Roślin. Sułek (33) stwierdziła, że plon ziarna pszenicy jarej otrzymany z materiału kwalifikowanego był większy o 31% niż z nasion drobnych, o 19% od uzyskanego z nasion średnich i o 4,5% niż z nasion dużych.

Na podstawie licznych badań prowadzonych w IUNG-PIB w Puławach stwierdzono, że wśród czynników agrotechnicznych, gęstość siewu najsilniej współdziała z innymi czynnikami agrotechnicznymi, siedliskowymi i biologicznymi w aspekcie wpływu na plony zbóż (12, 18, 19, 22).

Na podstawie syntezy badań nad jęczmieniem jarym (gatunkiem o największym znaczeniu w praktyce spośród zbóż jarych) można przedstawić wpływ gęstości siewu przy współdziałaniu z innymi czynnikami na plonowanie zbóż (18). Syntezę tych wyników przedstawiono w tabelach 2 i 3.

Wpływ ilości wysiewu na plon ziarna jęczmienia zależy jest od warunków glebowych (skład granulometryczny gleb, stopień ich zakwaszenia, kompleks glebowo-rolniczy). W przypadku uprawy jęczmienia na glebach związlejszych (pyły, gliny) zwiększanie wysiewu powyżej 240 ziaren/m² nie jest efektywne. Na innych gatunkach gleb uzyskano istotny wzrost plonu ziarna przy wysiewie 310 ziaren/m², natomiast dalszy wzrost plonu przy dużej gęstości – 380 ziaren/m² istotny jest tylko na glebach lekkich (piaski gliniaste lekkie, piaski słabogliniaste). Wzrost plonu jęczmienia przy dużej gęstości siewu jest większy w warunkach silniejszego zakwaszenia gleby (pH poniżej 5), natomiast w przypadku odczynu gleby zbliżonego do obojętnego plon przy gęstości 380 ziaren/m² jest podobny jak dla gęstości 310 ziaren/m². Nieistotne różnicowanie plonu między gęstościami siewu występuje na glebach kompleksu pszenno-dobrego. Wzrost plonu przy średniej gęstości siewu stwierdzono na glebach kompleksu żytniego bardzo dobrego, a dalszy istotny wzrost przy dużej gęstości na glebach kompleksu żytniego dobrego (tab. 2).

Tabela 2

Wpływ gęstości siewu na plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego
w różnych warunkach glebowych

Wyszczególnienie		Gęstość siewu – liczba ziaren/ m^2		
		240	310	380
Gatunki gleb	pyły zwykłe, gliny lekkie piaski	4,58	4,62	4,50
	gliniaste mocne piaski gliniaste	4,05	4,21	4,25
	lekkie piaski słabogliniaste	3,48	3,65	3,83
		3,17	3,41	3,65
pH gleby	powyżej 6	4,16	4,30	4,29
	5-6	3,92	4,09	4,21
	poniżej 5	3,34	3,61	3,77
Kompleksy glebowe	pszenny dobry	4,27	4,37	4,33
	żytni bardzo dobry	3,72	3,94	4,04
	żytni dobry	3,46	3,73	3,89

Źródło: Noworolnik, 2003 (18)

Reakcja jęczmienia jarego na ilość wysiewu zależy także od terminu siewu, nawożenia azotem, stopnia zachwaszczenia pola i porażenia roślin przez choroby (tab. 3). Istotną dodatnią reakcję jęczmienia na dużą normę wysiewu stwierdzono tylko w warunkach późnego terminu siewu (16-23 kwietnia). Przy wczesnym siewie plony ziarna przy średniej i dużej gęstości siewu są takie same, zaś przy średnio późnym terminie siewu wzrost plonu przy gęstym siewie ma charakter tendencji.

Większy wzrost plonu jęczmienia przy normie wysiewu 380 ziaren/ m^2 można otrzymać w warunkach dużego zachwaszczenia pola, mniejszy zaś przy słabym zachwaszczeniu. Silniejszej reakcji jęczmienia na wzrastającą ilość wysiewu sprzyjało także małe nasilenie chorób w łanie. W takich warunkach można uzyskać wyższą plonu ziarna przy dużej normie wysiewu. Przy średnim nasileniu chorób obserwuje się tendencję do wyższego plonowania przy dużej gęstości siewu.

Stwierdzono współdziałanie ilości wysiewu ziarna jęczmienia z nawożeniem azotem (tab. 3). W warunkach wysokiego poziomu nawożenia N ($90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) nie stwierdza się istotnego zróżnicowania plonu ziarna w zależności od obsady roślin. Stosując dawki azotu 30 i $60 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ można uzyskać wyższą plonu przy średniej gęstości siewu w stosunku do małej gęstości. Natomiast bez stosowania azotu dalszy wzrost plonu może wystąpić tylko przy dużej normie wysiewu.

Tabela 3

Wpływ gęstości siewu na plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) jęczmienia jarego
w zależności od różnych czynników

Wyszczególnienie		Gęstość siewu – liczba ziaren/ m^2		
		240	310	380
Termin siewu	25.III-5.IV	4,21	4,33	4,28
	6-15. V	3,79	3,99	4,06
	16-23.IV	3,57	3,82	4,01
Dawka azotu	0 $kg N \cdot ha^{-1}$	3,26	3,49	3,66
	30 $kg N \cdot ha^{-1}$	3,77	3,96	4,10
	60 $kg N \cdot ha^{-1}$	4,20	4,33	4,42
	90 $kg N \cdot ha^{-1}$	4,28	4,40	4,38
Zachwaszczenie pola	małe	4,16	4,30	4,27
	średnie	3,80	4,02	4,08
	duże	3,57	3,73	3,86
Nasilenie chorób w łanie	małe	3,95	4,14	4,32
	średnie	3,84	4,04	4,11
	duże	3,90	4,05	3,98

Źródło: Noworolnik, 2003 (18)

Ponadto występuje współdziałanie gęstości siewu z innymi czynnikami (19). W słabszych warunkach glebowych (gorsza żyzność, luźniejszy skład granulometryczny gleby, kwaśny odczyn) powinno się siać zboża gęściej niż na lepszych glebach. Jest to spowodowane gorszym rozkrzewieniem roślin rosnących na glebach o mniejszej zasobności w składniki pokarmowe i wodę. Duża gęstość siewu na glebach bardzo słabych (przepuszczalnych) może być nieefektywna w latach suchych wskutek niedostatecznego zaopatrzenia w wodę zwiększonej liczby roślin w łanie. W warunkach kwaśnego odczynu gleby uaktywnia się toksyczne oddziaływanie jonów glinu, manganu i wanadu na system korzeniowy zbóż. Im mniejszy system korzeniowy, tym słabsze krzewienie się roślin, skutkujące niedostateczną liczbą kłosów w łanie i dlatego bardziej efektywne stają się zwiększone ilości wysiewu. Jęczmień i pszenica, czyli gatunki bardziej ujemnie reagujące na kwaśny odczyn gleby wymagają zwiększenia normy wysiewu w takich warunkach w porównaniu z owsem i pszenżytem (6, 32, 34, 35).

Na glebach żyznych, w efekcie dobrego zaopatrzenia w składniki pokarmowe i wodę, występuje silniejsze krzewienie roślin i bujniejszy wzrost, co w przypadku dużej obsady roślin potęguje stopień ich wylegania (szczególnie bardziej wrażliwego jęczmienia). Nadmierne zagęszczenie ładu i słabe jego przewietrzenie sprzyjają nasileniu się porażenia zbóż przez choroby, które wraz z wyleganiem przyczyniają się do znacznych strat plonu ziarna zbóż. Uzasadnia to potrzebę rzadszego ich siewu na lepszych glebach (zwłaszcza w przypadku jęczmienia).

W uprawie zbóż jarych w stanowiskach po zbożach, które zalicza się do złych przedplonów, racjonalne jest zwiększenie ilości wysiewu. Przede wszystkim ze

względu na przenoszenie chorób podsuszkowych ujemnie wpływających na liczbę kłosów w łanie. Najwrażliwsza na te choroby jest pszenica, zaś najbardziej odporny owies. W uprawie zbóż w stanowisku po roślinach motylkowatych, podnoszących zasobność gleby w azot, który wzmacnia rozkrzewienie roślin, zaleca się zmniejszenie normy wysiewu.

Optymalne gęstości siewu zbóż jarych i ich odmian

Spośród zbóż jarych, ze względu na silne krzewienie się i słabą odporność na wyleganie, rzadszego siewu wymaga jęczmień. Odmiany poszczególnych gatunków (z wyjątkiem pszenżyta – tab. 4) z powodu niejednakowej tolerancji na wzajemnie zacięwanie się roślin, zdolności do krzewienia się i różnej odporności na wyleganie roślin, różnią się wymaganiami co do normy wysiewu (tab. 5, 6). Gęściej należy wysiewać odmiany słabiej krzewiące się, o mniejszych wymaganiach świetlnych i bardziej odporne na wyleganie i choroby. W badaniach z nowymi odmianami jęczmienia jarego stwierdzono niejednakową ich reakcję na wzrastającą gęstość siewu (20). Większe zwwyżki plonu przy dużej gęstości siewu w stosunku do małej gęstości wykazały odmiany Victoriana i Signora, a w następnej kolejności: Bordo i Suweren. Wzrost plonu ziarna przy dużej gęstości siewu był efektem zwiększenia liczby kłosów w łanie, pomimo niewielkiego zmniejszenia masy 1000 ziaren u niektórych odmian. Normy wysiewu odmian jęczmienia jarego zależnie od jakości gleby i terminu siewu przedstawia tabela 5.

Tabela 4

Zalecane ilości wysiewu pszenżyta jarego w mln ziarn na ha i $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$

Ilość wysiewu	Kompleks glebowy i termin siewu					
	kompleksy pszenne		żytni bardzo dobry		żytni dobry	
	optimalny	opóźniony	optimalny	opóźniony	optimalny	opóźniony
mln ziarn/ha	4,5	5,0	5,0	5,5	5,5	6,0
$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ *	193	215	215	236	236	257

* dla MTZ – 40g, zdolności kiełkowania nasion 95% i czystości 98%

Źródło: Jaśkiewicz, 2005 (6)

Tabela 5

Normy wysiewu jęczmienia jarego pastewnego (kg·ha⁻¹)

Odmiany	Jakość gleby	Termin siewu		
		25.III-5.IV	6-12.IV	13-20.IV
Nagradowicki, Kirsty, KWS Olof, Rufus, Skald, Raskud, Mercada, Justina, Natasia	dobra ¹	110-122*	114-127	120-134
	średnia ²	118-130	122-135	128-142
	słaba ³	128-142	132-147	138-153
Suweren, Kucyk, Frontier, Rubinek, Nadek, Ella, Tocada, Stratus, Basic	dobra	115-127	120-132	127-140
	średnia	123-135	128-140	135-147
	słaba	134-148	140-154	148-162
Atico, Iron, Skarb, Poldek, Oberek, Fariba, Hajduczek, Soldo	dobra	120-133	126-140	134-148
	średnia	128-140	134-147	142-155
	słaba	140-153	147-160	155-169

¹ kompleksy glebowe: pszeniczny b.dobry, pszeniczny dobry, pszeniczny górski² kompleksy glebowe: żytni b.dobry, pszeniczny wadliwy, zbożowo-pastewny mocny, zbożowy górski³ kompleksy glebowe: żytni dobry, żytni słaby, zbożowo-pastewny słaby, owsiano-ziemniaczany górski

* górne granice przedziałów stosować w przypadku gorszej kultury gleby (powodującej słabsze wschody) i zmniejszonej zdolności kiełkowania (poniżej 90%)

Źródło: Noworolnik, 2007; Leszczyńska, 2010 (24, 25); zmodyfikowane

W przypadku owsa bardzo ważne jest zapewnienie optymalnej liczby wiech na jednostce powierzchni, która związana jest z ilością wysiewu. Nadmierne zagęszczenie łąnu owsa prowadzi do zwiększonego wypadania roślin w okresie wegetacji oraz wylegania i w efekcie do dużego spadku plonu. Badania prowadzone w IUNG-PIB w Puławach wskazują na odmienne wymagania odmian co do ich gęstości siewu (35). Dobór odpowiedniej ilości wysiewu dla określonej odmiany uzależniony jest od warunków siedliska, a głównie od kompleksu przydatności rolniczej gleb (tab. 6).

Tabela 6

Zalecana ilość wysiewu (w mln sztuk ziarna i w kg na 1 ha) zrejonizowanych odmian owsa w zależności od kompleksu przydatności rolniczej gleby

Kompleks glebowo-rolniczy	Arab, Berdysz, Borowiak, Breton, Chwat, Deresz, Flaemingsprofi, Grajcar, Haker, Kasztan, Krezus, Koneser, Rajtar, Scorpion		Arden, Bingo, Cacko, Celer, Furman, Gniady, Komfort, Maczo, Nagus, Pogon, Polar, Siwek, Sławko, Sprinter, Stoper, Szakal, Zuch	
	liczba ziarn w mln szt·ha ⁻¹	kg·ha ⁻¹ *	liczba ziarn w mln szt·ha ⁻¹	kg·ha ⁻¹
pszeniczny b. dobry i dobry, pszeniczny górski	4,5	147	4,8	157
żytni b. dobry, zbożowo-pastewny mocny, zbożowy górski	5,0	163	5,3	173

Tabela 6 cd.

pszenney wadliwy, żytni dobry, owsiano-ziemn. górski	5,5	180	5,8	190
żytni słaby, zbożowo-pastewny słaby, owsiano-pastewny górski	6,0	197	6,3	205

* – ilość wysiewu w $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ wyliczona przy masie 1000 ziarn – 31 g i zdolności kiełkowania 95%

Źródło: Sułek, Noworolnik, 2013 (35)

Dla uzyskania optymalnej obsady wiech owsa nieoplewionego zaleca się wysiew w ilości 5-6 mln ziarn/ha, co w zależności od warunków glebowych i agrotechnicznych (nawożenie NPK, poziom ochrony roślin) wynosi 140-180 kg/ha (tab. 7).

Tabela 7

Zalecane ilości wysiewu ziarna owsa ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) odmiany Akt (zdolność kiełkowania 95 %)*

Termin siewu	Kompleks glebowo-rolniczy			
	pszenney bardzo dobry, pszenney dobry	żytni bardzo dobry, zbożowo-pastewny mocny	żytni dobry, pszenney wadliwy	żytni słaby, zbożowo-pastewny słaby
20-31. III.	140-150**	145-155	153-163	160-170
1-9. IV.	143-153	148-158	157-167	164-174
10-15. IV.	147-157	153-163	162-172	170-180

* – przy zdolności kiełkowania mniejszej od 95 % należy zwiększyć ilość wysiewu, proporcjonalnie do stopnia zmniejszenia zdolności kiełkowania

** – górne granice przedziałów ilości wysiewu należy uwzględnić w warunkach gorszej agrotechniki

Źródło: Leszczyńska, Noworolnik, 2002 (11)

Wysiewając owies na glebach z natury wilgotnych oraz w rejonach o dużej ilości opadów, a także przy silnym nawożeniu azotem, zmniejszamy gęstość siewu o 5-10 %. Rozstawa rzędów powinna wynosić 12-15 cm, a głębokość siewu 2-5 cm (w warunkach wilgotniejszych należy siać płycej, a w suchych głębiej).

W polowych badaniach własnych (13) dotyczących owsa nieoplewionego stwierdzono istotny wzrost plonu przy zwiększaniu ilości wysiewu do 300 ziaren m^{-2} (tab. 8). Wystąpiła wyżka plonu przy wysiewie 400 ziaren m^{-2} w stosunku do najmniejszej ilości wysiewu (200 ziaren m^{-2}). Obserwowano tendencję do zwiększania plonu ziarna przy dalszym zagęszczaniu siewu (500 ziaren m^{-2}), w stosunku do gęstości 300 ziaren m^{-2} .

Tabela 8

Plon ziarna odmiany Akt (t ha^{-1}) w zależności od dawki azotu i gęstości siewu

Dawka azotu ($\text{N}\cdot\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Gęstość siewu (liczba ziaren $\cdot\text{m}^{-2}$)				Średnio
	200	300	400	500	
0	2,28	2,42	2,58	2,69	2,49
30	2,62	2,97	3,03	3,04	2,91
60	2,83	3,10	3,26	3,34	3,13
90	2,93	3,18	3,31	3,40	3,20
120	3,01	3,30	3,31	3,46	3,27
Średnio	2,73	2,99	3,10	3,19	
NIR _{0,05} dla: dawek N - 0,20; gęstości siewu – 0,23, interakcja – r.n.					

Źródło: Leszczyńska, Noworolnik, 2010 (13)

Liczba wiech na jednostce powierzchni zależała od dawki azotu i od gęstości siewu (tab. 9). Zwiększenie ilości wysiewu z 200 do 500 ziaren $\cdot\text{m}^{-2}$ spowodowało zwiększenie liczby wiech na jednostce powierzchni.

Tabela 9

Obsada wiech (sztuk $\cdot\text{m}^{-2}$) odmiany Akt w zależności od dawki azotu i gęstości siewu

Dawka azotu ($\text{N}\cdot\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Gęstość siewu (liczba ziaren $\cdot\text{m}^{-2}$)				Średnio
	200	300	400	500	
0	209	241	274	325	262
30	246	278	299	367	298
60	260	292	331	352	309
90	265	303	339	413	330
120	257	316	343	402	329
Średnio	247	286	317	372	
NIR _{0,05} dla: dawek N - 30, gęstości siewu – 32, interakcja – r.n.					

Źródło: Leszczyńska, Noworolnik, 2010 (13)

Na brak wpływu większej gęstości siewu na plon ziarna odmiany Akt w zakresie 400-500 ziaren $\cdot\text{m}^{-2}$ wskazują wyniki wcześniejszych naszych badań (12) oraz badania Walens (38). Wzrost plonu tej odmiany przy gęstości siewu 800 ziaren $\cdot\text{m}^{-2}$ w stosunku do gęstości 400 ziaren $\cdot\text{m}^{-2}$ stwierdzono natomiast w pracy Dubisa i Budzyńskiego (2), wskutek zwiększenia liczby wiech na jednostce powierzchni.

W przypadku zbyt dużej gęstości siewu czynnikiem ograniczającym plonowanie jest większe wyleganie i porażenie roślin przez choroby. W rejonach o nasilonym występowaniu chorób zbóż zaleca się zmniejszenie normy wysiewu, gdyż nadmierne zwarcie ładu skutkuje pogorszeniem jego przewiewności i sprzyja wyleganiu. Takie warunki ujemnie wpływają na mikroklimat ładu zbóż, gdyż podnosi się wilgotność

powietrza i temperatury w obrębie łąki, co sprzyja rozprzestrzenianiu się chorób, które mogą znacznie ograniczyć plon ziarna. Jeśli planujemy chemiczne zwalczanie chorób, to możemy wysiewać zboża nieco gęściej.

W badaniach naukowych IUNG-PIB w Puławach określono optymalną obsadę roślin poszczególnych gatunków zbóż, w zależności od zróżnicowanych warunków siedliskowo-agrotechnicznych.

W tabeli 10 podano normy wysiewu zbóż jarych obliczone w Zakładzie Uprawy Roślin Zbożowych IUNG-PIB. Zakres zmian norm oznaczono w zależności od różnych warunków i czynników, w tym zmian klimatycznych; dane zawarto w tabeli 11.

Tabela 10

Normy wysiewu zbóż jarych zależnie od jakości gleby w kg ziarna·ha⁻¹

Kompleksy glebowe	Pszenica	Jęczmień	Owies	Pszenżyto
Pszenny bardzo dobry, pszenno dobry	190-210*	115-125	165-180	180-195
Żytni bardzo dobry, zbożowo-pastewny mocny	208-232	120-130	175-190	195-215
Żytni dobry, pszenno wadliwy	230-255	126-138	190-205	215-232
Żytni słaby, zbożowo-pastewny słaby	-	130-142	200-215	230-250

*górne granice przedziałów należy stosować w przypadku odmian wymienionych w tabeli 3, przy wysokiej masie 1000 ziaren i słabszej zdolności kiełkowania

Źródło: Noworolnik, 2006 (19)

Tabela 11

Zakres zwiększania (+ %) lub zmniejszania (- %) normy wysiewu zbóż jarych w zależności od różnych warunków i czynników

Warunki siedliskowe i agrotechniczne	Pszenica	Jęczmień	Owies	Pszenżyto
Kwaśny odczyn gleby	+ (4-5 %)	+ (5-7 %)	+ (1-2 %)	+ (3-4 %)
Opóźniony termin siewu	+ (7-15 %)	+ (5-10 %)	+ (8-17 %)	+ (7-15 %)
Mało staranna uprawa roli	+ (4-5 %)	+ (4-5 %)	+ (1-2 %)	+ (3-4 %)
Duże zachwaszczenie pola	+ (5-6 %)	+ (4-5 %)	+ (1-2 %)	+ (4-5 %)
Duże nasilenie chorób w rejonie	- (5-6 %)	- (3-5 %)	- (1-2 %)	- (2-4 %)
Rejon o klimacie sprzyjającym wyleganiu roślin	- (1-2 %)	- (4-6 %)	- (3-4 %)	- (3-4 %)

Źródło: Noworolnik, 2006 (19)

W IUNG-PIB w Puławach wydawane są aktualne zalecenia agrotechniczne dla zbóż, uwzględniające wymagania odmianowe zbóż odnośnie ilości wysiewu i innych parametrów siewu.

Podsumowanie

Prognozowane scenariusze wpływu zmian klimatu na efekty produkcyjne roślin zbożowych wymagają modyfikacji zaleceń agrotechnicznych zbóż.

Ilość wysiewu silnie współdziała z innymi czynnikami agrotechnicznymi, siedliskowymi i biologicznymi. Prawidłowa ilość wysiewu odgrywa ważną rolę w budowie łanu zbóż a tym samym wpływa na plon i jakość ziarna. Przy zbyt dużym zagęszczeniu pędów produkcyjnych zbóż mogą wystąpić zjawiska negatywne, jak wylęganie roślin, porażenie przez choroby, zmniejszenie liczby ziaren w kłosie i masy 1000 ziaren.

W modelowych doświadczeniach z jęczmieniem jarym wyższe plony ziarna uzyskano w warunkach umiarkowanej ilości opadów, a także przy dużej ilości opadów w połączeniu z wysoką temperaturą w okresie strzelania w źdźbło i kłoszenia roślin. Niższe plony otrzymano przy małej ilości opadów i niższej temperaturze, a jeszcze niższe plony wystąpiły przy małej ilości opadów w połączeniu z wysoką temperaturą. Wpływ gęstości siewu na plonowanie jęczmienia jarego był zależny od ilości opadów. W warunkach małej ilości opadów uzyskano istotny wzrost plonu ziarna przy dużej gęstości siewu. Przy dużej ilości opadów wystarczającą dla dobrego plonowania okazała się średnia gęstość siewu.

Literatura

1. Cattivelli L., Rizza F., Badeck F., Mazucotelli E., Mastrangelo A., Francia E., Mare C., Tondelli A., Stanca A.: Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Res.*, 2008, **105(1-2)**: 1-14.
2. Dubis B., Budzyński W.: Reakcja owsa nagoziarnistego i oplewionego na termin i gęstość siewu. *Biul. I HAR*, 2003, **229**: 139-146.
3. Dzieżyc J.: Czynniki plonotwórcze-plonowanie roślin. Wyd. PWN, Warszawa-Wrocław 1993.
4. Grabiński J.: Porównanie plonowania zbóż jarych i ozimych. *Pam. Puł.*, 2002, **130/1**: 261-267.
5. Górski T., Krasowicz S., Kuś J.: Glebowo-klimatyczny potencjał Polski w produkcji zbóż. *Pam. Puł.*, 1999, **114**: 127-142.
6. Jaśkiewicz B., Brzóska F.: Uprawa pszenżyta jarego. Instrukcja upowszechnieniowa nr 182, IUNG-PIB, Puławy, 2005.
7. Kościelniak W., Dreczka M.: Nowoczesna uprawa zbóż. Wyd. APRA, Poznań 2009.
8. Kozyra J., Doroszewski A., Nieróbcza A.: Zmiany klimatyczne i ich przewidywany wpływ na rolnictwo w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2009, **14**: 243-257.
9. Kozyra J., Nieróbcza A., Mizak K., Pudełko R., Borzęcka-Walker M., Faber A., Doroszewski A.: Zmiana klimatu – nowe wyzwania dla rolnictwa. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2010, **19**: 133-144.
10. Krasowicz S., Górski T., Budzyńska K., Kopiński J.: Agricultural characteristics of the territory of Poland. W: J. Igras i M. Pastuszak (red.), *Temporal and spatial differences in emission of nitrogen and phosphorus from Polish territory to the Baltic Sea*. IUNG-PIB Puławy – MIR Gdynia, 2012: 45-108.
11. Leszczyńska D., Noworolnik K.: Technologia produkcji owsa nieoplewionego (odmiana Akt). Instrukcja wdrożeniowa nr 215. IUNG, Puławy, 2002.
12. Leszczyńska D., Noworolnik K.: Wpływ nawożenia azotem i gęstości siewu na plonowanie, komponenty plonu oraz zawartość białka i plon białka owsa nagoziarnistego. *Fragm. Agron.*, 2008, **1(97)**: 220-227.

13. Leszczyńska D., Noworolnik K.: Wpływ nawożenia azotem i gęstości siewu na plonowanie owsa nagoziarnistego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*. Kraków 2010, **3(70)**: 197-204.
14. Listowski A.: Agrofizjologiczne podstawy produktywności roślin. Warszawa, 1979.
15. Mazurek J., Kuś J.: Wpływ nawożenia azotem, terminu i ilości wysiewu na plonowanie pszenicy jarej uprawianej po różnych przedplonach i na różnych glebach. *Biul. Inst. Hod. Rośl.*, 1991, **177**: 137-143.
16. Mrówczyński M., Walczak F., Korbas M., Paradowski A., Roth M.: Zmiany klimatyczne a zagrożenia roślin rolniczych przez agrofagi. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2009, **17**: 139-146.
17. Noworolnik K.: Reakcja jarych mieszanek jęczmienia z owsem na gęstość siewu. *Mat. Konf. „Stan i perspektywy uprawy mieszanek zbożowych”*. 1994, Poznań, 105-110.
18. Noworolnik K.: Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na plonowanie jęczmienia jarego w różnych warunkach siedliska. *IUNG-PIB Puławy, Monogr. i Rozpr. Nauk.*, 2003, **8**: 1-66.
19. Noworolnik K.: Określenie gęstości siewu zbóż w zależności od warunków siedliskowo-agrotechnicznych. *Instrukcja upowszechnieniowa nr 110*, IUNG-PIB Puławy, 2006, **110**: 1-13.
20. Noworolnik K.: Reakcja wybranych odmian jęczmienia jarego na gęstość siewu. *Pol. J. Agron.* 2015, **15**: 63-68.
21. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Porównanie reakcji odmian jęczmienia jarego na termin siewu i gęstość siewu. *Pam. Puł.* 1998, **12**: 163-168.
22. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Wpływ gęstości i terminu siewu na wielkość i strukturę plonu ziarna odmian jęczmienia jarego. *Biul. IHAR*, 2004a, **231**: 357-363.
23. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Plon ziarna i białka jęczmienia nagoziarnistego i oplewionego w różnych warunkach siedliska w zależności od gęstości siewu. *Pam. Puł.*, 2004b, **138**.
24. Noworolnik K., Leszczyńska D., Najewski A.: Charakterystyka i technologia uprawy odmian jęczmienia jarego. *IHAR Radzików, IUNG-PIB Puławy, COBORU Słupia Wielka*, 2007.
25. Noworolnik K., Leszczyńska D.: Uprawa roli i siew w integrowanej produkcji jęczmienia jarego. W: *Integrowana produkcja jęczmienia ozimego i jarego*. Red. M. Mrówczyński i M. Korbas. IOR Poznań, 2010: 13-20.
26. Noworolnik K., Kozłowska-Ptaszyńska Z., Pecio A.: Wpływ warunków pogodowych na plonowanie jęczmienia jarego i jego reakcję na nawożenie azotem i gęstość siewu. *Agrometeorology of the cereals*. Poznań, 1995, 195-198.
27. Peltonen-Sainio P.: Groat yield and plant stand structure of naked and hulled oat under different nitrogen fertilizer and seeding rates. *Agron. J.*, 1997, **89**: 140-147.
28. Podolska G., Sułek A.: Uprawa roli i siew w integrowanej produkcji pszenicy jarej. W: *Integrowana produkcja pszenicy jarej*. Red. M. Mrówczyński i M. Korbas. IOR Poznań, 2009: 24-50.
29. Ruszkowski M.: Produkcyjność roślin zbożowych. W: *Podstawy produktywności roślin*. Mat. sesji naukowej, Puławy, 1985: 71-92.
30. Ruszkowski M.: Obsada a produktywność roślin zbożowych. *Mat. Konf. Nauk.: Obsada a produktywność roślin uprawnych*. IUNG Puławy cz. I. 1988, 3-70.
31. Simmons S.R., Rasmussen D.C., Wiersma J.V.: Tillering in barley: genotype, row spacing and seeding rate effects. *Crop Sc.*, 1982, **22**, **4**: 801-805.
32. Sułek A.: Określenie reakcji nowych odmian pszenicy jarej na wybrane czynniki agrotechniczne. *Biuletyn IHAR*, 2004, **231**: 139-145.
33. Sułek A.: Wpływ wielkości nasion na dynamikę wschodów i plonowanie pszenicy jarej. *Fragm. Agron.*, 2007, **2(94)**: 307-314.
34. Sułek A., Leszczyńska D., Cyfert R.: Charakterystyka i technologia uprawy odmian owsa. *IUNG-PIB Puławy, COBORU Słupia Wielka*, 2005.
35. Sułek A., Noworolnik K.: Uprawa owsa na cele paszowe i spożywcze. *Instr. Upowsz.*, 2013, **192**: 1-19.
36. Szarek K., Klim a K.: Porównanie plonowania i elementów struktury plonu owsa uprawianego w różnych warunkach klimatyczno-glebowych. *Biul. IHAR*, 2006, **239**: 173-183.

37. Ś c i g a l s k a B.: Plonowanie odmian owsa w zależności od gęstości siewu w warunkach regionu południowo-wschodniego. *Żywność*, 1999, **1(18) Supl.**: 153-160.
 38. W a l e n s M.: Wpływ nawożenia azotem i gęstości siewu na wysokość i jakość plou ziarna odmian owsa oplewionego i nagoziarnistego. *Biul. IHAR*, 2003, **229**: 115-124.
-

Adres do korespondencji:

dr hab. Danuta Leszczyńska
Zakład Uprawy Roślin Zbożowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 4786815
e-mail: leszcz@iung.pulawy.pl

Alicja Sulek, Danuta Leszczyńska

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

NAWOŻENIE ZBÓŻ JARYCH W WARUNKACH ZMIENIAJĄCEGO SIĘ KLIMATU*

Słowa kluczowe: zboża jare, plon ziarna, nawożenie, klimat

Wstęp

Nawożenie jest podstawowym zabiegiem agrotechnicznym, a głównym celem tego zabiegu jest optymalne wykorzystanie genetycznych możliwości roślin uprawnych oraz odtwarzanie i utrzymywanie na niezbędnym poziomie zasobności gleby w dostępne dla roślin składniki pokarmowe (14).

W nowoczesnym rolnictwie podejście do nawożenia zbóż jarych powinno być rozpatrywane jako zbilansowany system oparty na analizie składników pokarmowych, uwzględniającym ich pobranie z gleby przez roślinę oraz dopływ nawozów mineralnych, organicznych i naturalnych (15). Optymalizacja nawożenia na danym polu możliwa jest dzięki analizie składu chemicznego gleby na zawartość podstawowych składników pokarmowych, makro- i mikroelementów oraz znajomości pH gleby (17).

W ostatnich latach zwiększa się częstość występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych, powodujących znaczne straty w plonach (13). Przyczyną powstawania tych strat jest między innymi susza, która w Polsce w ostatnich dwudziestu latach występuje szczególnie często (8). Zmiana klimatu wpływa na produkcję roślinną w sposób bezpośredni i pośredni. Wpływ bezpośredni wyraża się przez zmianę warunków atmosferycznych dla produktywności upraw, między innymi przez zmianę warunków termicznych, sum opadu atmosferycznego, częstości i intensywności zjawisk ekstremalnych (31). Wraz ze zmianą klimatu zmieniają się również czynniki pośrednio decydujące o plonowaniu roślin, w tym i wymagania roślin dotyczące nawożenia.

Przewidywany wzrost natężenia i częstotliwość susz może spowodować wzrost deficytu wody w rolnictwie. Zboża jare są bardzo wrażliwe na niedobory wody w glebie, dlatego bardzo ważne jest dostarczenie składników pokarmowych w nawozach, w celu zwiększenia przetrwania roślin w niekorzystnych warunkach.

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.4 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Wapnowanie

Do czynników wpływających na efektywność nawożenia należą warunki pogody. Ważnym sposobem na zmniejszenie negatywnych skutków niekorzystnej pogody na skutki produkcyjne nawożenia jest zabieg wapnowania. W miarę wzrostu zakwaszenia gleb, pobieranie składników pokarmowych przez rośliny ulega silnemu zakłóceniu, co skutkuje zmniejszeniem plonów i zagrożeniem dla środowiska glebowego i wodnego. Uregulowany odczyn gleby powoduje wzrost produktywności i poprawia wykorzystanie składników pokarmowych (15, 17). Jak podaje K o p i ń s k i i i n . (21) w latach 2011-2016 produkcja roślinna potencjalnie utracona z powodu nieuregulowanego odczynu gleb wynosiła rocznie średnio $4,3 \text{ j.zb.} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ UR w dk}$ i była na ogół dwukrotnie większa niż tracona z powodu niekorzystnych warunków pogodowych.

W Polsce występuje dość duże zróżnicowanie regionalne zakwaszenia gleb. Obecnie najwięcej gleb kwaśnych i bardzo kwaśnych występuje w województwach: łódzkim, podlaskim, mazowieckim i podkarpackim. Z tego powodu, w tych dwóch pierwszych, są także generowane najwyższe straty składników nawozowych ($35\text{--}40 \text{ kg NPK} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ UR w dk}$). W województwie podkarpackim straty te są zdecydowanie mniejsze z uwagi na najniższy poziom intensywności produkcji rolniczej w Polsce, mierzonej zużyciem nawozów mineralnych i naturalnych. Małe straty, pomimo bardzo intensywnej produkcji roślinnej, występują natomiast w województwie opolskim – jest to województwo o najlepszej pod tym względem w kraju kulturze rolnej (21).

Nawożenie azotem

Azot zaliczany jest do najważniejszych pierwiastków plonotwórczych, mających największy wpływ nie tylko na wielkość plonu, ale także na parametry jakościowe ziarna i mąki. W nawożeniu zbóż jarych azotem ważne jest nie tylko określenie wielkości całkowitej dawki azotu, ale także sposób i termin aplikacji. Precyzyjne określenie potrzeb nawożenia azotem ma kluczowe znaczenie, nie tylko ze względu na przenawożenie roślin tym składnikiem, ale z uwagi na ujemne konsekwencje środowiskowe. Azot należy do składników pokarmowych pobieranych przez zboża jare w największych ilościach, lecz jest podatny na wymywanie. Dlatego koncepcja zrównoważonego gospodarowania tym składnikiem zakłada jego maksymalne wykorzystanie przez rośliny, a dzielenie dawki azotu uzależnione jest od tempa jego pobierania (17). Wielkość całkowitej dawki azotu pod pszenicę jară określa się z iloczynu plonu osiągalnego w warunkach konkretnego pola i pobrania składnika na jednostkę plonu głównego z odpowiednią ilością słomy (tab.1).

Tabela 1

Pobranie azotu, fosforu i potasu na wyprodukowanie jednostki plonu ($\text{kg} \cdot \text{dt}^{-1}$).

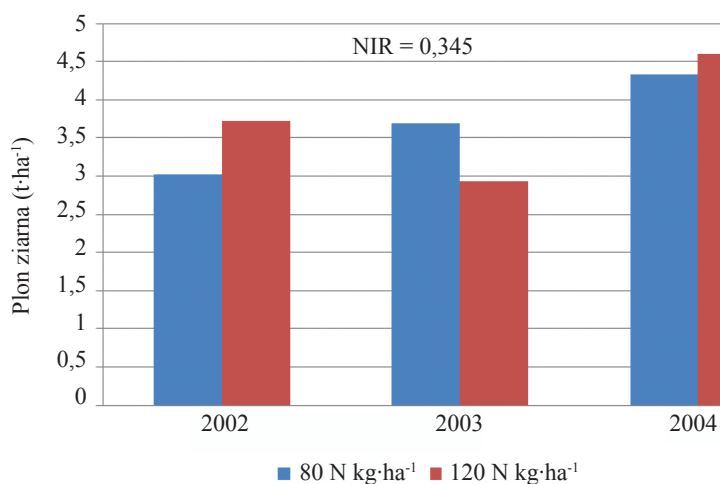
Roślina	Plon główny			Plon uboczny			Stosunek plon główny- uboczny	Plon główny i uboczny		
	azot N	fosfor P_2O_5	potas K_2O	azot N	fosfor P_2O_5	potas K_2O		azot N	fosfor P_2O_5	potas K_2O
Pszenica jara	2,10	0,87	0,55	0,55	0,18	1,28	0,90	2,51	1,03	1,63
Jęczmień jary	1,63	0,80	0,58	0,55	0,23	1,44	0,80	2,10	0,96	1,64
Owies	1,61	0,80	0,56	0,59	0,27	1,88	1,10	2,22	1,08	2,19
Mieszanke zbożowe	1,65	0,87	0,61	0,61	0,30	1,63	0,90	2,20	1,15	2,08

Źródło: Jadczyszyn, 2000 (15)

Całkowitą dawkę azotu, jaką rolnik planuje zastosować po uwzględnieniu prognozowanej wielkości plonu, należy podzielić na dwie lub trzy części, aby zmniejszyć ryzyko strat składnika w przypadku wystąpienia niekorzystnych warunków pogodowych, a w razie potrzeby skorygować przyjęty plan nawożenia azotem. W celu zapewnienia właściwego zaopatrzenia w ten składnik w krytycznych fazach rozwoju roślin całkowitą dawkę należy podzielić wg proporcji:

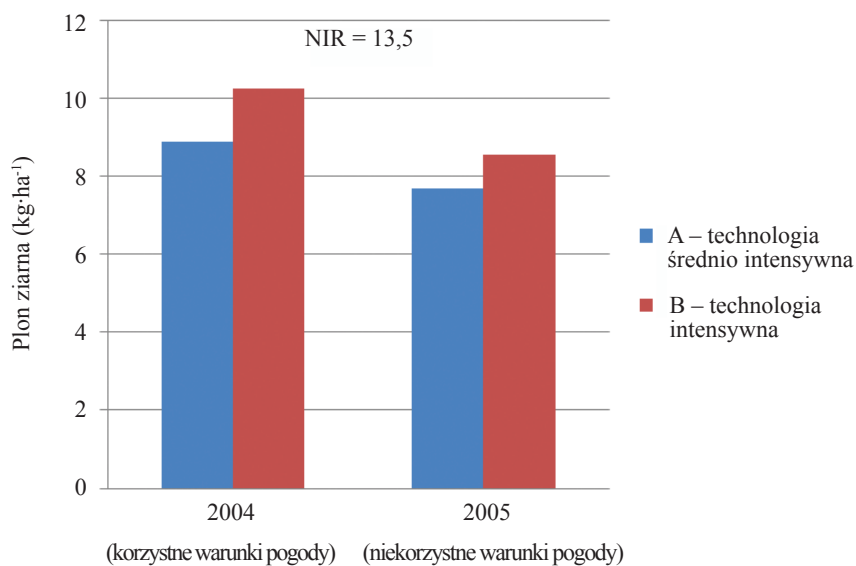
- 50-60% przedsięwzięcie, co wpływa korzystnie na krzewistość oraz stopień różnicowania się elementów kłosa, a następnie na ich wykształcenie;
- pozostałą część – w fazie strzelania w źdźbło, co zapobiega redukcji elementów kłosa i zwiększa powierzchnię asymilacyjną liści;
- w uprawie pszenicy na cele jakościowe należy uwzględnić trzecią dawkę azotu, która stanowi około 10-30% dawki całkowitej. Stosowana od fazy liścia flagowego do dojrzałości młecznej, utrzymuje sprawność aparatu asymilacyjnego oraz wpływa na dobre wypełnienie ziarna i zawartość białka.

Na wykorzystanie azotu przez zboża jare mają wpływ warunki pogody w okresie wegetacji, szczególnie dotyczące wilgotności gleby. Azot zastosowany w okresie niedoborów wody w glebie jest słabo wykorzystywany przez zboża. Badania Biskupskiego (5) wskazują, że długotrwała susza w okresie wegetacji w roku 2003 w decydujący sposób wpłynęła na obniżenie plonów, nie rekompensowanych nawet zastosowaniem wyższej dawki azotu (rys. 1). Badania Kłodziejczyka i in. (20) również wykazały większą efektywność technologii intensywnej (wyższe nawożenie azotem) wyrażoną przyrostem plonu ziarna, w stosunku do technologii średnio intensywnej (niższe nawożenie azotem) w roku o korzystnym przebiegu pogody (rys. 2).



Rys. 1. Wpływ nawożenia azotem na plon ziarna pszenicy jarej w latach 2002-2004

Źródło: Biskupski, 2007 (5)

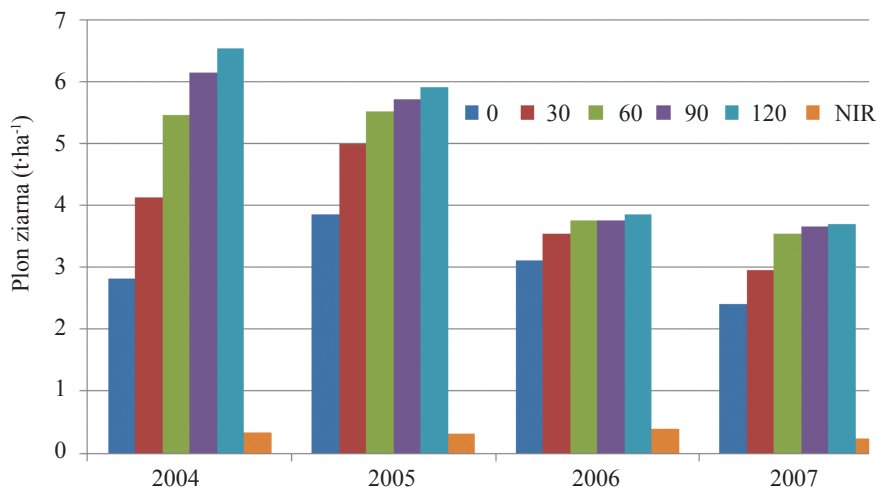


Rys. 2. Plonowanie pszenicy ozimej w zależności od intensywności technologii produkcji

Źródło: Kołodziejczyk i in., 2007 (20)

W badaniach Pecio i Bichonńskiego (25) największą efektywność nawożenia azotem obserwowano w latach 2005 i 2007 charakteryzujących się korzystnym przebiegiem pogody, a najmniejszą w roku 2006, w którym warunki pogodowe nie sprzyjały uprawie jęczmienia jarego (małą ilość opadów notowano od kwietnia do lipca).

Plon ziarna w latach 2005 i 2007, zwiększał się istotnie przy nawożeniu w dawkach 90 kg N·ha⁻¹, a w roku 2006 tylko do dawki 60 kg N·ha⁻¹. W latach posusznych w przypadku owsa duże dawki azotu były także mało efektywne (26); (rys 3).



Dawka N·ha⁻¹ (0; 30; 60; 90; 120)

Rys. 3. Plon ziarna owsa w zależności od nawożenia azotem w latach 2004-2007

Źródło: Pecio, Smagacz 2012 (26)

Gąsiorowska i in. (11) wykazali istotny wpływ warunków meteorologicznych w latach badań oraz nawożenia azotem na plon ziarna pszenicy jarej (tab. 2). W cytowanych badaniach udowodniono także, że produktywność 1 kg N była modyfikowana przez warunki pogodowe w latach badań. We wszystkich sezonach wegetacyjnych produktywność azotu wyrażona plonem ziarna malała w miarę intensyfikacji nawożenia. Najwyższą średnią produktywność 1 kg azotu zanotowano w roku wilgotnym 2002 – 21,52 kg, natomiast najniższą w roku posuszny 2003 – 12,0 kg. Efektywność działania azotu na plon ziarna zależy także od warunków wilgotnościowych. Najsłabiej na plon oddziaływał azot w dawce 160 kg N·ha⁻¹, w suchym 2003 roku, zaś najlepiej w wilgotnym 2002 roku. Autorzy wykazali również, że dokarmianie dolistne roztworem mocznika korzystnie wpłynęło na plon ziarna pszenicy jarej w posuszny 2003 roku.

Tabela 2

Plon ziarna pszenicy jarej w zależności od nawożenia azotem w latach 2002-2003 ($t \cdot ha^{-1}$)

Nawożenie N w $kg \cdot ha^{-1}$	Lata			Średnio
	2001	2002	2003	
0	3,96	3,17	2,84	3,32
40	4,77	4,07	3,41	4,08
80	5,27	4,72	3,64	4,54
120	5,94	5,26	3,86	5,02
160	6,27	5,26	3,97	5,27
60 + nawożenie dolistne (60 N $kg \cdot ha^{-1}$ przed siewem 8% roztwór mocznika w fazie strzelania w źdźbło + 6% roztwór mocznika w fazie początku kłoszenia)	5,90	5,49	4,29	5,23
Średnio	5,36	4,71	3,67	4,58
NIR _{0,05}				
Dla lat	0,21			
Dawek nawożenia azotem	0,39			

Źródło: Gąsiorowska i in., 2006 (11)

W ostatnich latach w wielu rejonach Polski występują susze, które uniemożliwiają dobre wykorzystanie składników pokarmowych, w tym większych dawek azotu przez zboża jare. Dlatego wielu badaczy (35, 22, 6) uważa, że nawadnianie w okresach krytycznych i przy niedoborach opadów atmosferycznych jest uzasadnione, gdyż zmniejsza zawodność plonowania. Jak podają Koziara i in. (22) pod wpływem deszczowania plon ziarna jęczmienia jarego zwiększa się do dawki 60 $kg N \cdot ha^{-1}$, natomiast na obiekcie bez deszczowania wzrost plonu uzyskano wraz ze zwiększeniem dawki do 30 $kg N \cdot ha^{-1}$ (tab. 3).

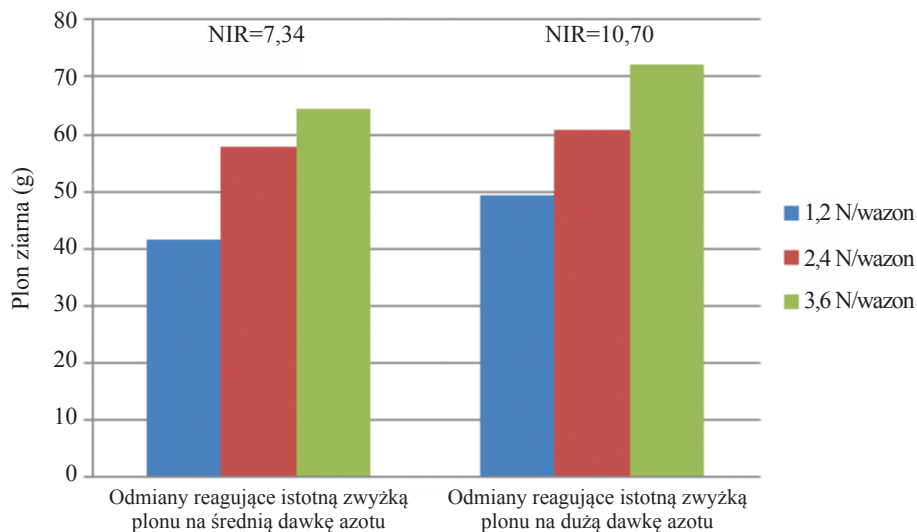
Tabela 3

Wpływ deszczowania i nawożenia azotem na plon ziarna jęczmienia jarego ($t \cdot ha^{-1}$)

Wariant wodny	Nawożenie azotem $kg N \cdot ha^{-1}$				Średnio
	0	30	60	90	
Bez deszczowania	2,66	2,96	3,00	2,90	2,88
Z deszczowaniem	3,03	3,93	4,31	4,46	3,93
Średnio	2,85	3,45	3,66	3,68	
NIR _{0,05} dla:					
Deszczowania	0,181				
Nawożenia	0,135				
Interakcji	0,191				

Źródło: Koziara i in., 2006 (22)

Z badań wieloletnich przeprowadzonych zarówno w warunkach polowych jak i kontrolowanych z dużą ilością odmian zbóż jarych wynika, że odmiany mają zróżnicowane wymagania odnośnie dawek nawożenia azotem. Uwarunkowane jest to genetycznie i wiąże się z odmiennym metabolizmem każdej odmiany, a tym samym zróżnicowanymi wymaganiami żywieniowymi (29); (rys. 4).



Rys. 4. Plon ziarna z wazonu w g pszenicy jarej w zależności od nawożenia azotem

Źródło: Sułek, 2004 (29)

Odmiany lepiej plonujące w warunkach stresowych, przy zmniejszonej wilgotności gleby i mniejszym nawożeniu azotem są bardziej tolerancyjne i lepiej przystosowane do uprawy w zmiennych warunkach środowiska, gdzie często rośliny poddawane są działaniu stresu wodnego czy żywieniowego (9). O różnej reakcji odmian pszenicy jarej na nawożenie azotem w warunkach niedoboru wody w glebie donoszą badania Kocoń i Sułek (19); (tab. 4).

Tabela 4

Plon ziarna (g/wazon) odmian pszenicy jarej w zależności od poziomu wilgotności gleby i nawożenia azotem

Odmiana (A)	Poziom wilgotności gleby (B)						Średnia
	W 1			W 2			
	poziom nawożenia N (C)						
	N 1	N 2	średnia	N 1	N 2	średnia	
Napola	32,8	40,7	36,7	44,3	53,7	49,0	42,9
Jasna	37,4	43,8	40,6	46,0	57,8	51,9	46,3
Kosma	36,5	45,4	40,9	46,1	60,4	53,2	47,1
Średnia	35,6	43,3	39,4	45,5	57,3	51,4	45,4
średnia dla N 1=40.5, N 2=50.3							
NIR _{0,05} dla							
A= 1,10; B= 0,75; C= 1,10; A/B= 1,30; A?C= 1,91; B/C= 1,30							

W 1 - 40% połowej pojemności wodnej

W 2 - 60% połowej pojemności wodnej

N 1- 1,2 g N/wazon

N 2- 2,4 g N/wazon

Źródło: Kocoń i Sułek, 2010 (19)

Nawożenie fosforem i potasem

Fosfor i potas należą do niezbędnych makroelementów w żywieniu zbóż jarych, które w zasadniczy sposób wpływają na wielkość i jakość plonu ziarna zbóż. Makroelementy należą do grupy tych składników, co do których wymagania pokarmowe roślin są duże. Obecność fosforu w początkowej fazie rozwoju rośliny zapewnia prawidłowy rozwój korzeni, a w związku z tym odporność na suszę i niedobór składników pokarmowych w późniejszym okresie wzrostu i rozwoju (4, 16, 18). Optymalne odżywienie tym składnikiem sprzyja dobremu krzewieniu się roślin, zwiększa ilość ziaren w kłosie, stymuluje ich wypełnienie oraz skraca okres dojrzewania (3). Nawożenie fosforem powinno być stosowane wyłącznie przedsięwzięcie, bowiem pogłównie staje się nieefektywne.

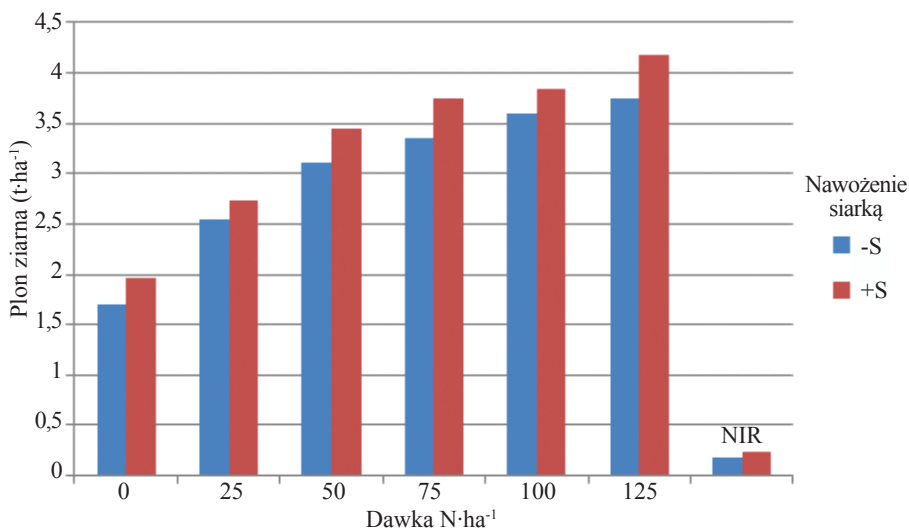
Spośród kationów potas jest pobierany w największych ilościach, a optymalne zaopatrzenie roślin w ten składnik poprawia efektywność plonotwórczą azotu (30). W uprawie zbóż największe tempo pobierania potasu przypada na okres strzelania w źdźbło i utrzymuje się do fazy kłoszenia. Akumulacja tego składnika w pszenicy trwa do kwitnienia, po okresie tym do zbiorów może zmniejszyć się nawet 50% w stosunku do pobrania maksymalnego (33). Potas uczestniczy i jest niezastąpiony w wielu procesach życiowych. Jony potasu regulują gospodarkę wodną i transport składników mineralnych, syntezę węglowodanów, kwasów nukleinowych i białek oraz ich przemieszczanie w roślinie. Dobre zaopatrzenie roślin w potas zwiększa ich odporność na stresy abiotyczne i czynniki chorobotwórcze. W roślinie potas gromadzony jest w soku komórkowym, a zmiany jego stężenia sterują procesami otwierania i zamykania aparatów szparkowych, czym rośliny regulują intensywność parowania i pobierania wody, a w konsekwencji także temperaturę. Rośliny dobrze odżywione potasem zużywają mniej wody na wyprodukowanie jednostki plonu. Są zatem mniej wrażliwe na stres suszy, który w Polsce coraz częściej bywa czynnikiem ograniczającym plonowanie roślin uprawnych. Nawożenie potasem, regulując produkcję cukrów, węglowodanów, białek i witamin, wpływa pozytywnie na jakość surowców i produktów roślinnych.

Nawożenie magnezem i siarką

Magnez w roślinie odgrywa bardzo ważną rolę. Wymagania pokarmowe zbóż jarych w stosunku do magnezu są znacznie mniejsze niż w stosunku do azotu, fosforu i potasu. Jednak według Noworolnika (24), jare formy pszenicy silniej reagują na zawartość magnezu w glebie niż na zawartość fosforu. Nawożenie pszenicy jarej magnezem jest szczególnie efektywne na glebach lekkich, wykazujących kwaśny odczyn i małą zawartość tego składnika (17).

Zboża jare należą do grupy roślin o stosunkowo niewielkim zapotrzebowaniu na siarkę, jednak przy niedoborach tego składnika oraz wysokim nawożeniu azotem

zostaje zakłócony stosunek N:S i w konsekwencji znacznie obniża się wykorzystanie azotu. Prowadzi to do spadku plonu ziarna i do pogorszenia jego jakości. Badania G o n d e k (12), wykazały, że zastosowane nawożenie siarką spowodowało istotny przyrost plonu ziarna pszenicy jarej (o 0,8 t) w porównaniu do plonu z obiektu, w którym zastosowano nawożenie azotem, fosforem i potasem. Również P o d l e ś n a i C a c a k - P i e t r z a k (27) wskazują na pozytywny wpływ nawożenia tym pierwiastkiem nie tylko na plon ziarna (rys. 5), ale także na wartość przemiałową ziarna pszenicy jarej.



Rys. 5. Plon ziarna pszenicy jarej w zależności od nawożenia azotem i siarką

Źródło: Podleśna i Cacak-Pietrzak, 2006 (27)

Nawożenie mikroelementami

Niedobór mikroelementów, podobnie jak ich nadmiar w glebie, może ograniczyć plonowanie roślin, jak również zmieniać cechy jakościowe plonu (17). Rola mikroelementów polega na regulacji procesów biochemicznych zachodzących w roślinach podczas wegetacji. Wchodzą one w skład większości enzymów. Deficyt określonych mikroelementów powoduje zahamowanie specyficznych reakcji enzymatycznych, co prowadzi w następstwie do zaburzeń wielu procesów biochemicznych i fizjologicznych, w niekorzystny sposób oddziałując na wzrost i rozwój roślin (34). Badania R u s z k o w s k i e j i n . (28) dowodzą, że otrzymywanie przez szereg lat wysokich plonów wiąże się z koniecznością kontroli stanu zaopatrzenia roślin w mikroelementy. Najbardziej skutecznym sposobem dostarczenia deficytowych mikroskładników jest nawożenie dolistne roślin. Głównymi jego zaletami są szybkość działania i wysoki stopień wykorzystania wnoszonych składników.

Dolistne dokarmianie roślin mikroelementami jest zabiegiem dodatkowym, wspomagającym wykorzystanie NPK oraz ograniczającym skutki niedoborów mikroelementów w roślinach, wynikających z ich niedostatecznej zawartości w glebie lub utrudnień w ich pobieraniu (7). Korzystny efekt dolistnego dokarmiania roślin wynika m. in. z pobudzenia metabolizmu rośliny, co pociąga za sobą zwiększenie pobierania składników pokarmowych przez system korzeniowy (10, 17). Niedobór mikroelementów może pogorszyć cechy jakościowe ziarna (23), a w szczególności wpływać na ilość i jakość białka (1). Najważniejszymi mikroelementami, niezbędnymi do prawidłowego wzrostu, rozwoju i plonowania zbóż jarych są: miedź, cynk i mangan (2). O pozytywnym wpływie nawożenia mikroelementami na uzyskanie wysokich plonów ziarna jęczmienia świadczą badania Warechowskiej i Domskiej (32), w których wykazano, że dla uzyskania wysokiego plonu ziarna wskazane jest uzupełnienie nawożenia podstawowego, ograniczonego najczęściej do NPK Mg, o mikroelementy. Jak podają Liszewski i in. (23), dokarmianie dolistne jęczmienia browarnego manganem i miedzią powoduje istotny wzrost liczby ziarniaków w kłosie w porównaniu z obiektem nienawożonym mikroelementami.

Podsumowanie

Konsekwencją zmian klimatu jest wzrost natężenia i częstotliwości występowania susz, które mogą spowodować wzrost deficytu wody w rolnictwie. W związku z tym nastąpią zmiany odnośnie potrzeb nawożenia zbóż jarych. Podczas niesprzyjających warunków atmosferycznych nawożenie jest bardzo istotne, a zarazem skomplikowane. Aby rośliny mogły przetrwać w takich warunkach należy szczególną uwagę zwrócić na nawożenie potasem i fosforem. Gospodarkę wodną reguluje potas, a fosfor powoduje prawidłowy rozwój korzeni, dzięki czemu roślina pobiera wodę i składniki pokarmowe. Prawidłowo odżywione rośliny zbóż jarych fosforem, potasem, magnezem, siarką i mikroelementami mają większe możliwości efektywnego wykorzystania azotu. Na wykorzystanie azotu przez zboża jare mają wpływ warunki pogody w okresie wegetacji, szczególnie dotyczące ilości opadów. Susze uniemożliwiają dobre wykorzystanie składników pokarmowych, w tym zwłaszcza większych dawek azotu przez zboża jare. Przy niedoborach opadów atmosferycznych, w szczególności okresach krytycznych dla zbóż jarych, zabiegiem poprawiającym wykorzystanie składników pokarmowych może być nawadnianie.

Literatura

1. Barczak B., Kozera W.: Oddziaływanie nawożenia mikroelementami na zawartość i skład frakcyjny białka ziarna jęczmienia jarego. *Acta Agroph.*, 2003, **85**: 31-38.
2. Barczak B., Nowak K., Majcherczak E., Kozera W.: Wpływ dolistnego nawożenia mikroelementami na wielkość plonu ziarna owsa. *Pam. Puł.*, 2006, **142**: 1-12.

3. Bednarek W., Reszka R.: Wpływ wapnowania i nawożenia różnymi formami azotu na plonowanie i wykorzystanie fosforu przez rośliny jęczmienia jarego. *Ann. UMCS*, vol. LXII, 2007, **1**: 69-75.
4. Bezak-Mazur E., Stoińska R.: The importance of phosphorus in the environment-review article. *Arch. Gosp. Odpad. Ochr. Środ.*, 2013, **15(3)**: 33-42.
5. Biskupski A.: Zróżnicowane nawożenie azotem a plonowanie i wybrane wskaźniki architektury łanu kilku odmian pszenicy jarej. *Inżynieria Rolnicza*, 2007, **91**: 29
6. Błażewicz J., Zembold-Gula A., Dudek S., Kuśmierz-Tomaszewska R.: Wpływ deszczowania i nawożenia azotem w technologii uprawy jęczmienia browarnego na wydajność procesu słodowania – wstępne wyniki badań. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2011, **6**: 109-117.
7. Czuba R.: Mikroelementy we współczesnych systemach nawożenia. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2000, **471**: 161-169.
8. Doroszewski A., Kozyra J., Pudelko R., Stuczyński T., Jadczyzyn J., Koza P., Łopatka A.: Monitoring suszy rolniczej w Polsce. *Wiadomości melioracyjne i łąkarskie*, 2008, **1**: 35-38.
9. Dziedzic P.: Genetyczne uwarunkowania tolerancji na stresy abiotyczne u roślin. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2002, **481**: 49-60.
10. Faber A., Kęsik K., Winiarski A.: Ocena skuteczności krajowych wieloskładnikowych nawozów dolistnych w doświadczeniach wazonowych i polowych. *Mat., Sem. Nauk. Dolistne dokarmianie i ochrona roślin w świetle badań i doświadczeń praktyki rolniczej*. Wyd. IUNG Puławy, 1988: 170-179.
11. Gąsiorowska B., Makarewicz A., Nowosielska A., Rymuza K.: Efektywność produkcyjna nawożenia azotem różnych odmian pszenicy jarej. *Pam. Puł.*, 2006, **142**: 117-125
12. Gondek R., Gondek A.: 2010. Wpływ nawożenia mineralnego na plonowanie i zawartość wybranych makro i mikroelementów w pszenicy jarej. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 2010, **55(1)**: 30-36.
13. Górski T., Kozyra J., Doroszewski A.: Field crop losses in Poland due to extreme weather conditions: case studies. W: *The influence of extreme phenomena on the natural environment and human living conditions*. Red. S. Liszewski. Łódź, 2008: 35-49.
14. Igras J., Jadczyzyn T., Karsznia M.: Produkcyjne i środowiskowe aspekty stosowania nawozów azotowych w Polsce. 2013. *Przemysł Chemiczny*. **92(12)**: 142-147.
15. Jadczyzyn T.: Podstawy naukowe doradztwa nawozowego. *Nawozy i Nawożenie*, 2000, **4**: 185-205.
16. Koc J., Skwierawski A.: Quantity indicators and conditions of phosphorus export from rural catchment basins to surface water. W: *Chemia. Związki Fosforu w chemii, rolnictwie, medycynie i ochronie środowiska*. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 2008, **4**: 122-151.
17. Kocoń A.: Nawożenie jakościowej pszenicy jarej i ozimej a plon i jakość ziarna. *Pam. Puł.*, 2005, **139**: 1-10.
18. Kocoń A.: Efektywność dolistnego dokarmiania pszenicy i rzepaku ozimego wybranymi nawozami w warunkach optymalnego nawożenia i wilgotności gleby. *Ann. UMCS*, 2009, vol. LXIV (**2**): 224-27.
19. Kocoń A., Sułek A.: Wpływ wilgotności podłoża oraz nawożenia azotem na wielkość plonu i wybrane parametry jakościowe ziarna pszenicy jarej. *Pam., Puł.*, 2010, **152**: 122-129.
20. Kołodziejczyk M., Szmigiel A., Oleksy A.: wpływ intensywności technologii uprawy na plonowanie wybranych odmian pszenicy jarej. *Acta Sci. Pol., Agric.*, 2007, **6(4)**: 5-14.
21. Kopiński J., Nieróbcza A., Ochalski P.: Ocena wpływu warunków pogodowych i zakwaszenia gleb w Polsce na kształtowanie produktywności Roślinnej. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2013, **13**, **2(42)**: 53-63.
22. Kozłowska W., Panasiuk K., Sulewska H.: Efekty nawożenia azotem jęczmienia jarego w warunkach półniedeschczowanych i deszczowanych. *Pam. Puł.*, 2006, **142**: 1-10.
23. Liszewski M., Błażewicz J.: Wpływ nawożenia dolistnego miedzią i manganem na przydatność słodowniczą ziarna jęczmienia (badania wstępne). *Pol. J. Agron.*, 2015, **23**: 18-23.

24. Noworolnik K.: Wpływ jakości gleby na plonowanie pszenicy jarej i jęczmienia jarego. *Acta Agroph.*, 2008, **11(2)**: 457-64.
25. Pecio A., Bichonisk A.: 2009. Nawożenie azotem i chemiczna ochrona roślin przed chorobami jako czynniki plonowania jęczmienia jarego. *Biul. IHAR*, 2009, **252**: 201-213.
26. Pecio A., Smagacz J.: Interaction between nitrogen and chemical plant protection in yield formation of cereal crops. W: *New Perspectives in Plant Protection*, 2012: 167-190.
27. Podleśna A., Cacak-Pietrzak G.: Kształtowanie plonu oraz parametrów przemiałowych i wypiekowych pszenicy jarej poprzez nawożenie azotem i siarką. *Pam. Puł.*, 2006, **142**: 381-392.
28. Ruszkowska M., Wojcieśka-Wyskupajtis U.: Mikroelementy – fizjologiczne i ekologiczne aspekty ich niedoboru i nadmiarów. *Zesz. Prob. Post. Nauk Rol.*, 1996, **434**: 1-11.
29. Sulek A.: Określenie reakcji nowych rodów i odmian pszenicy jarej na wybrane czynniki agrotechniczne. *Biul. IHAR*, 2004, **231**: 139-145.
30. Szczepaniak W.: Reakcja roślin uprawnych na nawożenie potasem. *J. Elementol*, 2004, **9(4)** 67-78.
31. Tubiello, F.N., Fischer, G.: Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation 1990-2080, *Tech. For. Soc. Ch.*, 007, **74**: 1030-1056.
32. Warchowska M., Domska D.: Wpływ dolistnego dokarmiania azotem i mikroelementami na zawartość i skład białka ziarna pszenżyta jarego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2002, **484**: 733-741.
33. Wierzbowska J., Nowak G.A.: Effects of cytokinins and auxins application on potassium management of spring wheat in relation to level on mineral fertilization. *Nater. Sc.*, 2000, **7**: 81-92.
34. Wojcieśka U.: Rola mikroelementów w kształtowaniu fotosyntetycznej produktywności roślin. *Post. Nauk Rol.*, 1985, **6**: 10-24.
35. Żarski J., Dudek S., Kuśmierz-Tomaszewska R.: Wpływ deszczowania i nawożenia azotem na plonowanie jęczmienia browarnego na glebie lekkiej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2009, **2**: 69-78.

Adres do korespondencji:

dr hab. Alicja Sulek, dr hab. Danuta Leszczyńska
Zakład Uprawy Roślin Zbożowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
Tel. 81 4786 819, 81 4786 815
e-mail: sulek@iung.pulawy.pl, leszcz@iung.pulawy.pl

Hanna Gołębiowska

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

**ZRÓŻNICOWANIE W ZACHWASZCZENIU ORAZ ODDZIAŁYWANIE
HERBICYDÓW W ZASIEWACH ROŚLIN UPRAWNYCH W KONTEKŚCIE
KRÓTKO- I DŁUGOTERMIONOWYCH ZMIAN POGODOWYCH***

Słowa kluczowe: warunki atmosferyczne, stan zachwaszczenia, skuteczność, selektywność, herbicydy

Wstęp

Zarówno zmiany warunków klimatycznych zachodzące na przestrzeni dekad czy wieków, jak i zróżnicowania zachodzące w skali jednego lub kilku lat mają znaczenie dla gospodarki rolnej, gdyż oddziałują na dynamikę pojawiania się agrofagów, w tym głównie chwastów segetalnych, utrudniając podejmowanie właściwych decyzji o ich eliminacji z upraw rolniczych (8, 14, 15, 24, 46, 58). Racjonalne ograniczenie liczebności chwastów, które są groźnymi konkurentami o przestrzeń życiową, wodę, światło i składniki pokarmowe, lub bezwzględna ich eliminacja z zasiewów roślin rolniczych będzie w najbliższym czasie nadal dokonywać się z wykorzystaniem herbicydów. O wyborze właściwego herbicydu decyduje dopasowanie do stanu gatunkowego zbiorowiska kształtującego się na przestrzeni wielu lat, jak też liczebność każdego z gatunków w zbiorowisku zmieniająca się w kolejnych sezonach wegetacyjnych. Nie mniej ważną rolę odgrywają właściwości fizykochemiczne środków związane z retencją, pobieraniem, przemieszczaniem i tempem blokowania przebiegu wielu przemian biochemicznych w roślinach (1, 23, 51). W każdej z tych sytuacji na końcowy efekt chwastobójczy znaczącą wpływają warunki termiczno-wilgotnościowe.

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.4 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Wpływ długoterminowych zmian warunków termiczno-wilgotnościowych na bioróżnorodność flory segetalnej i dobór herbicydów

Według raportu opublikowanego przez Międzynarodowy Zespół do Spraw Zmian Klimatu (IPCC) w okresie 1880-2012 średnia temperatura powietrza wzrosła o 0,85°C, rosła więc przeciętnie o 0,06-0,07°C na 10 lat (5, 29, 30, 65). Względny stan równowagi w zbiorowiskach chwastów utrzymujący się przez wiele lat, na tle nie odbiegających od normy warunków pogodowych oraz znajomość optymalnych wymagań do skielkowania nasion poszczególnych gatunków, umożliwiał wyznaczenie, z wykorzystaniem modeli matematycznych, terminu wschodów chwastów i prognozowanie o ile opóźnić lub przyspieszyć siew rośliny uprawnej, by ograniczyć konkurencyjność ze strony tych agrofagów (44, 48, 49). W badaniach A d a m c z e w s k i e g o i i n . (2) zastosowanie takich obliczeń miało wpływ na obniżenie zagrożenia między innymi chwastnicą jednostronną, włóśnicami, komosą białą, rdestem kolankowatym, ostrożeniem polnym i powojem polnym w uprawie kukurydzy. Obserwacje stanu zachwaszczenia w zasiewach kukurydzy prowadzone w rejonie południowo-zachodniej Polski w latach 1972-1991 oparte na danych zebranych metodą zdjęć fitosocjologicznych pozwoliły ustalić stan zachwaszczenia na plantacjach kukurydzy. Największe zagrożenie w grupie gatunków jednoliściennych stanowiła dla tego okresu chwastnica jednostronna *Echinochloa crus-galli* oraz perz właściwy *Elymus repens*, a z dwuliściennych: komosa biała *Chenopodium album* i gwiazdnica pospolita *Stellaria media*, natomiast rdesty powojowaty *Fallopia convolvulus* i plamisty *Polygonum persicaria* oraz włóśnice *Setaria*, wg opracowań R o l i i i n . (56) pojawiały się rzadziej, głównie na stanowiskach gleb czarnych (tab. 1).

Tabela 1

Stan zachwaszczenia kukurydzy gatunkami segetalnymi na podstawie zdjęć fitosocjologicznych
wykonanych w latach 1972-1991 w makroregionie południowo-zachodnim Polski

Gatunek	Liczba zdjęć	Liczba wystąpień	*S	**W.p.
Czarne ziemie-kompleks przydatności rolniczej 1 i 2				
<i>Chenopodium album</i>	1112	1001	V	1567
<i>Echinochloa crus-galli</i>		846	IV	1325
<i>Stellaria media</i>		889	IV	567
<i>Setaria</i> spp.		368	II	294
<i>Elymus repens</i>		344	II	244
<i>Fallopia convolvulus</i>		112	I	42
<i>Fallopia persicaria</i>		79	I	43
Gleby brunatne-kompleks przydatności rolniczej 4 i 5				
<i>Chenopodium album</i>	128	121	V	2186
<i>Elymus repens</i>		83	IV	2074
<i>Stellaria media</i>		115	V	832
<i>Echinochloa crus-galli</i>		125	V	634
<i>Fallopia convolvulus</i>		57	III	179
<i>Fallopia persicaria</i>		29	II	79
<i>Setaria</i> spp.		71	III	36
<i>Equisetum arvense</i>		64	III	28

Tabela 1 cd.

Gleby płowe-kompleks przydatności rolniczej 5 i 6				
<i>Chenopodium album</i>	565	527	V	1782
<i>Elymus repens</i>		519	V	1502
<i>Stellaria media</i>		520	V	1569
<i>Echinochloa crus-galli</i>		421	IV	1443
<i>Setaria</i> spp.		178	II	978
<i>Equisetum arvense</i>		411	IV	489
<i>Fallopia convolvulus</i>		48	I	258
<i>Fallopia persicaria</i>		44	I	47

*S – Stałość fitosocjologiczna, **W.p. – Współczynnik pokrycia

Źródło: opracowanie własne na podstawie Rola i in., 1992 (56)

Stabilny rozkład warunków termiczno-wilgotnościowych na przestrzeni lat pozwalał również na regularne pojawianie się faz fenologicznych krzewów i drzew (np. *Forsythia viridissima*, *Syringa vulgaris*, *Prunus spinosa*, *Rosa multiflora*, *Sorbus aucuparia*), których terminy kwitnienia czy owocowania służyły do wyznaczania terminów wschodów chwastów, takich jak żóltlica pospolita, gwiazdnica pospolita, przetacznik perski i często służyły do ustaleniu optymalnych terminów zwalczania tych gatunków w zbożach jarych czy uprawie kukurydzy nie tylko w warunkach Polski, ale również w różnych rejonach Europy (4, 50).

Względny stan równowagi w zbiorowiskach chwastów dał możliwość ustalenia charakterystycznych zbiorowisk chwastów dla poszczególnych upraw rolniczych oraz terminów ich wschodów, co pozwoliło dopasować do ich eliminacji odpowiednie środki chwastobójcze np. z grupy herbicydów triazynowych w uprawie kukurydzy. Były to środki stosowane przez ponad pięćdziesiąt lat do zwalczania wielu gatunków chwastów, z zachowaniem wysokiej selektywności w stosunku do zróżnicowanych pod względem genetycznym mieszańców odmianowych kukurydzy. Oprócz tego, możliwość łączenia tych środków z innymi herbicydami pozwalała zwiększać spektrum działania i na długo zabezpieczać plantację przed zachwaszczeniem, nawet w późniejszych okresach wegetacji. Po ponad 50 latach ciągłego stosowania triazyn, oprócz negatywnych skutków dla środowiska glebowego i wodnego, zmalała ich skuteczność w stosunku do niektórych gatunków chwastów, nastąpiło uodparnianie się gatunków wrażliwych, np. komosy białej, oraz kompensacja gatunków średnio wrażliwych i odpornych (24, 62).

W 2005 roku atrazyna została wycofana z listy herbicydów zalecanych, głównie ze względu na długi okres zalegania w glebie oraz obecność produktów jej rozpadu w wodach gruntowych. Obecnie, na skutek zmian pogodowych i niskiej skuteczności atrazyny w niszczeniu gatunków ciepłolubnych, zwłaszcza jednoliściennych: chwastnicy jednostronnej, włośnicy zielonej i sieniei, których udział w zasiewach kukurydzy sukcesywnie wzrasta, szersze zastosowanie mają herbicydy z grupy pochodnych sulfonilomocznika, charakteryzujące się znacznie większym spektrum działania i ograniczonym wpływem na środowiska.

Wpływ krótkoterminowych zmian warunków termiczno-wilgotnościowych na bioróżnorodność flory segetalnej i dobór herbicydów

Z raportu IPCC wynika, że w latach 2001-2010 tempo ocieplenia wyraźnie wzrosło, średnio do około $0,13^{\circ}\text{C}$ na 10 lat i było już niemal dwukrotnie większe niż w okresie 1880-2000 (5, 29, 30, 65). W przebiegu pogody zwiększył się udział lata, a zmalał – zimy. Ponadto dekada 2001-2010 była najcieplejsza w analizowanym okresie pod względem zarówno średniej rocznej temperatury, jak też wartości w krótszych okresach odpowiedzialnych za poszczególne etapy rozwoju roślin (63, 64). Taki układ pogodowy charakteryzuje rejon południowo-zachodni, gdzie wzrost średnich temperatur w ostatnich dwóch dekadach oraz niższe opady w porównaniu ze średnimi wieloletnimi skutkuje: pojawianiem się łagodnych, często bezśnieżnych zim oraz wczesnego przedwiośnia, wzrostem natężenia światła, co w efekcie przyspiesza kiełkowanie, kwitnienie i rozwój chwastów. Naraża to zboża jare, okopowe czy kukurydzę na silniejszą konkurencję (23, 26, 40, 42); (tab. 2).

Tabela 2

Średnie miesięczne temperatury powietrza (T) oraz miesięczne sumy opadów (O) w rejonie Wrocławia w okresie 1997-2015 w porównaniu do średniej wieloletniej za okres 1956-1996

Lata	Średnie temperatury i opady za dany okres		Kwiecień	Maj	Czerwiec	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Październik
1956-1996	T °C	13,7	8,0	13,3	16,6	18,2	17,5	13,5	8,8
	O mm	57,7	37,6	61,3	71,4	80,0	67,7	47,6	38,4
1997-2015	T °C	15,2	10,7	14,9	17,7	19,8	19,0	14,2	9,9
	O mm	38,86	19,9	37,5	42,9	72,5	43,7	29,6	25,4
2013	T °C	15,06	11	15	17,1	21	19,3	12,9	9,1
	O mm	12,03	22	29	9,3	5,8	9,1	0,4	8,6
2014	T °C	15,19	10,9	13,1	16,2	20,3	17,6	15,4	12,8
	O mm	17,3	8,1	23,9	13,5	26,9	21,1	26	1,6
2015	T °C	15,10	9	13,4	16,7	20,2	22,4	14,8	9,2
	O mm	11,4	3,93	9,5	18,2	22,7	11,7	0,6	13,1

Źródło: opracowanie własne na podstawie Gołębiowska, 2008 (23)

Z wielu doniesień literaturowych wynika, że temperatura gleby i powietrza, wielkość opadów oraz wilgotność w największym stopniu stymulują bądź hamują kiełkowanie i wschody chwastów zgromadzonych w glebowym banku nasion, przez co zbiorowiska te według Korres i Froudd-Williams, zdolne są do szybkich przekształceń (39). Natomiast na produkcję biomasy chwastów korzystniej wpływa dostępność wody niż temperatura czy inne warunki siedliskowe, a zmiany tych warunków na przestrzeni lat w różnych regionach głównie kształtują ich bioróżnorodność (9, 28). W uprawie kukurydzy ilość opadów od kwietnia do maja jest czynnikiem silniej decydującym o poziomie zachwaszczenia niż suma temperatur w tym okresie (10).

Na skutek zmian pogodowych zachodzących w skali jednego lub kilku lat w okresie od 2001 do 2015, w zbiorowiskach chwastów występowały istotne zróżnicowania. Odnotowano stały wzrost liczebności gatunków ciepłolubnych, późno wschodzących, jak: psianka czarna *Solanum nigrum*, czy włośnica zielona *Setaria viridis* bądź sina *Setaria pumila*, które stanowiły zagrożenie w zachwaszczeniu wtórnym. Konsekwencją ocieplenia są również migracje gatunków inwazyjnych łatwo wnikających do zbiorowisk antropogenicznych z nieużytków np. bylicy pospolitej *Artemisia vulgaris*, lub z rejonów Europy południowej np. ambrozji bylicolistnej *Ambrosia artemisiifolia*, sorga alepskiego *Sorghum halepense*, czy zaślazu pospolitego *Abutilon theophrasti* (18, 25, 43, 45). Gatunki stanowiące potencjalne zagrożenie dla upraw sianych w szerokich międzyrzędziach łatwo wnikają w tzw. nisze ekologiczne powstałe w wyniku całkowitego usunięcia gatunków stałych np. komosy białej. Pojawienie się nowych, niepożądanych gatunków silnie wypierających inne taksony z agroekosystemów lub szybko aklimatyzujące się do nowych warunków (np. wyczyniec polny *Alopecurus myosuroides*) często prowadzi do kompensacji agresywnego gatunku, co stwarza problemy z ustaleniem programów odchwaszczenia i odpowiednim doбором herbicydów (11, 12, 16).

Na skutek wyższych średnich rocznych temperatur w uprawie kukurydzy, w latach 1983-2013 odnotowano wzrost wskaźników bioróżnorodności zwłaszcza w grupie gatunków dwuliściennych jednorocznych. Wyższe były również współczynniki pokrycia dla gatunków dominujących, zaobserwowano większe nasilenie gatunków inwazyjnych jak bylica pospolita *Artemisia vulgaris* czy pojawienie się *Abutilon theophrasti* oraz gatunków ciepłolubnych, zwłaszcza włośnicy sianej i zielonej, psianki czarnej i blekotu pospolitego *Aethusa cynapium* (18); (tab. 3).

Tabela 3

Wybrane wskaźniki bioróżnorodności zbiorowisk chwastów w uprawie kukurydzy w latach 1973-2013

Wskaźniki bioróżnorodności zbiorowisk	Średnie z badanych okresów			
	1973-1982	1983-1992	1993-2002	2003-2013
Liczba zdjęć fitosocjologicznych	179	264	470	444
Średnia liczba gatunków w zdjęciu fitosocjologicznym	49	45	53	51
w tym:				
- jednoliścienne jednoroczne	5	5	3	4
- jednoliścienne wieloletnie:	1	1	1	1
- dwuliścienne jednoroczne	35	33	43	41
-dwuliścienne wieloletnie:	8	5	5	4
-inne	-	1	1	1
Liczba gatunków sporadycznych i rzadkich	12	4	8	4

Tabela 3 cd.

Gatunki dominujące	*W.p.	**S	W.p.	S	W.p.	S	W.p.	S
<i>Echinochloa crus-galli</i>	1444,9	IV	1560	IV	1783,7	V	1704,2	V
<i>Chenopodium album</i>	2325,9	V	2823	V	1523,5	IV	1512,1	V
Suma współczynników pokrycia	3770,8		4383		3307,2		3216,3	

*W.p. – Współczynnik pokrycia (ang. *Cover factor*), **S – Stałość fitosocjologiczna (ang. *Phytosociological stability*)

Źródło: opracowanie własne na podstawie Gołębiowska, Badowski, 2010 (18)

Bardzo ważnym elementem, który wpływa na skuteczność herbicydów jest przestrzeganie zaleceń producenta środka, który na etykiecie produktu zamieszcza informacje dotyczące warunków atmosferycznych podczas zabiegu, np.: temperatura powietrza i gleby, wilgotność powietrza, wielkość opadu przed i w trakcie zabiegu, czy stan rośliny i gleby w momencie oprysku. Zbyt niska temperatura, susza lub nadmierne opady, jako czynniki stresowe wpływają również na obniżenie selektywności środków chwastobójczych zwłaszcza tych z grupy regulatorów wzrostu, inhibitorów syntezy aminokwasów lub pigmentów, szczególnie w stosunku do odmian o niskiej tolerancji (6, 32, 19, 59). Środki te działając fitotoksycznie i mogą zakłócać szereg procesów życiowych roślin, czego konsekwencją są zmiany w morfologii (np. nekrozy, chlorozy, odbarwienia, zahamowanie wzrostu, deformacje). Takie obserwacje zostały wykazane na podstawie wieloletnich badań nad reakcją odmian zbóż (33, 36, 37, 52) oraz nad oddziaływaniem herbicydów na odmiany mieszańcowe kukurydzy w zróżnicowanych warunkach pogodowych (17, 20, 21).

W uprawie zbóż problemem staje się dostosowanie optymalnych terminów aplikacji herbicydów w okresie jesiennym. Przed wschodami zbóż skuteczność herbicydów w znacznej mierze zależy od temperatury gleby - wyższej od minimalnej dla kiełkowania nasion chwastów oraz stanu jej uwilgotnienia umożliwiającego kontakt chwastów z herbicydem. Często jednak duże wahania temperatur oraz występująca okresowo susza opóźniają lub znacznie wydłużają wschody chwastów, co może spowodować konieczność wykonania zabiegu dopiero wiosną.

Warunki panujące w glebie w mniejszym stopniu wpływają na efektywność zabiegów nalistnych, ale poprzez hamowanie wschodów i osłabienie przemieszczania się herbicydu w roślinie mogą pośrednio przyczyniać się do zmniejszenia ich skuteczności (52). Dla zabiegów nalistnych większe znaczenia ma odpowiednia temperatura powietrza. Ogólnie przyjmuje się, że optymalną dla większości herbicydów jest temperatura w granicach 10-25°C. W tym zakresie temperatur obserwowane jest najwyższe tempo przemian fizjologicznych zachodzących w chwastach (62). Wysoka temperatura sprzyja szybkiemu pobieraniu herbicydów przez chwasty, jednak zbyt szybkie wysychanie cieczy opryskowej znacznie zmniejsza wchłanianie przez roślinę. Tylko nieliczne etykiety-instrukcje stosowania herbicydów podają graniczne wartości temperatur podczas ich aplikacji. Wynika z nich, że o ile maksymalna temperatura

dla większości herbicydów wynosi 20-25 °C, to temperatura minimalna zawiera się w zdecydowanie szerszym zakresie, od -3°C dla chlorotoluronu do około 8-12°C dla chlorosulfuronu czy 2,4-D (7).

Czynniki atmosferyczne, takie jak temperatura powietrza, czy gleby istniejące tuż przed i w momencie wykonania zabiegu oraz krótko po nim wpływają na efektywność herbicydów w dwojaki sposób. Bezpośrednio na zachowania się herbicydów na powierzchni roślin i gleby oraz pośrednio w kształtowaniu się cech anatomicznych i morfologicznych roślin oraz na przebieg procesów fizjologicznych, co determinuje ich wrażliwość w stosunku do herbicydów (41). Wyższa temperatura powietrza zwiększa skuteczność działania herbicydów poprzez zwiększenie tempa pobierania, przemieszczania oraz degradacji w roślinie (34, 35).

Korzystny rozkład opadów i wysoka wilgotność sprzyjają wschodom wielu gatunków chwastów aż do późnej jesieni, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu bioróżnorodności gatunkowej. Wzrost średniej rocznej temperatury i nasłonecznienia, zwłaszcza w miesiącach czerwiec/lipiec, w bilansie rocznym prowadzi jednak do ubytku wody z gleby i zmniejszeniu jej wilgotności (65). Warunki te są mniej dokuczliwe dla chwastów lepiej znoszących okresy suszy od roślin uprawnych, które w warunkach długotrwałej suszy na ogół reagują istotnym spadkiem plonu ziarna (38, 10, 23). Warunki wilgotnościowe ogrywają również istotny wpływ na przeprowadzenie zabiegów chwastobójczych z użyciem herbicydów stosowanych zarówno doglebowo jak i nalistnie. Wiele herbicydów doglebowych tuż po zabiegu wymaga przemieszczenia w wilgotną glebę, co umożliwi szybki kontakt z kiełkującymi chwastami, a także w celu ograniczenia procesy parowania i fotorozkładu. Brak właściwego uwilgotnienia w tym czasie prowadzi do znacznego obniżenia skuteczności zabiegu. Natomiast intensywne, długotrwałe opady deszczu, mogą spowodować wymywanie herbicydów w głębsze warstwy gleby poza strefę dostępną dla wschodzących chwastów. Zalegające w głębszych warstwach gleby herbicydy mogą być powodem pojawiających się uszkodzeń, głębiej korzeniących się roślin uprawnych (62). Warunki jakie panują w glebie w mniejszym stopniu wpływają na efektywność zabiegów nalistnych, ale hamując wschody chwastów lub powodując wystąpienie stresu wodnego (osłabienie tempa wzrostu, silnie wykształcona kutikula, ograniczenie procesów fizjologicznych, a co z tym się wiąże słabsze przenikanie i przemieszczanie się w roślinie), mogą pośrednio przyczyniać się do zmniejszenia ich skuteczności działania (62).

Według wymagań European and Mediteranean Plant Protection Organization aplikacja herbicydów powinna odbywać się przy wilgotności względnej powietrza pomiędzy 50 a 90%, a optymalnie 75-80%. Niska wilgotność, zwłaszcza w połączeniu z wysoką temperaturą, powoduje wytwarzanie na liściach chwastów grubej warstwy kutikuli, utrudniającej wnikanie cieczy opryskowej do wnętrza tkanek roślinnych. Ponadto przy niskiej wilgotności powietrza dochodzi do szybkiego wyparowania cieczy opryskowej. Przy wyższej wilgotności zmniejszeniu ulega stres wodny,

a także wydłuża się czas wysychania kropel cieczy na liściach chwastów i poprawia się skuteczność zabiegu (13). Poprawność wykonanego zabiegu to również przestrzeganie takich warunków jak:

- stan roślin podczas zabiegu – turgor i uwilgotnienie. Rośliny nie powinny być zwiędnięte i mokre np. od porannej rosy. Wpływa to na tempo wchłaniania herbicydów przez liście chwastów lub spływanie nadmiaru cieczy wraz z rosą lub obniżenie stężenia herbicydu na jednostce powierzchni.
- termin wystąpienia i intensywność opadów przed i po zabiegu. Minimalny czas, jaki powinien upłynąć od zabiegu opryskiwania do wystąpienia pierwszych opadów jest zwykle bardzo różny i zależy głównie od substancji czynnej, formulacji preparatu czy obecności adiuwantów w cieczy roboczej (np. pinoksaden pobierany jest w ciągu 1 godziny od zastosowania, przez co opady deszczu, które wystąpią po tym czasie nie obniżają skuteczności jego działania). Nieco dłuższy czas wchłaniania, wynoszący około 3 godzin, posiadają środki zawierające w swoim składzie chlorosulfuron. Natomiast dla większości herbicydów stosowanych nalistnie przyjmuje się minimalny okres 6 godzin od wykonania zabiegu do wystąpienia opadów (7).
- prędkość i kierunek wiatru podczas zabiegu, który może spowodować znoszenie cieczy opryskowej na sąsiednie rośliny uprawne, powodując ich uszkodzenia. Wykonywanie oprysków powinno się odbywać przy prędkości wiatru nie przekraczającej 3 m/s (około 11 km/h), z stosowaniem zabezpieczeń w postaci dysz płaskostrumieniowych antydryfowych.

W uprawie kukurydzy – rośliny wymagającej stosowania szerokich międzyrzędzi – zachodzi obawa, czy w warunkach integrowanej uprawy dopuszczającej łączenia różnych metod regulacji zachwaszczenia w tym także optymalizacji dawek herbicydów zachodzi obawa pojawienia się zachwaszczenia wtórnego. Korzystny dla uprawy kukurydzy rozkład temperatur i opadów na przedwiośniu w rejonie południowo-zachodnim Polski umożliwia siew i wykonanie pierwszych zabiegów doglebowych już w połowie kwietnia. Przeprowadzone zabiegi wykazują dobrą skuteczność, jednak w dalszym etapie rozwoju rośliny uprawnej, szczególnie po obfitych opadach w czerwcu, pojawia się zachwaszczenie wtórne (40). Wykorzystanie systemu zabiegów w dawkach dzielonych z dodatkiem adiuwantu, skutecznie wydłuża czas działania na chwasty. W rezultacie straty plonów z tytułu zachwaszczenia wtórnego udaje się skutecznie ograniczać nawet przy niezbyt korzystnym przebiegu pogody (22, 47).

Realizacja założeń integrowanej ochrony roślin związana jest z ograniczeniem stosowania środków chemicznych. Jednym z rozwiązań jest redukcja dawek. Wielu autorów dowodzi, że niższe od zalecanych dawki herbicydów mogą okazać się skuteczne, ponieważ nawet nie zniszczone całkowicie chwasty są na tyle ograniczone w rozwoju, że nie wpływają istotnie na plon rośliny uprawnej (27, 61). Skuteczność herbicydów stosowanych w obniżonej dawce w znacznie większym stopniu jest modyfikowana przez warunki siedliskowe i zależna od przebiegu pogody (41). Są

również inne badania, które dowodzą, że nawet optymalne warunki środowiskowe oraz stosowanie herbicydów we wczesnych fazach rozwojowych chwastów nie gwarantuje wysokiej skuteczności chwastobójczej (51, 55). Niekorzystny wpływ pogody może być w znacznym stopniu ograniczony dzięki łącznej aplikacji herbicydów z adiuwantami, których głównym zadaniem jest poprawa skuteczności działania preparatu, przez wzrost retencji i absorpcji (3, 54). Adiuwanty ograniczają również proces krystalizacji cieczy użytkowej na powierzchni roślin i opóźniają jej wysychanie, a także znacznie zwiększają przyczepność i rozpuszczalność herbicydu (53, 60). Możliwość wykorzystania tribenuronu metylu w ograniczonej dawce z dodatkiem adiuwanta do niszczenia niektórych gatunków chwastów wykazano w badaniach wpływu interakcji temperatury (20/10 i 10/5°C) lub wilgotności powietrza (75 i 50%) z fazą rozwojową chwastów (2-4 i 6-8 liści). W warunkach optymalnych, tj. faza rozwojowa 2-4 liście i wysoka temperatura (20/10°C) lub wilgotność powietrza 75%, tribenuron metylu zastosowany w dawce zredukowanej łącznie z adiuwantem Trend 90 EC był wysoce skuteczny w stosunku do rumianu polnego *Anthemis arvensis*, maku polnego *Papaver. rhoeas* i gwiazdnicy pospolitej *Stelaria media*. Skuteczność badanego herbicydu w większym stopniu uzależniona była od fazy rozwojowej chwastów niż czynnika abiotycznego. W przypadku roślin starszych działanie herbicydu w dawce zredukowanej było słabsze, nawet w warunkach wyższej temperatury i wilgotności powietrza.

Zatem adiuwanty mogą odgrywać znaczącą rolę w niwelowaniu niekorzystnego wpływu warunków środowiska na efektywność herbicydów, a ich dodatek umożliwia znaczne ograniczenie dawki herbicydu, z jednoczesnym zachowaniem skuteczności chwastobójczej na satysfakcjonującym poziomie (57, 31).

Podsumowanie

Stosowanie herbicydów to nadal podstawowa metoda regulacji zachwaszczenia na plantacjach roślin uprawnych. Wykorzystywane preparaty dopasowane są zarówno do stanu gatunkowego zbiorowiska kształtującego się na przestrzeni wielu lat, jak i do liczebności każdego z gatunków w zbiorowisku, zróżnicowanej w kolejnych sezonach wegetacyjnych. Na skutek długoterminowych zmian pogodowych w zbiorowiskach chwastów zachodzą istotne zróżnicowania. Obserwowany jest wzrost liczebności gatunków ciepłolubnych późnowschodzących, jak psianki czarnej *Solanum nigrum* czy włośnicy zielonej *Setaria viridis* bądź sieniei *Setaria pumila*. Konsekwencją tych zmian są również migracje gatunków inwazyjnych z terenów odłogowanych – bylicy pospolitej *Atrémisia vulgáris* czy z rejonów Europy południowej – zaślazu pospolitego *Abutilon theophrasti*. Pojawienie się nowych, niepożądanych gatunków, silnie wypierających inne taksony z rodzimych agroekosystemów lub szybko aklimatyzujących się do nowych warunków, jak wyczyniec polny *Alopecurus myosuroides*, często prowadzi do kompensacji

agresywnego gatunku na skutek błędów wynikających ze źle dobranych herbicydów. Wykorzystując obecnie preferowane metody regulacji zachwaszczenia, w tym stosowanie odpowiednio dobranych herbicydów lub ich mieszanin aplikowanych w systemie dawek dzielonych z dodatkiem adiuwantów, możemy skutecznie ograniczać zachwaszczenie. Takie zabiegi systemowe umożliwiają znaczne ograniczenie dawki herbicydu z jednoczesnym wydłużeniem okresu jego oddziaływania na chwasty, często aż do późnych faz rozwojowych roślin uprawnych.

Przebieg pogody w czasie wykonywania zabiegów wpływa bezpośrednio na zachowanie się herbicydów na powierzchni roślin i gleby oraz pośrednio w kształtowaniu cech anatomicznych i morfologicznych roślin, jak również przebieg procesów fizjologicznych, co determinuje wrażliwość roślin w stosunku do herbicydów. Zbyt niska temperatura, susza lub nadmiar opadów, jako czynniki stresowe, często wpływają na obniżenie selektywności środków chwastobójczych, zwłaszcza tych z grupy regulatorów wzrostu, inhibitorów syntezy aminokwasów lub pigmentów, szczególnie w stosunku do odmian o niskiej tolerancji. Omawiane środki mogą zakłócać szereg procesów życiowych roślin, czego konsekwencją jest obniżenie kondycji i zmiany morfologiczne roślin.

Skuteczność herbicydów przedwiosennych w znacznej mierze zależy od temperatury i wilgotności gleby. Dla zabiegów nalistnych większe znaczenie ma temperatura powietrza decydująca o szybkości przemian fizjologicznych w roślinie. Korzystny rozkład opadów i wysoka wilgotność sprzyjają wschodom wielu gatunków chwastów, aż do późnej jesieni, co prowadzi do wzrostu bioróżnorodności gatunkowej.

Literatura

1. Adamczewski K., Heller K.: Zmiany w zachwaszczeniu wywołane zmianami w agrotechnice roślin i zmianami klimatycznymi. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin*, 2002, **42(1)**: 349-357.
2. Adamczewski K., Praczyk T., Stachecki S.: Wpływ opadów atmosferycznych i temperatury powietrza na występowanie niektórych gatunków chwastów oraz ich konkurencyjność w stosunku do roślin uprawnych. *Mat. 17 Konf. „Przyczyny i źródła zachwaszczenia pól uprawnych”*. Olsztyn–Bęsia, 28-29 czerwca 1994: 109-116.
3. Aliverdi A., Mohassel M.H.R., Mahallati M.N.: Increased foliar activity of clodinafop-propargyl and/or tribenuron-methyl by surfactants and their synergistic action on wild oat (*Avena ludoviciana*) and wild mustard (*Sinapis arvensis*). *Weed Biol. Manag.*, 2009, **9(4)**: 292-299.
4. Alonen J., Hyvonen T.: Response of weed floras in spring cereal fields to changes in crop production in Finland over four decades. In: XI colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, Dijon 6-8. september 2000, 127-134.
5. Biernacki D., Filipiak J., Miętus M., Wójcik R.: Zmienność warunków termicznych w Polsce po roku 1951. Rezultaty projektu KLIMAT. W: Bednorz E., Kolendowicz L. (red.), *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Zmiany i ich konsekwencje*, Seria: Studia i Prace z Geografii i Geologii, 2010, **16**: 9-21.
6. Bónis P., Árendás T., Berzsény Z., Marton C.S.: Herbicide tolerance studies on maize inbred lines. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. J. Plant Diseases and Prot., Sonderheft*, 2004, **XIX**: 901-907.

7. Bortniak M., Sekutowski T.: Pogoda jednak ma wpływ na działanie herbicydów. Nasza rola. 29.10.2015: 5-6.
8. Bradley B.A., Oppenheimer M., Wilcove D. S.: Climate change and plant invasions: restoration opportunities ahead? *Global Change Biology*, 2009, **15**(6): 1511-1521.
9. Christensen J. H., Hewitson B.: Regional climate projections. In: *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007: 847-940.
10. Dobrzański A., Adamczewski K.: Wpływ walki z chwastami na bioróżnorodność agrofitycenozy. Effect of weed control on biodiversity agrophytocenosis. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin*, 2009, **49**(1): 176-182.
11. Domaradzki K.: Influence of herbicide and application timing on *Alopecurus myosuroides* Huds. control in winter wheat in Poland. *J. Plant Dis. Prot.*, 2006, **XX**: 817-821.
12. Domaradzki K., Snopczyński T., Jezierska-Domaradzka A. Zaślazł pospolity (*Abutilon theophrasti* Medik.), nowy groźny chwast upraw polowych – charakterystyka, występowanie i możliwości zwalczania. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin*, 2008, **48**(2): 567-574.
13. European and Mediteranean Plant Protection Organization (EPPO). Bulletin 2005, No.: 135, 152, 181, 214, 50.
14. Evans N.: Range and severity of a plant disease increased by global warming. *J. R. Soc. Interface*, 2008, **5**: 525-531 (doi:10.1098/rsif. 2007.1136).
15. Ewert F., Rounsevell M. D. A., Reginster I., Metzger M. J., Leemans R.: Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2005, **107**: 101-116.
16. Fumanal B., Girod C., Fried G., Bretagnolle F., Chauvel B.: Can the large ecological amplitude of *Ambrosia artemisiifolia* explain its invasive success in France? *Weed Res.*, 2008, **48**(4): 349-359.
17. Gołębiowska H., Rola H.: Reakcja odmian kukurydzy na herbicydy w świetle badań prowadzonych w warunkach Dolnego Śląska w latach 1992-2007. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin*, 2008, **48**(2): 590-601.
18. Gołębiowska H., Badowski M.: Przenikanie *Artemisia Vulgaris* L. do zbiorowisk segetalnych niektórych upraw rolniczych na terenie Dolnego Śląska. *Fragm. Agron.*, 2010, **27**(3): 54-62.
19. Gołębiowska H., Kieloch R.: Stresy roślin rolniczych-reakcje, objawy, identyfikacja oraz skutki ich oddziaływania. Aplikacyjne i teoretyczne problemy w przemyśle rolno-spożywczym. *Studia i monografie, Politechnika Opolska*, 2014, **370**: 58-65
20. Gołębiowska H., Rola H.: The assessment of grain quality of maize cultivars depending on the way and term of herbicides application. *Polish J. Agron.*, 2010, **2**: 11-17.
21. Gołębiowska H., Rola H., Sumińska J.: Oddziaływanie herbicydów stosowanych w kukurydzy na jakość ziarna. *Progr. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin*, 2009, **49**(2): 797-806.
22. Gołębiowska H., Skorupa M.: Problem zachwaszczenia wtórnego w warunkach integrowanej technologii produkcji. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin*, 2013, **46**(2): 413-415.
23. Gołębiowska H.: Dynamika występowania flory segetalnej w uprawie kukurydzy na Dolnym Śląsku w latach 1972-2008 i obecne możliwości jej regulacji. *Monografie i rozprawy naukowe, IUNG-PIB Puławy*, 2011, **30**: 1-113.
24. Gołębiowska H.: The problems of weed management by herbicide systems applied in maize. *J. Plant Prot. Res.*, 2008, **48**(1): 120-128.
25. Gornall J., Betts R., Burke E., Clark R., Camp J., Willett K., Wiltshire A. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 2010, **365**: 2973-2989.
26. Górski T., Kozyra J.: Agroklimatyczna norma średniej temperatury powietrza w Polasce na lata 2011-2020. *Polish J. Agron.*, 2011, **5**: 21-28.
27. Haliniarz M.: Skuteczność zwalczania chwastów w pszenicy ozimej w zależności od dawki chlorotoluronu (Lentipur Flo 500 SC). *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska*, 2013, Sec. E, **LXIX**(3): 20-31.

28. Hurle K., Maier J., Amann A., Weishaar T., Mozer B., Pulcher-Hausling M.: Auswirkungen unterlassener Pflanzenschutz und Dungungsmassnahmen auf die Unkrautflora-Erste Ergebnisse aus einen mehrjahring Versuchsprogramm. Z. für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz J. Plant Diseases and Prot., Sonderheft, 1988 Sp. Issue XI: 175-187.
29. IPCC, 2009. Zmiana klimatu 2007: Raport Syntetyczny. Wkład Grup roboczych I, II i III do Czwartego Raportu Oceniającego Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu, red. R.K. Pachauri, A. Reisinger, IOS, Warszawa 2009.
30. IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change red. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, Marosz M.
31. Javid M. M., Tanveer A., Ahmad R., Yaseen M., Khaliq A.: Optimizing activity of herbicides at reduced rate on *Emex spinosa* Campd. with adjuvants. Planta Daninha, 2012, **30(2)**: 425-435.
32. Kacperska A.: Reakcje roślin na abiotyczne czynniki stresowe. W: Fizjologia roślin, Kopcewicz J. (red.), St. Lewak. Warszawa, 2002: 612-678.
33. Kieloch R.: Stabilność plonowania odmian pszenicy ozimej w warunkach zróżnicowanej ochrony herbicydowej. Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin, 2013, **53(4)**: 740-743.
34. Kieloch R., Domaradzki K.: Wpływ współdziałania wilgotności gleby i fazy rozwojowej chwastów na skuteczność herbicydów stosowanych w zróżnicowanych dawkach. Post. Ochr. Rośl., 2015, **55(1)**: 58-63.
35. Kieloch R., Sadowski J., Domaradzki K.: Influence of selected soil-climatic parameters and application method of tribenuron methyl on biomass productivity and amino acids content in weeds. J. Plant Dis. Prot., 2014, **121(1)**: 26-31.
36. Kieloch R., Sumińska J.: Oddziaływanie herbicydów na plonowanie oraz jakość ziarna trzech odmian pszenicy ozimej. Prog. in Plant Prot./Post. Ochr. Roślin, 2012, **52(2)**: 266-271.
37. Kieloch R., Sumińska J., Rola H.: Wpływ pochodnych fenylmocznika na przydatność ziarna odmian pszenicy ozimej do celów młynarskich i piekarniczych. Fragm. Agron., 2008, **1(97)**: 157-167.
38. Kohot V., Tyšer L., Holec J., Soukup J.: The influence of changes in crop sowing area on the composition of weed communities on arable land in the Czech Republic. Herbologia, 2003, **4(1)**: 13-19.
39. Korres N. E., Froudd-Williams R. J. Effect of winter wheat cultivars and seed rate on the biological characteristics of naturally occurring weed flora. In: Weed Res., 2002, **42(6)**: 417-428.
40. Kozyra J.: Climatic conditions for millet cultivation in Poland. WMO – CagM Report, Geneva, 2004, **94**: 34-35
41. Kudsk P.: Reduced herbicide rates: present and future. Proceedings of 26th German Conference on Weed Biology and Weed Control. Braunschweig, Germany, 11-13 March, 2014: 37-44.
42. Kundzewicz Z.W., Kozyra J.: Ocena zmian klimatu i ograniczanie wpływu zagrożeń klimatycznych w odniesieniu do rolnictwa i obszarów wiejskich. Polish J. Agron., 2011, **7**: 68-81.
43. Latowski K., Chmiel J., Jackowiak B., Żukowski W.: Udział antropofitów we florze segetalnej Wielkopolski. Fragm. Agron., 2010, **27(3)**: 103-111.
44. Leguizamón E. S., Fernandez-Quinilla G., Barroso J., Gonzalez-Andujar J. L.: Using thermal nad hydrothermal time to model seedling emergence of *Avena sterilis* ssp. Ludoviciana in Spain. Weed Res. 2004, **45**: 149-156.
45. Lipa J. J.: Następstwa zmian klimatycznych dla kwarantanny i ochrony roślin . Prog. in Plant Prot./Post. Ochr. Roślin, 2008, **48(3)**: 777-791.
46. Lisowicz F.: Narastająca szkodliwość omacnicy prosowianki (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) dla kukurydzy w południowo-wschodniej Polsce. Prog. Plant Protection/ Post. Ochr. Roślin, **43**: 247-250.
47. Lobell D.B., Field C.B.: Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. Environ. Res. Lett., 2007, **2**: 1-7.
48. Mačák M., Žák Š., Djalovic I., Szombathová N.: The influence of an ecological and low input systems on weed density, weed diversity and weed competition on spring barley. J. Plant Dis. Prot., 2008, **XXI**: 425-430.
49. Melander B., Rasmussen I. A., Barbieri P.: Integrating physical and cultural methods of weed control – examples from European research. Weed Sci., 2005, **53**: 369-381.

50. Otto S., Masin R., Chiste G., Zanin G.: Modelling the correlation between plant phenology and weed emergence for improving weed control. *Weed Res.*, 2005, **45(6)**: 149-156.
51. Petersen J., Hurlle K.: Influence of climatic conditions and plant physiology on glufosinate-ammonium efficacy. *Weed Res.*, 2001, **41(1)**: 31-39.
52. Praczyk T.: Diagnostyka uszkodzeń herbicydowych roślin rolniczych. PWRiL, Poznań 2002.I.
53. Praczyk T.: Rozwój badań i zastosowań adiuwantów w Polsce. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin*, 2001, **41(1)**: 110-113.
54. Praczyk T., Bączkowska E., Balcer G., Kulczyński J., Dorna J.: Nowy adiuwant wspomagający aktywność niektórych herbicydów i fungicydów. *Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin*, 2008, **48(2)**: 647-652.
55. Riethmuller-Haage I., Bastiaans L., Kempenaar C., Smutny V., Kropff M. J.: Are pre-spraying growing conditions a major determinant of herbicide efficacy? *Weed Res.*, 2007, **47(5)**: 415-424.
56. Rola J., Rola H., Kucharczyk A., Latowski K., Borowiec S., Kutyna I.: Występowanie wybranych gatunków chwastów w uprawach rolniczych – makroregion południowo-zachodni. *Wyd. IUNG Puławy*, 1992: 22-26.
57. Stagnari F., Chiarini M., Pisante M.: Influence of fluorinated surfactants on the efficacy of some post-emergence sulfonyleurea herbicides. *J. Pestic. Sci.*, 2007, **32(1)**: 16-23.
58. Surawska M., Rzeźnicki B.: Ustawodawstwo – projekty ustaw i rozporządzenia z zakresu ochrony roślin. Materiały z IX konferencji „Racjonalna technika ochrony roślin”. IOR-PIB Poznań 06. X. 2010, 9-17.
59. Týr Š., Vereš T., Lacko-Bartošová M.: Weed as an important stress factor in ecological farming. *Cereal Res. Commun.*, 2009, **37**: 181-184.
60. Wang C. J., Liu Z. Q.: Foliar uptake of pesticides – Present status and future challenge. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2007, **87(1)**: 1-8.
61. Wesołowski M., Cierpiał R.: Plonowanie i zachwaszczenie pszenicy ozimej w zależności od dawek herbicydu Huzar 05 WG. *Acta Agrophysica*, 2010, **15(2)**: 429-439.
62. Woźnica Z.: *Herbologia*. Poznań 2008, ss. 430.
63. Wójcik R., Biernacik D., Jakusik E., Piłarski M., Owczarek M., Miętus M.: Zmienność klimatu Polski od połowy XX wieku. Rezultaty projektu KLIMAT, *Prace i Studia Geograficzne*, 2011, **47**: 51-66.
64. Wójcik R., Miętus M.: Niektóre cechy wieloletniej zmienności temperatury powietrza w Polsce (1951-2010). *Przegląd Geograficzny*, 2014, **86, 3**: 339-364.
65. Żmudzka E.: Współczesne zmiany klimatu Polski. *Acta Agroph.*, 2009, **13(2)**: 555-568.

Adres do korespondencji:

dr hab. Hanna Gołębiowska, prof. nadzw.
IUNG-PIB
Zakład Herbologii i Technik Uprawy Roli
ul. Orzechowa 61, 50-540 Wrocław
tel. 71 363 87 07 w. 116
h.golebiowska@iung.wroclaw.pl

Aleksandra Król

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

MODELOWANIE WPLYWU WYBRANYCH PRAKTYK ROLNICZYCH NA STOSUNKI WODNE GLEB*

Słowa kluczowe: bilans wodny gleb, modelowanie, HERMES, APSIM, nawadnianie, mulczowanie

Wstęp

Obserwowane w XX i XXI wieku globalne zmiany klimatu wpływają na wzrost zmienności warunków pogodowych, co skutkuje zmniejszeniem stabilności w plonowaniu upraw. Według wielu modeli dalsze zmiany warunków klimatycznych na półkuli północnej będą powodowały wzrost temperatury powietrza, zmniejszanie sum opadów atmosferycznych w okresie letnim i wzrost w okresie zimowym (19). W wielu rejonach Europy ocieplenie może skutkować dalszym pogorszeniem warunków do stabilnego plonowania roślin (występowaniem zbyt wysokich temperatur i susz) (49).

Wskazuje się, że problemy związane z niewystarczającymi zasobami wody mogą być w pewnym stopniu łagodzone przez modyfikację praktyk rolniczych (1). Zakłada się, że system uprawy roli odpowiednio dostosowany do warunków glebowo-klimatycznych oraz prawidłowy dobór uprawianych roślin optymalizuje stosunki wodne w glebie i zwiększa zasoby substancji organicznych, przez co następuje wzrost efektywności gospodarowania (1). Zastosowanie działań adaptacyjnych, proponowanych wobec zmian klimatu, może być jednak ograniczone przez jakość gleb (29).

Eksperymenty polowe nie zawsze umożliwiają pełną ocenę efektywności proponowanych praktyk rolniczych w kształtowaniu stosunków wodnych gleb (52). W tej sytuacji znajdują zastosowanie numeryczne modele wzrostu i rozwoju roślin, ostatnio nazywane modelami ekosystemów rolniczych, bazujące na scenariuszach klimatycznych (28, 36, 52). Modele te w coraz większym stopniu uwzględniają zróżnicowanie stosowanych praktyk rolniczych oraz szczegółowy opis dynamiki

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.7 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

obiegu wody w układzie gleba-roślina-atmosfera (24, 28). Wyniki przeprowadzonych badań mogą być analizowane i integrowane, a także ekstrapolowane w czasie i przestrzeni (3, 21).

Celem niniejszej pracy jest przegląd możliwości modelowania wpływu wybranych praktyk rolniczych, takich jak: nawadnianie, zmianowanie, sposób uprawy roli i mulczowanie, na kształtowanie się stosunków wodnych gleb ze szczególnym uwzględnieniem modelowania z wykorzystaniem modelu HERMES oraz APSIM.

Model HERMES

Model HERMES został zaprojektowany do symulacji wzrostu i rozwoju roślin oraz dynamiki azotu i wody w glebie. Składa się on z trzech modułów: bilansu wodnego, transportu i przemian azotu oraz wzrostu i rozwoju roślin uprawnych (26, 29). Krok czasowy symulacji modelu wynosi jeden dzień (22). Dane wejściowe można podzielić na trzy grupy: meteorologiczne, glebowe oraz dotyczące rośliny uprawnej (28). Niezbędne dane meteorologiczne to: suma opadu atmosferycznego (mm), temperatura powietrza na wysokości 2 m n.p.m. ($^{\circ}\text{C}$), niedosyt wilgotności powietrza o godz. 14⁰⁰ (hPa) oraz całkowite promieniowanie słoneczne ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$) (22). Profil glebowy jest charakteryzowany do głębokości 1 m w 10-centymetrowych warstwach. Właściwości gleby określane są przez użytkownika lub przyporządkowane według wartości zdefiniowanych w modelu (22, 26, 27). Dla warstwy ornej gleby, wymagana jest zawartość materii organicznej oraz stosunek węgla do azotu (C/N) (22, 26). Pozostałe wejściowe dane glebowe to: zawartość frakcji granulometrycznych gleby, poziom wody gruntowej oraz początkowa wilgotność gleby (29). Główne dane dotyczące uprawy to: data siewu, data zbioru, daty zastosowania nawozów oraz ich dawki (27).

Przyjęty w modelu HERMES moduł bilansu wodnego wymaga określenia polowej pojemności wodnej gleby oraz punktu trwałego wędnięcia. Wspomniane parametry glebowe mogą być określone automatycznie przez model na podstawie składu granulometrycznego danej warstwy gleby zmodyfikowanej o zawartość materii organicznej, wskaźniki hydromorfologiczne oraz gęstość objętościową gleby (26). Wilgotność gleby określana jest na podstawie parametrów pojemnościowych definiowanych zgodnie z klasą granulometryczną gleby bazując na systematyce gleb stosowanej w Niemczech (22). Dla obszarów, w których występuje oddziaływanie poziomu wód gruntowych na uprawiane rośliny, możliwe jest obliczenie wartości podsiąkania kapilarnego, bazujące na strukturze gleby oraz poziomie tych wód. Obliczenia są wykonywane przy wykorzystaniu tabelarycznych wartości zdefiniowanych w modelu (29).

Model HERMES wykorzystuje trzy metody obliczania potencjalnej ewapotranspiracji (PET). Pierwsza z nich to empiryczna metoda Haude wykorzystująca określone dla każdego miesiąca współczynniki roślinne Hegera oraz deficyt wilgotności powietrza o godz. 14⁰⁰. Druga to metoda ewapotranspiracji wskaźnikowej Turca-Wendlinga

uwzględniająca współczynniki k_c określone dla poszczególnych faz fenologicznych konkretnego gatunku rośliny (28). Współczynnik roślinny k_c opisuje stosunek aktualnej ewapotranspiracji do ewapotranspiracji wskaźnikowej danej uprawy (13). Do zastosowania metody Turca-Wendlinga wymagana jest znajomość średniej dobowej temperatury powietrza oraz całkowitego dziennego promieniowania słonecznego. W przypadku braku pomiarów całkowitego promieniowania słonecznego oblicza się je wykorzystując metodę Angströma (28). Trzecim sposobem obliczania PET jest metoda Penmana-Monteitha wykorzystująca te same dane wejściowe co metoda Turca-Wendlinga oraz dodatkowo prędkość wiatru. Ponadto, możliwe jest manualne wprowadzenie wcześniej określonych wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej (ET_0) (27).

Udział ewaporacji (E_{pot}) jest obliczany na podstawie potencjalnej ewapotranspiracji (PET) oraz aktualnego wskaźnika pokrycia liściowego (LAI) bazując na wzorze (26):

$$E_{pot} = PET \exp(-0,5 LAI)$$

Wartość aktualnej ewapotranspiracji i transpiracji obliczana jest na bazie wilgotności gleby i pionowym rozmieszczeniu korzeni (22). W przypadku niewystarczającej ilości wody potrzebnej do parowania następuje redukcja wartości potencjalnej transpiracji, aczkolwiek istnieje możliwość częściowego wyrównania deficytu wody przez podsiąkanie jej z głębszych warstw gleby (26).

Model HERMES uwzględnia różne praktyki rolnicze m.in.:

- nawadnianie – daty nawadniania oraz ilość zastosowanej wody,
- zmianowanie – obejmujące charakterystykę uprawianych roślin,
- sposób uprawy roli – rodzaj zabiegu (orka, spulchnianie), głębokość oraz termin siewu,
- nawożenie – rodzaj nawozu i datę jego zastosowania,
- mulczowanie – udział (%) wywożonych z pola plonów ubocznych (22, 27, 28).

Model APSIM

Model APSIM (ang. *Agricultural Production Systems sIMulator*) opracowano w Australii w Agricultural Production Systems Research Unit (APSRU) (5). Jest on wykorzystywany w modelowaniu procesów biofizycznych w systemach rolniczych z uwzględnieniem czynników ekonomicznych i ekologicznych oraz ryzyka klimatycznego. Model ten składa się z odrębnych niezależnych modułów numerycznych, najczęściej są to: moduł biologiczny, moduł środowiskowy oraz moduł zarządzania uprawą (25). W modelu APSIM wyróżnia się cztery podstawowe moduły: moduł wilgotności gleby (SOILWAT), azotu glebowego (SOILN), moduł resztek poźniwnych (RESIDUE) oraz moduł zarządzania uprawą. APSIM rozwijany jest jako narzędzie oceny alternatywnych sposobów gospodarowania pod kątem poprawy efektywności polowej produkcji rolnej oraz oceny ich wpływu na środowisko (43).

Model APSIM wymaga znajomości następujących dobowych danych pogodowych:

maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza ($^{\circ}\text{C}$), sumy opadu atmosferycznego (mm) oraz całkowitego dziennego promieniowania słonecznego ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). W przypadku braku pomiarów wartości promieniowania słonecznego może ona zostać obliczona na podstawie metody Angströma (3).

W module bilansu wodnego SOILWAT uwzględniono procesy przepływu, odpływu, infiltracji, transpiracji, ewaporacji i potencjalnej ewapotranspiracji (3, 5). Moduł ten uwzględnia wpływ pokrycia powierzchni gleby przez resztki poźniwne oraz rośliny uprawne na spływ powierzchniowy oraz ewaporację (43). Po wystąpieniu opadów atmosferycznych lub zastosowaniu nawodnienia szacowany jest spływ powierzchniowy i infiltracja (5).

Moduł SOILWAT na podstawie maksymalnej i minimalnej dobowej temperatury powietrza, albedo oraz promieniowania słonecznego szacuje ewaporację i potencjalną ewapotranspirację (5). Wyznaczenie ewaporacji (E_s) odbywa się w dwóch etapach opisanych przez parametr U (etap I) oraz cona (etap II) (3). Parametr U określa parowanie z gleby w warunkach, gdy zasoby wody glebowej nie przekraczają połowej pojemności wodnej. Podczas drugiego etapu E_s jest określana poprzez parametr cona i jest opisana na podstawie poniższej funkcji (3):

$$E_s = \text{cona} \cdot \sqrt{t}$$

gdzie:

t – czas, cona – współczynnik parowania drugiego etapu ewaporacji.

Na wartość parametru wejściowego cona ($\text{mm}\cdot\text{dzień}^{-0.5}$) wpływają właściwości hydrauliczne gleby oraz ewaporacja (3, 43). Dzięki uwzględnieniu tego parametru uzyskuje się dokładniejszy opis wysychania gleby uwarunkowany czynnikami zewnętrznymi i jej teksturą. Podczas procesu parowania wysycha wyłącznie powierzchniowa warstwa gleby, nawet poziomu punktu trwałego wędnięcia roślin (5).

Moduł dotyczący rośliny uprawnej opisuje jej rozwój, określa plon, pobór wody oraz akumulację azotu. Plon jest szacowany na podstawie dostępności wody, temperatury, promieniowania słonecznego oraz dostępności azotu. Na obecnym etapie model nie uwzględnia wpływu przymrozków, podtopień oraz występowania chorób i chwastów (52). Model APSIM określa wpływ nawodnienia i mulczowania na przyrost plonu, dynamikę wody oraz zawartość węgla organicznego i azotu w glebie (3).

Nawadnianie

Najczęściej proponowaną adaptacyjną praktyką rolniczą wobec zmian klimatu jest **nawadnianie**. Nowoczesne sposoby nawadniania prowadzą do efektywnego wykorzystania wody, osiągnięcia korzyści ekonomicznych, a także zmniejszania niekorzystnego wpływu suszy na środowisko (30, 32). Ograniczona dostępność wody skutkuje potrzebą optymalizacji jej wykorzystania (ang. *Water Use Efficiency*, WUE),

w celu maksymalizacji plonów przy jak najmniejszym zużyciu wody (38). Dotychczas w nawadnianiu nie przykładano tak dużej wagi do tego problemu, a koncentrowano się na wzroście plonowania, w wyniku czego zużycie wody w rolnictwie było nieadekwatnie duże (32, 38).

W opracowaniu nowych metod optymalizacji produkcji rolnej w warunkach ograniczonych zasobów wody oraz analizy potrzeb nawadniania znaczącą rolę odgrywa modelowanie (3, 7, 47). Tematem wielu badań jest ocena wpływu dawek nawodnieniowych (7, 39, 42) i harmonogramu nawodnienia (3, 35) na różne komponenty bilansu wodnego: transpirację (31), ewaporację (31), ewapotranspirację (2, 3, 7, 35, 39, 42), spływ powierzchniowy (2), przesiąkanie (2, 35), odpływ podziemny (3, 7), wilgotność gleby (7, 31, 35, 42, 52), efektywność wykorzystania wody przez poszczególne rośliny uprawne (39, 42) oraz produktywność wody w różnych uprawach (3, 7). Produktywność wody jest określana jako stosunek wielkości plonu ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) do ewapotranspiracji ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) (54). Powyższe zagadnienia analizowano poprzez wykonanie pomiarów (42) lub szacowanie z wykorzystaniem modeli różnych komponentów bilansu wodnego: ewapotranspiracji (2), infiltracji np. Green-Ampt (2), spływu powierzchniowego np. ARNO Rainfall-Runoff Model (2) oraz modeli: APSIM (3, 7, 52), HYDRUS (35), WANISM (31). Przykładowo w pracach Chen i in. (7), Balwinder-Singh i in. (3) oraz Zeleke i in. (52) badano wpływ zastosowania nawadniania (52), zróżnicowania dawek (7) oraz harmonogramu nawodnień (3) na kształtowanie stosunków wodnych gleb z wykorzystaniem modelu APSIM (3).

W analizie zaprezentowanej przez Zeleke i wsp. (52) porównywano dwa sposoby nawadniania rzepaku w latach 2011-2012 w Południowej Australii. W obu wariantach w okresie zimy wilgotność gleby była wyższa niż punkt trwałego wędnięcia roślin ($0,22 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$) z wyjątkiem jej końcowego okresu (95 dni po dacie siewu). Od tego momentu wilgotność gleby w obiekcie nienawadnianym stopniowo się zmniejszała. W przypadku obiektu nawadnianego, gdzie w fazie kwitnienia rzepaku dwukrotnie zastosowano nawadnianie kropelkowe, spadek poziomu wilgotności gleby do poziomu punktu trwałego wędnięcia (WP) występował jedynie pod koniec okresu jego wegetacji. Stwierdzono również dużą zgodność pomiędzy wynikami symulacji a pomiarami polowymi, z wyjątkiem okresów po wysokich opadach oraz bezpośrednio po nawadnianiu (52).

Kolejnym przykładem wykorzystania modelu APISM do określania wpływu nawodnienia na komponenty bilansu wodnego jest praca Chen i in. (7), gdzie analizowano uprawę pszenicy oraz kukurydzy na Nizinie Chińskiej w latach 1961-2000. W pszenicy zastosowano pięć różnych schematów nawadniania (I_0 , I_1 , I_2 , I_3 , I_4), a w przypadku kukurydzy trzy (I_0 , I_1 , I_2). Czas nawadniania był dopasowany do faz rozwojowych badanych roślin. Schemat analizowanych praktyk nawadniania przedstawiono w tab. 1, w której symbolem „+” oznaczono wykonanie nawadniania w danej fazie fenologicznej (7).

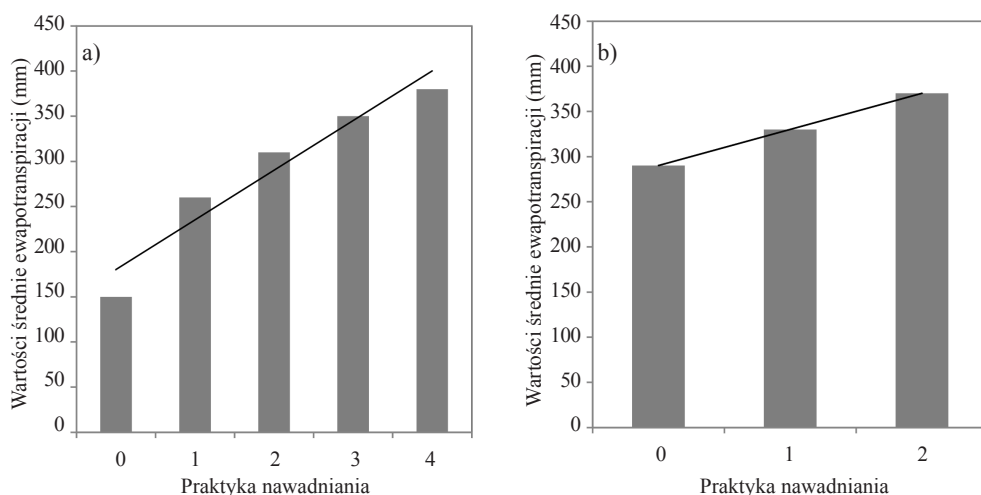
Tabela 1

Schemat doświadczenia dotyczącego analizy i modelowania różnych praktyk nawadniania

Obiekty	Siew	Faza fenologiczna związana z nawodnieniem		
		Pełne wschody	Strzelanie w źdźbło	Dojrzewanie
I_0				
I_1	+			
I_2	+		+	
I_3	+		+	+
I_4	+	+	+	+

Źródło: Chen i in., 2010 (7)

W całym analizowanym okresie zauważono wzrost ewapotranspiracji (rys. 1). Najmniejsze jej wartości zaobserwowano na obiektach bez nawodnienia I_0 (pszenica - 290 mm, kukurydza - 370 mm), a największe w obiektach nawadnianych najczęściej (pszenica - 470 mm, kukurydza - 430 mm); (7). Obserwacje te są zgodne z wynikami badań Mukherjee i in. (39) oraz Mermoud i in. (35) wykorzystujących model HYDRUS. Z powodu niewielkich opadów atmosferycznych występujących w okresie wegetacji pszenicy na wszystkich analizowanych wariantach nawadniania odpływ podziemny był niewielki, a na obiekcie I_0 i I_1 nie został on zaobserwowany. W przypadku obiektu I_4 osiągał wartości mniejsze niż 100 mm. Dla okresu wegetacji kukurydzy wartości odpływu były zdecydowanie większe. W obiektach bez nawodnienia (I_0) odpływ podziemny osiągał wartości do 450 mm, a dla obiektu najczęstszego nawodnienia (I_3) do 600 mm. Wykazano że, wartość odpływu podziemnego wody zwiększa się wraz ze wzrostem częstości nawadniania, jednak jego wartość jest w znacznym stopniu uzależniona od ilości opadów (7).



Rys. 1. Wartości średnie ewapotranspiracji w zależności od zastosowanej praktyki nawodnienia:
a) pszenicy, b) kukurydzy. Linia ciągłą oznaczono linię trendu.

Źródło: Chen i in., 2010 (7)

Ponadto średnia produktywność wody (WP) w pszenicy na obiekcie I_0 i I_1 wynosiła odpowiednio 0,52 i 1,24 kg·m⁻³. Najwyższą wartość (1,56 kg·m⁻³) wskaźnik ten osiągnął na obiekcie I_2 , następnie, w kolejnych praktykach nawadniania wartość WP malała, i wynosiła dla praktyki I_3 i I_4 odpowiednio 1,42 i 1,40 kg·m⁻³. Przeprowadzając taką samą analizę dla kukurydzy zauważono, że WP również zwiększa się wraz ze wzrostem liczby zabiegów nawadniania, ale pomiędzy praktyką I_1 i I_2 zaobserwowane różnice były niewielkie (7).

Zmianowanie

Przeglądowi poddano również prace koncentrujące się na określeniu wpływu **zmianowania** na kształtowanie stosunków wodnych gleb i plonowanie roślin (29). W monokulturze plonowanie często obniżają choroby podstawy źdźbła oraz wzrost zachwaszczenia (46). Szereg przeprowadzonych badań dotyczy analizy wpływu zmianowania na bilans wodny gleb, zwłaszcza w kontekście: ewapotranspiracji (51), zawartości wody w glebie (29, 41), czy efektywności pobierania wody przez rośliny (WUE) (51). Analizy wykonywano zarówno na podstawie pomiarów (17, 18), jak i przy wykorzystaniu modeli HERMES (29) i APSIM (41). Kersebaum i in. (29) oraz Olivier i in. (41) prowadzili badania porównujące uprawę pszenicy w monokulturze i zmianowaniu z odłogiem, odpowiednio w Kanadzie i Australii.

W pierwszej pracy (29) analizowano wpływ zmianowania na zawartość wody w glebie w latach 1910-1991 z wykorzystaniem modelu HERMES. Zauważono, że w większości analizowanego okresu zawartość wody w glebie w obiekcie ze zmianowaniem była większa niż w przypadku monokultury. W niektórych fazach rozwojowych roślin nie stwierdzono jej zróżnicowania. Brak różnic mógł być spowodowany niewielkimi opadami atmosferycznymi, bądź niską wilgotnością gleby zaobserwowaną w tym okresie (29). W drugiej pracy (41) symulacje przeprowadzone dla danych meteorologicznych okresu 1907-2010 pokazują, że zawartość wody w glebie dla uprawy ze zmianowaniem była również większa niż w przypadku monokultury. W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano wystąpienie spływu powierzchniowego w okresie wiosennych roztopów. Chociaż pola eksperymentalne obejmowały płaski teren, to spływ wody odbywał się nad zamrożoną warstwą gleby. Zjawiska tego nie uwzględniono w modelu, co mogło skutkować zawyżeniem przewidywanej wilgotności gleby w okresie wczesnej wiosny (29).

Metody uprawy roli

Metody uprawy roli wpływają znacząco na kształtowanie się elementów bilansu wodnego gleb, m.in. infiltracji, spływu powierzchniowego oraz poboru wody przez rośliny (23). Uprawa orkowa dominuje w praktyce, często podkreśla się jej aspekt estetyczny związany z wyglądem pola, co ma istotne znaczenie dla wielu rolników. Metoda ta posiada jednak pewne ograniczenia, do których należy m.in. szybsze tempo mineralizacji substancji organicznej, nasilenie erozji wodnej oraz zagęszczenie podornej warstwy gleby (14, 34, 45).

W ostatnich latach obserwuje się zmiany w technice uprawy dotyczące głównie sposobu spulchniania, częstotliwości oraz głębokości wykonywania zabiegów (6, 10, 14, 34). Dotychczas dominował pogląd korzystnego wpływu upraw orkowych na poprawę plonowania, właściwości fizycznych, chemicznych oraz biologicznych gleb. Obecnie jednak zauważono, że niewykonanie niektórych zabiegów uprawowych nie wpływa znacząco na plonowanie. Coraz częściej podkreśla się, że ograniczenie uprawy to nie tylko: potencjalne zmniejszenie kosztów i czasu, ograniczenie erozji i spływu powierzchniowego, ale również gromadzenie większej ilości wody oraz zmniejszenie wahań temperatury gleby (6, 10, 14, 50). Proponowane zasady tzw. uprawy konserwującej zakładają: ograniczanie mechanicznej destrukcji struktury gleby, zmniejszenie lub całkowitą redukcję liczby stosowanych zabiegów, wykorzystanie płodozmianu oraz ciągle mulczowanie powierzchni pola resztkami poźniwnymi i międzyplonami (9, 34). Poprzez zastosowanie uprawy konserwującej zwiększana jest dostępność wody, obserwuje się poprawę żyzności gleby i stabilności jej struktury, co skutkuje polepszeniem zdolności utrzymania wody, a w przypadku zalania szybszym powrotem do stanu równowagi. Ponadto, następuje istotne ograniczenie nakładów energetycznych na uprawę (14, 23, 40). Należy podkreślić istotny wpływ rodzaju gleby oraz jej zagęszczenia na skuteczność uproszczonych sposobów uprawy (34).

W literaturze opisano wiele badań analizujących wpływ sposobu uprawy roli: uprawy tradycyjnej z orką (ang. *Conventional Tillage* – CT) (8, 33, 36, 40, 48), uprawy uproszczonej (ang. *Reduced Conventional Tillage* – RT) (33), uprawy siewu bezpośredniego (ang. *No-Tillage* – NT) (8, 33, 40, 48), uprawy minimalnej (ang. *Minimum Tillage* – MT) (15) oraz uprawy konserwującej (36) na kształtowanie się bilansu wodnego gleb. Analizowano wielkość transpiracji (8, 48), ewaporacji (8, 48), ewapotranspiracji (8, 48), spływu powierzchniowego (40), odpływu podziemnego (40), akumulacji wody w glebie (15) oraz wilgotności gleby (15, 33, 36). W powyższych pracach prowadzono pomiary poszczególnych elementów bilansu wodnego (15, 33) oraz modelowano je stosując modele APSIM (36, 40), DSSAT (ang. *Decision Support Systems for Agrotechnology Transfer*) (33) i CropSyst (48).

Przykładem prac doświadczalnych są badania przeprowadzone w latach 2007-2009 przez Czyż i in. (10), które pokazały wzrost gęstości objętościowej gleby (w warstwie podpowierzchniowej 0-15 cm) w uprawie uproszczonej i siewie bezpośrednim kukurydzy w stosunku do uprawy orkowej. Dalsze analizy (10) trzech sposobów uprawy: siewu bezpośredniego z mulczowaniem w monokulturze, uprawy orkowej w monokulturze i w zmianowaniu pokazały istotny wpływ sposobu uprawy na wilgotność gleby. Zaobserwowano, że w warstwie powierzchniowej (0-10 cm) największa wilgotność gleby wystąpiła w obiekcie z siewem bezpośrednim (10). Włodk i in. (50) w badaniach prowadzonych w latach 2003-2005 nie stwierdzili jednoznacznego wpływu sposobu uprawy roli na zmiany retencji wodnej gleby. Najmniejsza strata wody dotyczyła zarówno uprawy uproszczonej (uprawa kukurydzy w 2004) jak i siewu bezpośredniego (uprawa jęczmienia jarego w 2005) (50).

Dane doświadczalne stanowią źródło weryfikacji wyników symulacji komputerowych przy użyciu modeli procesowych, które pozwalają przewidzieć zmiany w dłuższym okresie czasu. M k o g a i i n . (36), wykorzystując model APSIM, porównali dwa sposoby uprawy: uprawę tradycyjną (orkową) (CT) i uprawę konserwującą (płytka orkę) z pozostawieniem resztek poźniwnych na powierzchni pola (RR). Analizowany eksperyment polowy przeprowadzono w latach 1985-2008 w Tanzanii. Obliczenia pokazały, że różnica w średniej wilgotności gleby dla całego analizowanego okresu pomiędzy badanymi praktykami rolniczymi wynosiła około 5%. Różnice te były szczególnie widoczne w okresach o opadach niższych od średnich i wówczas wynosiły 7%. Analizując przebieg wilgotności gleby dla obu praktyk rolniczych zaobserwowano, że w większości sezonów w uprawie tradycyjnej jej poziom spada poniżej poziomu krytycznej wilgotności gleby (24,4%), natomiast w uprawie konserwującej taki poziom wilgotności obserwowany jest w okresie najostrzejszych susz. W warunkach wyższych opadów różnice w wilgotności gleby pomiędzy sposobami uprawy nie były znaczące. Modelowana wilgotność gleby, podczas okresu wegetacji, zawsze była większa niż punkt trwałego wędnięcia (19%). M k o g a i i n . (36) wykazali dużą zgodność pomiędzy wyznaczoną z modelu a zmierzoną wilgotnością gleby (36).

Przeprowadzone przez M u p a n g w a i i n . (40) badania miały na celu określenie wpływu sposobu uprawy roli na spływ powierzchniowy, odpływ podziemny, a także na ewaporację. Analizę przeprowadzono przy wykorzystaniu eksperymentów polowych obejmujących uprawę tradycyjną orkową (CT) oraz uprawę bezorkową (NT). Badania prowadzone w czterech gospodarstwach w latach 2005 – 2008 wykazały, że model APSIM dobrze określa spływ powierzchniowy, zarówno dla uprawy bezorkowej jak i orkowej, ponieważ jego symulowane wartości charakteryzowały się wysoką zgodnością w stosunku do przeprowadzonych pomiarów. Modelowany spływ powierzchniowy w uprawie tradycyjnej był większy niż w uprawie bezorkowej. Obserwacje te dotyczyły także suchych lat i były zgodne z wynikami przeprowadzonych pomiarów. Zmniejszanie spływu powierzchniowego prowadzi do redukcji strat erozyjnych gleby i składników odżywczych oraz zmniejszenia zanieczyszczenia wody biogenami. Wykazano że, niezależnie od wielkości opadów atmosferycznych, wartość odpływu podziemnego jest większa na uprawie bezorkowej (NT) niż na uprawie płuznej (CT). Symulowana ewaporacja posiadała zbliżone wartości na obu sposobach uprawy (40).

Mulczowanie

Kolejną praktyką rolniczą wpływającą na kształtowanie stosunków wodnych gleb jest **mulczowanie**. Polega ona na wykorzystaniu resztek poźniwnych bądź innych materiałów w celu maksymalnego pokrycia powierzchni gleby, wpływając w ten sposób na stosunki wodne, dynamikę węgla i azotu w glebie (4, 6, 16). Do

pozytywnych skutków zastosowania mulczowania należy ochrona aktywności biologicznej i struktury gleb, a także zmniejszenie negatywnych skutków toksycznego działania stosowanych chemicznych środków ochrony roślin (14). Ponadto, warstwa mulczu chroni glebę przed wpływem światła słonecznego oraz kinetycznej energii kropli deszczu przez co poprawia trwałość struktury gleby, zwiększa również wilgotność oraz zmniejsza temperaturę gleby poprzez stworzenie warstwy izolacyjnej (6, 44). Praktyki pozostawiające resztki poźniwne na powierzchni gleby ograniczają ewaporację, a zaoszczędzona w ten sposób woda może być wykorzystana przez rośliny (transpiracja), a dzięki temu mniejsza jest potrzeba nawodnień (3, 21, 44).

Mulczowanie jest wykorzystywane w uprawie konserwującej, której celem jest zapobieganie degradacji gleby oraz utrzymanie jej produktywności (6, 14). Do mulczowania wykorzystywane są nie tylko resztki poźniwne, plony uboczne (słoma), ale również tworzywa sztuczne np. włókniny (ang. *film mulching*). Ocenia się, że stosowanie agrotkanin ma znaczący wpływ na wilgotność i temperaturę, a także mikroklimat powierzchni gleby (21).

Ze względu na złożoność skutków mulczowania modelowanie wpływu tej praktyki jest utrudnione, jednak wiele modeli ekosystemów rolniczych jest zdolnych do określenia skutków mulczowania na dynamikę wody, temperaturę systemu gleba-roślina-atmosfera, akumulację węgla i wymywanie azotu. Niektóre modele (np. APSIM) posiadają specjalnie opracowany moduł resztek poźniwnych (16). W pracach dotyczących modelowania wpływu mulczowania na kształtowanie się bilansu wodnego gleb, analizie poddawane są różne rodzaje mulczowania tj. z wykorzystaniem: resztek poźniwnych (18, 36), słomy (3, 11, 37, 39) czy włókniny (12, 39). Badany jest wpływ mulczowania na: transpirację (53), ewaporację (39, 53), ewapotranspirację (20), spływ powierzchniowy (37), przenikanie i pochłanianie wody przez mulcz (37), odpływ podziemny (37), retencję gleby (53), wilgotność gleby (11, 12, 18, 20, 37) oraz WUE (efektywności wykorzystania wody, ang. *Water Use Efficiency*) (12, 20, 39, 53).

Badania Siczek i in. (44) przeprowadzone w latach 2006-2008 pokazują efekty mulczowania i wpływ tego zabiegu na produktywność wody (ang. *Water Productivity – WP*) w uprawie soi. W omawianej pracy wykazano, że mulczowanie powoduje wzrost produktywności wody oraz poprawia parametry jakościowe nasion soi. Jednak, w okresie głębokiej suszy mulczowanie spowodowało negatywny wpływ na rozwój oraz plon soi. Autorzy wskazują, że było to spowodowane zatrzymaniem opadów wody w mulczu i ograniczeniem wzrostu korzeni spowodowanym zagęszczeniem gleby (44).

Przykładem pracy określającej wpływ mulczowania na kształtowanie bilansu wodnego gleb z wykorzystaniem modelu APSIM jest praca B a l w i n d e r - S i n g h i in. (3) dotycząca eksperymentów polowych uprawy pszenicy prowadzonych w latach 2006-2008 w Indiach. W pracy tych autorów analizie poddano dwa warianty nawodnienia I_1 i I_2 różniące się dawką wody oraz zastosowaniem mulczu (tab. 2).

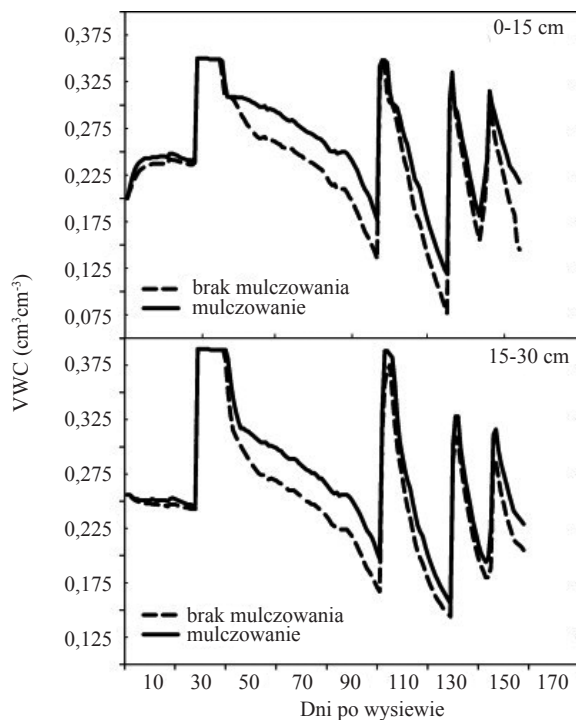
Tabela 2

Dawka nawadniania w poszczególnych modelowanych praktykach rolniczych

Oznaczenie wariantów nawodnienia	Mulczowanie	Dawka nawadniania w latach (mm)	
		2006-2007	2007-2008
I_1	+	75	150
	-	150	225
I_2	+	75	225
	-	75	225

Źródło: Balwinder-Singh i in., 2011 (3)

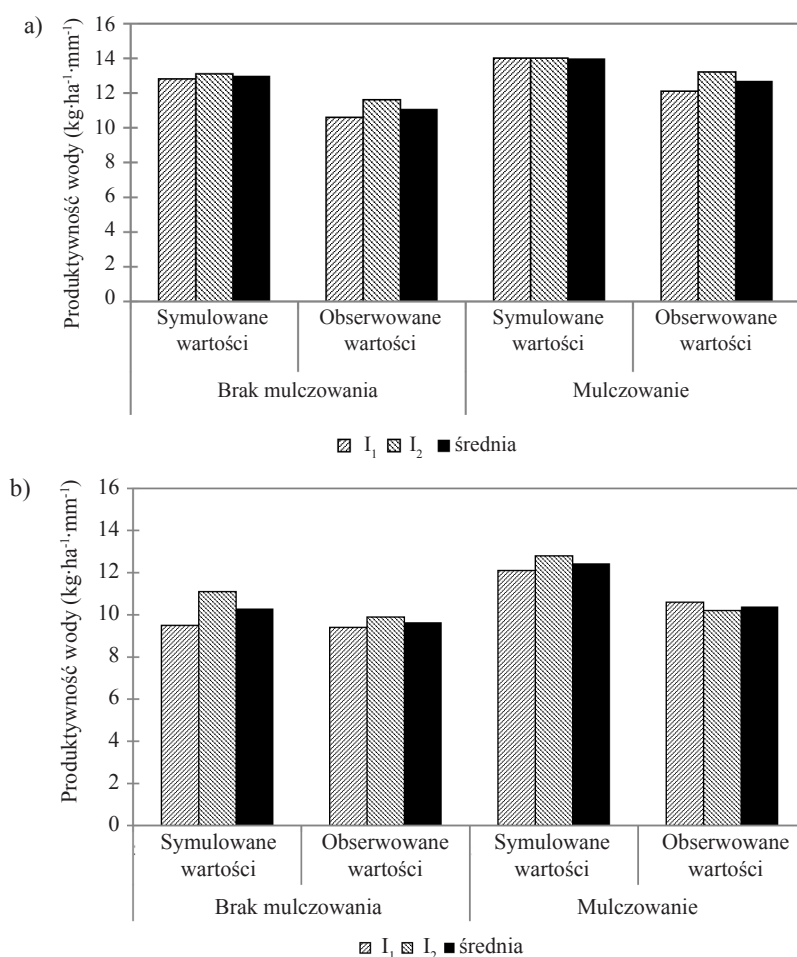
Autorzy wykazali, że modelowana wilgotność gleby w warstwach od 0 do 30 cm (rys. 2) była wyższa przy zastosowaniu mulczu, a obserwacja ta była zgodna z wynikami przeprowadzonych pomiarów (3).



Rys. 2. Porównanie przewidywanych wartości wilgotności gleby w latach 2007-2008 dla praktyki bez mulczowania (linia przerywana) i z mulczowaniem (linia ciągła) w warstwach gleby 0-15 cm (góra) i 15-30 cm (dół)

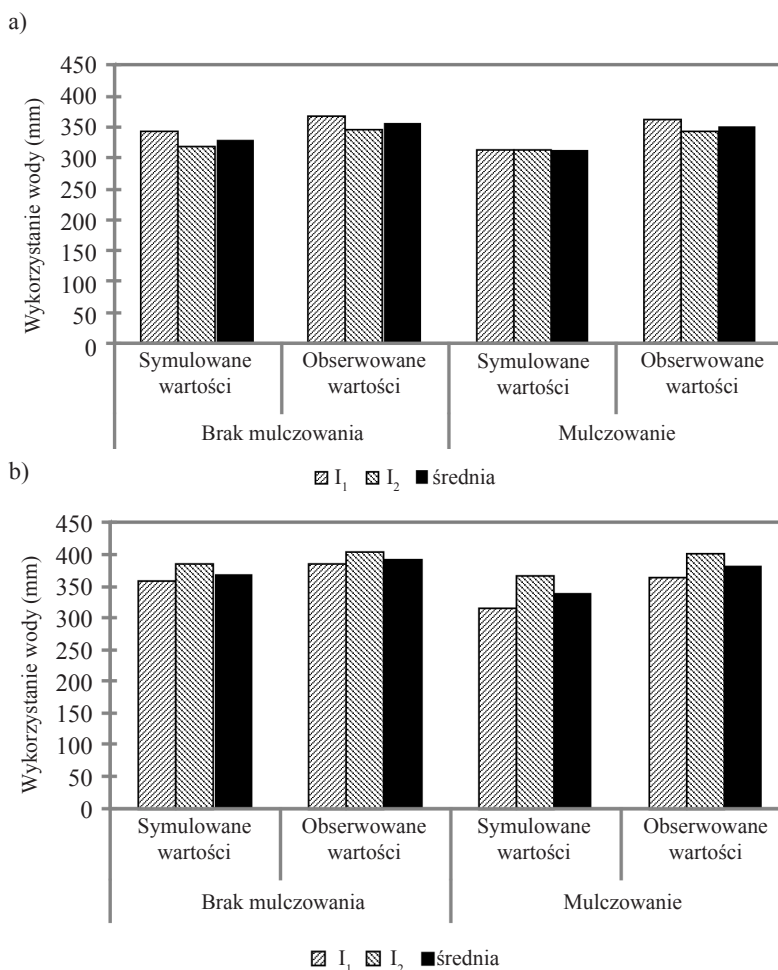
Źródło: Balwinder-Singh i in., 2011 (3)

Na podstawie obliczeń modelu APSIM ustalono również, że mulczowanie redukuje ewaporację, ewapotranspirację oraz powoduje wzrost transpiracji. Ustalono, że zwiększenie wilgotności gleby poprzez mulczowanie może być spowodowane redukcją ewaporacji (3). Wyniki przeprowadzonych pomiarów potwierdzają redukcję ewapotranspiracji o około 25% i wzrost transpiracji o około 13% (4). Wykazano także, że mulczowanie zwiększyło produktywność wody na obiektach o mniejszej dawce nawodnienia (I_1) o 9% -27%, natomiast na obiekcie nawadnianym większą dawką wody (I_2) o 7 - 15%. Redukcja wykorzystania wody (rys. 4) poprzez mulczowanie na obiekcie I_1 wynosiła 8 - 12%, a na obiekcie I_2 tylko 2 - 5%. Wskazuje to na wymierne korzyści z mulczowania w warunkach ograniczonych zasobów o wody (3).



Rys. 3. Wpływ mulczowania na produktywność wody w uprawie pszenicy:
a): 2006-2007, b): 2007-2008. I_1 i I_2 oznaczają warianty nawodnienia

Źródło: Balwinder-Singh i in., 2011 (3)



Rys. 4. Wpływ mulczowania na wykorzystanie wody w procesie ewapotranspiracji w latach: a) 2006-2007, b) 2007-2008. I_1 i I_2 oznaczają warianty nawodnienia

Źródło: Balwinder-Singh i in., 2011

Mkoga i in. (36), wykorzystując model APSIM, porównali dwa sposoby uprawy przy braku (CT) i z zastosowaniem mulczowania (CTR). Analizę prowadzono dla warunków Tanzanii w okresie od 1985 do 2008 roku. W latach 2006-2007 wilgotności gleby w na obiekcie bez mulczu (CT) wynosiła 24,7%, a na obiekcie z mulczem 26,3%, zaś w okresie 2007 - 2008 odpowiednio 24,6% i 25,7%. Wykazano więc, że pozostawienie resztek poźniowych na powierzchni gleby w formie mulczu (CTR) zwiększyło wilgotność gleby o około 1.5% w porównaniu do obiektu bez mulczu (CT).

Podsumowanie

Istotnym celem współczesnego rolnictwa, poza zwiększaniem plonowania uprawianych roślin, jest tworzenie odpowiednich warunków do osiągnięcia bądź utrzymywania na właściwym poziomie żyzności gleb oraz ograniczanie negatywnego wpływu rolnictwa na środowisko przyrodnicze, w tym emisję gazów cieplarnianych. Rekomendowaną praktyką rolniczą powinna być konserwująca uprawa roli, która łączy w sobie zalety eliminowania orki i pozostawienia na powierzchni gleby resztek poźniwnych. Ważną praktyką rolniczą powinno być również nawadnianie, w którym harmonogram oraz dawki wody są dobrze dostosowane do aktualnych potrzeb danej uprawy.

Techniki modelowania, jak wykazano w pracy, umożliwiają obecnie przeprowadzenie analizy wpływu kilku praktyk rolniczych na bilans wodny gleb. Omówione w pracy badania wskazują, że skalibrowany model HERMES, podobnie jak model APSIM, mogą w racjonalny i prosty sposób oszacować zmiany wilgotności gleby pod wpływem zastosowania różnych praktyk rolniczych. Dotychczasowe badania pokazują również, że omawiane modele nie zawsze w pełni uwzględniają czynniki istotnie wpływające na środowisko glebowe jak również na kształtowanie się plonów uprawianych roślin. Wskazuje to na potrzebę ulepszania algorytmów modeli w celu zwiększenia poprawności przeprowadzanych symulacji, szczególnie w zakresie szacowania wielkości ewapotranspiracji w powiązaniu z możliwościami optymalizacji praktyk rolniczych, efektywności wykorzystania wody oraz sterowania nawadnianiem.

Literatura

1. Acuña T.B., Lisson S., Johnson P., Dean G.: Yield and water-use efficiency of wheat in a high-rainfall environment. *Crop Pasture Sci.*, 2015, **66**(5): 419-429.
2. Ali M.H., Shui L.T., Yan K.C., Eloubaidy A.F., Foong K.C.: Modeling water balance components and irrigation efficiencies in relation to water requirements for double-cropping systems. *Agr. Water Manage.*, 2000, **46**(2): 167-182.
3. Balwinder-Singh, Gaydon D.S., Humphreys, E., Eberbach, P.L.: The effects of mulch and irrigation management on wheat in Punjab, India—Evaluation of the APSIM model. *Field Crops Res.*, 2011, **124**.1: 1-13.
4. Balwinder-Singh, Humphreys, E., Eberbach P.L., Katupitiya A., Singh Y., Kukal S.S.: Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule. *Field Crops Res.*, 2011, **121**: 209–225.
5. Bristow K.L., Verburg K.: APSIM-SOILWAT. W: Methodology in soil water and solute balance modelling: An evaluation of the APSIM-SoilWat and SWIMv2 models. Report of an APSRU /CSIRO Division of Soils workshop held in Brisbane, Australia, 16-18 May 1995. CSIRO Division of Soils Divisional Report, 1996, **131**: 13-19.
6. Busari M. A., Kukal S. S., Kaur A., Bhatt R., Dulazi A. A.: Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, **3**(2): 119-129.
7. Chen C., Wang E., Yu Q.: Modelling the effects of climate variability and water management on crop water productivity and water balance in the North China Plain. *Agr. Water Manage.*, 2010, **97**(8): 1175-1184.

8. Chi J., Waldo S., Pressley S., O'Keefe P., Huggins D., Stöckle C., Pan W.L., Brooks, E., Lamb B.: Assessing carbon and water dynamics of no-till and conventional tillage cropping systems in the inland Pacific Northwest US using the eddy covariance method. *Agr. Forest Meteorol.*, 2016, **218**: 37-49.
9. Corsi S., Friedrich T., Kassam A., Pisante M., Sà J. D. M.: Definitions. W: Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: a literature review. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012, **16-2012**: 5-12.
10. Czyż E. A., Dexter A. R.: Wpływ różnych technologii uprawy roli na gęstość objętościową gleby i opór penetrometryczny. *Rocz. Glebozn.*, 2010, **61(4)**: 40-50.
11. Dahiya R., Ingwersen J., Streck T.: The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling. *Soil Till. Res.*, 2007, **96(1)**: 52-63.
12. Dong B., Liu M., Jiang J., Shi C., Wang X., Qiao Y., Liu Y., Zhao Z., Li D., Si F.: Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields. *Agr. Water Manage.*, 2014, **143**: 93-101.
13. Doorenbos J.: Calculation of crop water requirements. W: Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, 1977, **C 25366**: 1-2.
14. Dzieńia S., Zimny L., Weber, R.: Najnowsze kierunki w uprawie roli i technice siewu. *Fragm. Agron.*, 2006, **2(23)**: 227-241.
15. Fabrizzi K. P., Garcia F. O., Costa J. L., Picone L. I.: Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.*, 2005, **81(1)**: 57-69.
16. Findeling A., Garnier P., Coppens F., Lafolie F., Recous S.: Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. *Eur. J. Soil Sci.*, 2007, **58(1)**: 196-206.
17. Franko U., Puhlmann M., Kuka K., Böhme F., Merbach I.: Dynamics of water, carbon and nitrogen in an agricultural used Chernozem soil in Central Germany. W: Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems. Springer Netherlands, 2007, 245-258.
18. Govaerts B., Fuentes M., Mezzalama M., Nicol J. M., Deckers J., Etchevers J. D., Figueroa-Sandoval B., Sayre K. D.: Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil Till. Res.*, 2007, **94(1)**: 209-219.
19. Graß R., Thies B., Kersebaum K.C., Wachendorf, M.: Simulating dry matter yield of two cropping systems with the simulation model HERMES to evaluate impact of future climate change. *Eur. J. Agron.*, 2015, **70**: 1-10.
20. Gu, X. B., Li, Y. N., Du, Y. D.: Continuous ridges with film mulching improve soil water content, root growth, seed yield and water use efficiency of winter oilseed rape. *Ind. Crop. Prod.*, 2016, **85**: 139-148.
21. Han, M., Zhao, C., Feng, G., Yan, Y., Sheng, Y.: Evaluating the effects of mulch and irrigation amount on soil water distribution and root zone water balance using HYDRUS-2D. *Water*, 2015, **7(6)**: 2622-2640.
22. Herrmann, A., Kersebaum, K. C., Taube, F.: Nitrogen fluxes in silage maize production: relationship between nitrogen content at silage maturity and nitrate concentration in soil leachate. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, **73(1)**: 59-74.
23. Holland, J. M.: The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agr. Ecosys. Environ.*, 2004, **103(1)**: 1-25.
24. Hoogenboom, G., White, J. W., Messina, C. D.: From genome to crop: integration through simulation modeling. *Field Crops Res.*, 2004, **90(1)**: 145-163.
25. Keating, B. A., Gaydon, D., Huth, N. I., Probert, M. E., Verburg, K., Smith, C. J., Bond, W.: Use of modelling to explore the water balance of dryland farming systems in the Murray-Darling Basin, Australia. *Eur. J. Agron.*, 2002, **18.1**: 159-169.
26. Kersebaum, K. C.: Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecol. Model.*, 1995, **81.1**: 145-156.

27. Kersebaum K. C.: HERMES for Windows 2.04.1. A simulation model for N-dynamics in arable fields, 2010.
28. Kersebaum K.C.: Modelling nitrogen dynamics in soil–crop systems with HERMES. W: Modelling water and nutrient dynamics in soil–crop systems. Springer Netherlands, 2007, 147-160.
29. Kersebaum K.C., Wurbs A., de Jong R., Campbell C.A., Yang J., Zentner R.P.: Long-term simulation of soil–crop interactions in semiarid southwestern Saskatchewan, Canada. *Eur. J. Agron.*, 2008, **29**(1): 1-12.
30. Kirda C.: Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. W: Food and Agricultural Organization of the United Nations, Deficit Irrigation Practices, Water Reports, 2002, **22**: 3-10.
31. Lekakis E.H., Antonopoulos V.Z.: Modeling the effects of different irrigation water salinity on soil water movement, uptake and multicomponent solute transport. *J. Hydrol.*, 2015, **530**: 431-446.
32. Levidow L., Zaccaria D., Maia R., Vivas E., Todorovic M., Scardigno A.: Improving water-efficient irrigation: prospects and difficulties of innovative practices. *Agric. Water Manage.*, 2014, **146**: 84-94.
33. Liu S., Yang J. Y., Zhang X. Y., Drury C. F., Reynolds W. D., Hoogenboom G.: Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean–maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China. *Agr. Water Manage.*, 2013, **123**: 32-44.
34. Machul M.: Możliwości i skutki stosowania uproszczeń i siewu bezpośredniego w uprawie kukurydzy. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2007, **9**: 159-163.
35. Mermoud A., Tamini T. D., Yacouba H.: Impacts of different irrigation schedules on the water balance components of an onion crop in a semi-arid zone. *Agr. Water Manage.*, 2005, **77**(1): 282-295.
36. Mkoga Z. J., Tumbo S. D., Kihupi N., Semoka J.: Extrapolating effects of conservation tillage on yield, soil moisture and dry spell mitigation using simulation modelling. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, 2010, **35**(13): 686-698.
37. Montenegro A.A.A., Abrantes J. R.C.B., De Lima J.L.M.P., Singh V.P., Santos T.E.M.: Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, 2013, **109**: 139-149.
38. Moutonnet P.: Yield response factors of field crops to deficit irrigation. W: Food and Agricultural Organization of the United Nations, Deficit Irrigation Practices, Water Reports, 2002, **22**: 11-16.
39. Mukherjee A., Kundu M., Sarkar S.: Role of irrigation and mulch on yield, evapotranspiration rate and water use pattern of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Agr. Water Manage.*, 2010, **98**(1): 182-189.
40. Mupangwa W., Jewitt G. P. W.: Simulating the impact of no-till systems on field water fluxes and maize productivity under semi-arid conditions. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, 2011, **36**(14): 1004-1011.
41. Olivier Y., Sands R.: Yield, soil water and economic benefits of fallow, Liebe Spring Field Day, Dalwallinu 2012, 11-14.
42. Payero J. O., Tarkalson D. D., Irmak S., Davison D., Petersen J. L.: Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. *Agric. Water Manage.*, 2009, **96**(10): 1387-1397.
43. Probert M. E., Dimes J. P., Keating B. A., Dalal R. C., Strong W. M.: APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. *Agr. Syst.*, 1998, **56**(1): 1-28.
44. Siczek A., Horn R., Lipiec J., Usowicz B., Łukowski M.: Effects of soil deformation and surface mulching on soil physical properties and soybean response related to weather conditions. *Soil Till. Res.*, 2015, **153**: 175-184.
45. Smagacz, J.: Produkcyjno-ekonomiczne i środowiskowe skutki różnych systemów uprawy roli. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2012, **29**(3): 121-134.
46. Smagacz, J., Kuś, J.: Wpływ długotrwałego stosowania płodozmianów zbożowych na planowanie zbóż oraz wybrane chemiczne właściwości gleby. *Fragm. Agron*, 2010, **4**: 119-134.

-
47. Smith M., Kivumbi D., Heng L. K.: Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. W: Food and Agricultural Organization of the United Nations, Deficit Irrigation Practices, Water Reports, 2002, **22**: 17-27.
 48. Sommer R., Piggin C., Haddad A., Hajdibo A., Hayek P., Khalil Y.: Simulating the effects of zero tillage and crop residue retention on water relations and yield of wheat under rainfed semiarid Mediterranean conditions. *Field Crop. Res.*, 2012, **132**: 40-52.
 49. Trnka M., Brázdil R., Olesen J.E., Eitzinger J., Zahradníček P., Kocmánková E., Hlavinka P.: Could the changes in regional crop yields be a pointer of climatic change? *Agr. Forest Meteorol.*, 2012, **166**: 62-71.
 50. Włodek S., Biskupski A., Pabin J., Kaus A.: Plonowanie roślin oraz zmiany retencji wodnej gleby w różnych systemach uprawy roli. *Inż. Rol.*, 2007, **11**: 195-200.
 51. Yang X., Chen Y., Pacenka S., Gao W., Ma L., Wang G., Yan P., Sui P., Steenhuis T.S.: Effect of diversified crop rotations on groundwater levels and crop water productivity in the North China Plain. *J. Hydrol.*, 2015, **522**: 428-438.
 52. Zeleke K.T.; Luckett D.J.; Cowley R.B.: The influence of soil water conditions on canola yields and production in Southern Australia. *Agr. Water Manage.*, 2014, **144**: 20-32.
 53. Zhang S., Lövdahl L., Grip H., Jansson P.E., Tong Y.: Modelling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese Loess Plateau. *Soil Till. Res.*, 2007, **93.2**: 283-298.
 54. Zwart S. J., Bastiaanssen W. G.: Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agr. Water Manage.*, 2004, **69.2**: 115-133.
-

Adres do korespondencji:

mgr Aleksandra Król
Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 4786 897
e-mail: akrol@iung.pulawy.pl

Tomasz Żyłowski

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

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA EMISJĘ PODTLENKU AZOTU Z ROLNICTWA*

Słowa kluczowe: rolnictwo, podtlenek azotu, emisje gazów cieplarnianych, warunki meteorologiczne

Wstęp

Podtlenek azotu (N_2O) należy do grupy gazów cieplarnianych Ziemi (GHG, ang. *Greenhouse Gases*), a jego antropogeniczna emisja stanowi ok. 8-procentowy wkład w obserwowane globalne ocieplenie (9, 16). Koncentracja tego gazu w atmosferze od początku ery przemysłowej wzrosła o 20%, od 270 ppb (ang. *parts per billion* – części na miliard) przed 1790 rokiem, do 328 ppb w 2013 roku. Szacuje się, iż rolnicze użytkowanie gleb odpowiada za emisję 6,3 ($\pm 2,9$) Tg (Teragram= 10^{12} g) N_2O -N na rok i jest jego głównym antropogenicznym źródłem (9, 16, 33). Należy podkreślić, że podtlenek azotu charakteryzuje się o 298 razy większym niż CO_2 potencjałem globalnego ocieplenia atmosfery (GWP, ang. *Global Warming Potential*) oraz długim czasem rozkładu (około 114 lat). Działania w kierunku ograniczenia jego emisji do atmosfery mogą przynieść znaczące efekty na rzecz zmniejszenia antropogenicznego efektu cieplarnianego.

Emisja N_2O w Polsce w 2012 roku wyniosła 95,45 Gg ($1Gg=10^9g$), tj. ok. 29,59 mln ton CO_2eq (ekwiwalentu CO_2), co stanowi 7,4% emisji gazów cieplarnianych w Polsce. Emisje z rolnictwa stanowią około 85% emisji krajowych, przy czym 68% to emisje z gleb (13). Bezpośrednia emisja podtlenku azotu związana jest z przemianami azotu w glebie oraz azotu wnoszonego do gleb w postaci nawozów mineralnych i naturalnych. Kolejnym źródłem rolniczych emisji N_2O jest produkcja zwierzęca, głównie składowanie i gospodarka odchodami zwierzęcymi. Emisje pośrednie pochodzą z wymywania azotu do wód gruntowych i powierzchniowych (12, 20).

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.7 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Emisja N_2O szacowana jest najczęściej (także w Polsce) przy użyciu współczynnika EF (ang. *Emission Factor*), ustalonego przez IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) i przyjmuje się, że jest równa średnio 1% ilości zaaplikowanego azotu ($EF=0,01$ przy zakresie niepewności w przedziale $EF=0,003-0,03$) (16, 24).

Mechanizmy powstawania N_2O

Badania przeprowadzone w ostatnich dekadach pomagają zrozumieć mechanizm powstawania emisji podtlenku azotu do atmosfery oraz wskazać czynniki wpływające na jego tempo. Bezpośrednie pomiary emisji N_2O w warunkach polowych, wskazują na dużą zmienność tego procesu w czasie i przestrzeni (zaobserwowano emisje na poziomie od 0 do 21% zaaplikowanego azotu) (22, 33, 37).

Najbardziej znaczącymi procesami, w których powstaje N_2O , są mikrobiologiczne procesy nityfikacji i denityfikacji. Wchodzą one w cykl obiegu azotu, którego schemat przedstawiono na rysunku (Rys. 1).

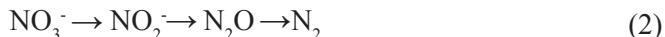
Nityfikacja zachodzi w warunkach tlenowych i polega na utlenianiu amoniaku i soli amonowych do azotynów i azotanów z udziałem bakterii glebowych z grup *Nitrosomonas* i *Nitrobakter*. Proces ten można w uproszczeniu przedstawić za pomocą poniższego schematu:



Gdy dostęp tlenu jest ograniczony i utlenianie amonu jest niepełne, to w reakcjach pośrednich lub ubocznych zamiast azotanów powstaje N_2O lub NO (32).

Nityfikacja wpływa korzystnie na żyzność gleby, gdyż w jej wyniku związki azotowe przekształcane są w związki łatwo dostępne. Jeśli jednak nie zostaną wchłonięte przez kompleks sorpcyjny gleby lub pobrane przez rośliny łatwo ulegają wymyciu z profilu gruntowego i zanieczyszczają wody gruntowe. Całkowity wpływ nityfikacji na emisję podtlenku azotu nie jest duży. Szacuje się że azot tracony przez nityfikację w postaci N_2O stanowi mniej niż 1% (39).

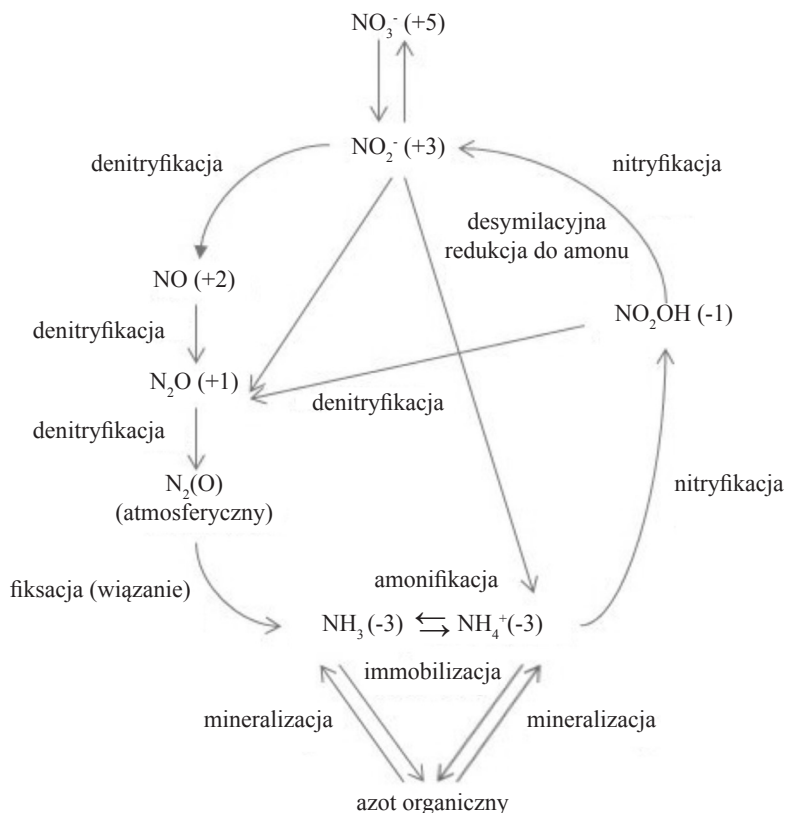
Denityfikacja jest procesem, w czasie którego mikroorganizmy beztlenowe redukują nieorganiczne związki azotu. Można przedstawić go w uproszczeniu jak niżej:



Wynikiem tego procesu jest powstawanie N_2 , jednak gdy nie zachodzi on do końca, emitowane są NO i N_2O (33).

Wśród czynników regulujących przebieg denityfikacji należy wymienić: dostępność tlenu, wilgotność, temperaturę gleby oraz rodzaj i dostępność węgla organicznego. W warunkach polowych denityfikacja nasila się wraz ze wzrostem stężenia azotanów w wilgotnej glebie, a więc po aplikacji nawozów mineralnych oraz przyoraniu resztek pożywnych bogatych w azot (32, 39).

Małe frakcje podtlenku azotu są również emitowane w procesach niebiologicznych: głównie denitryfikacji chemicznej oraz utleniania pochodnych amoniaku (33).



Rysunek 1. Cykl azotu w przyrodzie

Źródło: Signor i in., 2013 (33)

Główne czynniki wpływające na wielkość emisji N₂O

W związku ze złożonością i wzajemną zależnością procesów wpływających na emisję gazów cieplarnianych z gleb użytkowanych rolniczo, ich analiza sprawia wiele trudności. Kluczowymi parametrami sterującymi emisją N₂O są: temperatura i wilgotność gleby, system i rodzaj uprawy, sposób użytkowania gruntu (zmiany użytkowania powodują znaczący wzrost emisji), parametry fizykochemiczne gleby i zawartość składników odżywczych (szczególnie C i N), a przede wszystkim nawożenie: typ, ilość, czas i sposób aplikacji (24).

Głównymi czynnikami środowiskowymi, wpływającymi na proces emisji N₂O są temperatura i wilgotność gleby, ponieważ determinują aktywność mikroorganizmów glebowych (33). Na procesy nitryfikacji i denitryfikacji wpływ ma również wiele

czynników związanych z właściwościami gleby tj.: dostępność azotu, stosunek węgla do azotu, zawartość materii organicznej, tekstura, napowietrzenie, zwięzłość, oraz pH. Z zestawienia badań dokonanego przez Signor i in. (33) wynika, że istotnymi czynnikami wpływającymi na emisję N_2O poprzez nityfikację jest gęstość objętościowa gleby (ang. *bulk density*), a w przypadku denityfikacji wypełnienie wodą porów glebowych wyrażone poprzez współczynnik WFPS (ang. *Water Filled Pores Space*). Co więcej czynniki te wpływają nie tylko na produkcję N_2O , ale także jego dyfuzję do atmosfery. W niskich temperaturach przemiany związków azotu są małe i wzrastają wraz z jej wzrostem. W Tab. 1. Przedstawiono najważniejsze czynniki wpływające na emisję N_2O .

Tabela 1

Najważniejsze czynniki, związane z glebą i warunkami środowiskowymi oraz ich wpływ na emisję podtlenku azotu

Parametr	Wpływ na emisję podtlenku azotu
Napowietrzenie gleby	małe napowietrzenie → większa denityfikacja, głównie emisja N_2 średnie napowietrzenie → wyższa emisja
Wilgotność gleby	wzrastająca wilgotność → wzrasta emisja ale: spada gdy jest bardzo wilgotno podczas zmian (sucho/wilgotno) → większa emisja
Dostępność azotu	większa koncentracja → większa emisja
Tekstura gleby	piasek - glina → emisja wzrasta przy wzroście zawartości ilu koloidalnego
pH gleby	gdy głównym źródłem jest nityfikacja: wzrost pH obniża emisję gdy głównym źródłem jest denityfikacja: wzrost pH podwyższa emisję
Materia organiczna	wzrost zawartości węgla organicznego → wzrost emisji
Uprawa	pozostawianie resztek poźniwnych i korzeni podwyższa emisję
Temperatura gleby	wzrost temperatury → wzrost emisji
Sezon	mokre lato → wyższa emisja wiosenne przemarzanie → większa emisja zima → mniejsza emisja

Źródło: Brentrup i in., 2000 (1)

Udział nityfikacji i denityfikacji w emisji jest zmienny i zależy od warunków pogodowych i właściwości gleby (33). Badania laboratoryjne (19) pokazały na przykład, że przy wilgotności gleby równej 70% pojemności polowej (FC, ang. *Field Capacity*) nityfikacja była znacząco wyższa w glebie gliniastej ($980 - 1440 \mu\text{g N kg gleby}^{-1} \text{dzień}^{-1}$) niż glebie piaszczystej ($60 - 460 \mu\text{gN kg gleby}^{-1} \text{dzień}^{-1}$). Analizowany stosunek emitowanego N_2O -N do zmierzonej zawartości NO_3 -N w glebie, zmieniał się w granicach od 0,28 do 0,48% (średnio 0,39%), co wskazuje na względnie stałą relację między nityfikacją a emisją podtlenku azotu. Wzrost emisji N_2O -N (poprzez

nitryfikację) był skorelowany ze wzrostem wilgotności (0,49% przy 40%FC i 0,93% przy 100%FC) oraz odwrotnie skorelowany ze wzrostem temperatury (0,49% przy 5°C i 0,17% przy 20°C). Aktywność denitryfikacyjna (N_2+N_2O) w glinie lekkiej zwiększała się wraz ze wzrostem temperatury i wilgotności, podczas gdy gleba piaszczysta reagowała tylko na wzrost temperatury. Efekt wzrostu temperatury na denitryfikację, uzależniony jest od zawartości węgla organicznego i tekstury gleby. Na przykład w glebie grubo-piaszczystej wartość współczynnika Q_{10} (określającego jak zmienia się szybkość reakcji przy wzroście temperatury o 10 °C) zmieniała się w zakresie 1,9 – 3,4; w glinie piaszczystej w zakresie 4,9 – 8,9. Stosunek N_2 do N_2O wzrastał wykładniczo wraz ze wzrostem temperatury i był w zakresie od 0 do 16 w zależności od rodzaju gleby (piasek gruby – glina piaszczysta). Emisja podtlenku azotu i aktywność denitryfikacyjna może być wyrażona za pomocą równania Arrheniusa (19), jak poniżej:

$$N_2O = A_{N_2O} \exp \left(\frac{E_{a(N_2O)}}{RT} \right) \quad (3)$$

gdzie: A_{N_2O} - stała dla danej reakcji, E_a - energia aktywacji, $R=8,32 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ - stała gazowa, T - temperatura w stopniach Kelvina (K).

Wilgotność gleby jest najważniejszym parametrem wpływającym na emisję podtlenku azotu, ponieważ reguluje dostępność tlenu mikroorganizmom glebowym. Wiele prac pokazuje bezpośredni związek między opadami atmosferycznymi i wilgotnością gleby a emisją N_2O (16). W szczególności parametr WFPS (ang. *Water Filled Pore Space*) jest bezpośrednio związany z opadami i silnie skorelowany z emisją N_2O . Jednakże nie ma dostępnych wyników eksperymentów polowych, w których mierzono by emisję podtlenku azotu w podobnych warunkach, przy kontrolowanych sumach opadów (16). Lesschen i in. (16) wykorzystali zbiór danych przygotowanych przez Stehfest'a i Bouwman'a (37), by wyznaczyć związek między średnimi rocznymi opadami i emisją podtlenku azotu. Użyli wyników 1008 pomiarów emisji z gleb użytkowanych rolniczo i 207 pomiarów z terenów z naturalną roślinnością w klimacie umiarkowanym. Wykazali na tej podstawie ścisły związek między sumą opadów rocznych a wielkością emisji N_2O .

Dobbie i in. (4) przedstawili wyniki pomiarów emisji z upraw zbóż, rzepaku, ziemniaków oraz użytków zielonych, prowadzonych w Wielkiej Brytanii w latach 1999-2001. Pomiary emisji N_2O były wykonywane metodą komorową przez cały rok, lub w przypadku kilku doświadczeń – tylko w okresie wegetacyjnym i później interpolowane. Zanotowano maksymalną dzienną emisję podtlenku azotu na poziomie $1,2 \text{ kg ha}^{-1}$. Wielkość skumulowanych emisji rocznych wahała się od 1,7 do $27,6 \text{ kg ha}^{-1}$. Natomiast roczna emisja wyrażona za pomocą współczynnika EF wynosiła od 0,4% do 6,5% zaaplikowanego N. Pomiary na użytkach zielonych wskazują, że opady deszczu, podnoszące współczynnik WFPS, były głównym czynnikiem

wpływającym na emisję podtlenku azotu podczas okresu wegetacyjnego. Obliczono, że 77% rocznych emisji powstaje podczas 4 tygodni od aplikacji nawozu, przy odpowiedniej wilgotności. Stwierdzono również występowanie zależności pomiędzy opadami atmosferycznymi występującymi tydzień przed nawożeniem i 3 tygodnie po, a emisją N_2O . Wykazano ponadto, że takie same opady atmosferyczne w południowej i wschodniej Anglii (gleby wapienne oraz cieplejszy klimat) skutkują mniejszą emisją podtlenku azotu niż w części północnej.

Następujące po sobie sukcesywnie okresy suche i wilgotne podwyższają wielkość emisji. Obserwacje, na które powołuje się Signor i in. (33), opisują największe emisje N_2O tuż po wystąpieniu opadu atmosferycznego i powracające do przeciętnych po upływie 3 dni po wystąpieniu opadów. Zawartość wody w glebie wpływa na jej aktywność mikrobiologiczną. Wilgotność gleby ma też ścisły związek z jej napowietrzeniem. Wraz ze wzrostem WFPS maleje wypełnienie powietrzem porów glebowych, zwiększając denitryfikację. Kiedy napowietrzenie gleby jest mniejsze, N_2 staje się głównym gazem emitowanym do atmosfery. Wielkość WFPS jest także ściśle skorelowana z dostępnością węgla, potencjałem nityfikacyjnym i mineralizacyjnym. Jednakże bardzo duża wilgotność (współczynnik WFPS powyżej 80%) obniża emisję podtlenku azotu (33).

W pracy Laville i in. (15) przedstawiono wyniki doświadczenia prowadzonego we Francji z płodozmiannem w rotacji: kukurydza-pszenica ozima-jęczmień ozimy-gorczyca. Pomiary emisji wykonano metodą komorową, używając 6 komór automatycznych, w latach 2007 (jęczmień), 2008 (kukurydza). Cykl pomiarowy trwał 15 min., powtarzany 16 razy na dobę. Zawartość azotu w biomase resztek poźniwnych oszacowano używając wskaźników IPCC. Dodatkowo, w laboratorium, do próbek gleby zaaplikowano nawóz, (azotan potasu – KNO_3) i mierzono emisję w zależności od wartości współczynnika WFPS. Ustalono, że emisja jest największa ($5955 \text{ ng N m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) przy WFPS=69%. Wartość emisji spada gwałtownie przy wyższej wartości tego współczynnika. Zakres współczynnika, w którym emisja jest duża wynosi 57% - 69%. W roku 2007 średnia emisja N_2O wyniosła $6,3 \text{ ng N m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a w 2008 $11,2 \text{ ng N m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Z powodu braku danych pomiarowych, dotyczących emisji w podobnych warunkach, a w kontrolowanych temperaturach, Lesschen i in. (16) użyli zbioru danych przedstawionych przez Stehfest i in. (37) by ustalić zależność między średnią roczną temperaturą a emisją roczną wyrażoną współczynnikiem EF. Analiza ta nie wykazała bezpośredniego związku między średnią temperaturą roczną a wielkością emisji podtlenku azotu. Wiele prac wykazało jednak bezpośredni związek między emisją N_2O a temperaturą (3, 4, 16, 19). Na przykład wyniki przedstawione przez Dobbie i in. (3) pokazują, że wzrost temperatury gleby, WFPS i zawartości mineralnego N (aplikacja nawozu) powoduje wykładniczy wzrost N_2O , w przypadku gdy inne czynniki nie zaburzają tego procesu. Największe emisje zanotowano przy wysokich wartościach WFPS (70-90%) i przy relatywnie dużej koncentracji azotu. Emisje, mierzone na łąkach w Szkocji, gwałtownie wzrastają po aplikacji nawozu

i utrzymują się na wysokim poziomie, aż do momentu skoszenia trawy. Ponadto porównanie danych z 3 lat pokazuje ścisły związek między wielkością emisji a temperaturą gleby i miesięczną sumą opadów. Podczas mokrego lata emisja N_2O była blisko 3-krotnie większa niż w roku suchym i osiągnęła nawet $5,8 (\pm 1,2) \%$ zaaplikowanego nawozu, w stosunku rocznym. Mierzono także emisje z upraw zbóż, rzepaku, ziemniaków i brokułów. W przypadku pszenicy ozimej i jęczmienia jarego emisje były na poziomie $0,2-0,8\%$ zaaplikowanego N, dla rzepaku ok. 1% , emisje z upraw ziemniaka i brokułów były porównywalne do emisji z łąk.

W wielu pracach (4, 6, 11, 16) wykazano duży wzrost emisji GHG podczas wiosennych cykli przemarzania/rozmarzania gleby, a także przy wzroście wilgotności gleby po okresie suchym (opad atmosferyczny) i to zarówno w warunkach polowych jak i laboratoryjnych (11, 14). Porównanie wyników kilkudziesięciu opublikowanych prac, w których mierzono emisje N_2O (11), wskazuje znaczny procentowy wzrost emisji po wystąpieniu opadu (450% do $80\text{tys. } \%$) w porównaniu do emisji przed wystąpieniem opadu. Na przykład wzrost emisji podtlenku azotu w tropikalnych warunkach Kostaryki, nastąpił już 30 min po deszczu i osiągnął swój szczyt po ok. 8h, przy czym okazało się, że pojedynczy umiarkowany opad, może odpowiadać za $15\% - 90\%$ emisji tygodniowych. Przeanalizowanie wyników 165 doświadczeń polowych i laboratoryjnych ujawniło następowanie wzrostu emisji w okresie od 12 godzin do 14 dni po wystąpieniu opadu oraz jego wpływ na skumulowaną roczną emisję w zakresie od 2% do 50% . Opisujący tu wzrost emisji tłumaczyć można hipotetycznie jako wynik dwóch procesów: wzrostu aktywności metabolicznej mikroorganizmów glebowych oraz zmienności właściwości fizycznej gleb, prowadzącej do uwolnienia skumulowanych w porach glebowych gazów. Gleby zwarte, z większą pojemnością wodną i dostępnym C i N, emitują więcej podtlenku azotu niż gleby luźniejsze (30). Wpływ na ten proces mają także początkowa zawartość wody oraz długość suszy, czy wielkość opadu. Podobnie znaczny wzrost emisji N_2O następuje w temperaturach bliskich 0°C (przemarzanie/rozmarzanie). Strumienie N_2O wzrastały nawet o $17\text{ tys. } \%$ względem tła. Dla pól uprawnych i użytków zielonych względny wzrost emisji zawiera się w przedziale $750\% - 1760\%$. Na przykład Flessa i in. (6) przedstawili wyniki badań prowadzonych na glebach uprawnych południowych Niemiec, gdzie stwierdzono, iż 46% rocznej emisji podtlenku azotu przypada na zimowe cykle przemarzania/rozmarzania gleby. Na emisje podczas cykli zamarzania/rozmarzania prawdopodobnie wpływ mają procesy wspomniane wyżej. Na wielkość wzrostu emisji wpływ mają też czynniki związane z teksturą gleby oraz czasem, w którym gleba pozostawała zamarznięta. Dodatkowo wzrost emisji N_2O podczas rozmarzania jest większy w cieplejszym klimacie w porównaniu do zimniejszego. Spodziewane zmiany klimatu prowadzić będą do zwiększenia częstotliwości występowania cykli przemarzania/rozmarzania oraz wysuszenia/nawadniania gleb, co sprawia, iż uwzględnienie tych procesów w badaniach i modelowaniu emisji staje się bardzo ważne (11).

Modele wykorzystywane do szacowania emisji N₂O

Najprostsze szacowanie emisji podtlenku azotu proponowane przez IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) Tier1, polega na użyciu domyślnych parametrów (np. współczynniki emisji), wyliczonych na poziomie globalnym, udostępnionych w *IPCC Guidelines* i przemnożeniu ich przez wielkości źródeł emisji na poziomie danego kraju (np. ilość zużywanych nawozów mineralnych). Metoda Tier1 jest jednak dużym uproszczeniem, z niepewnością dla standardowych czynników emisji bezpośrednich w zakresie od -70% do +300% (36). Używa się też metody Tier2, będącej ulepszeniem Tier1. Metoda ta bazuje na tych samych podstawach metodologicznych co Tier1, jednak współczynniki emisji (EF, ang. *emission factor*) oraz dane (ang. *activity data*) do wyliczeń, są definiowane na poziomie kraju dla najważniejszych sposobów użytkowania gruntów, lokalnych warunków klimatycznych i modeli. Emisje są wyliczane w skalach regionalnych (10⁴ do 10⁶ ha), uwzględnia się w nich także wpływ praktyk rolniczych oraz właściwości gleby. Metoda Tier3 jest kolejnym udoskonaleniem w/w metod. Używa modelowania i inwentaryzacji powtarzalnych pomiarów, wykonanych na terenie danego kraju, by jeszcze lepiej dopasować czynniki emisji do lokalnych warunków. Monitoruje również zmienność przestrzenną emisji (w obrębie regionów), dynamikę zmian parametrów glebowych i biomasy (25).

Do określania emisji N₂O używa się narzędzi, które można podzielić na dwie grupy: procesowe modele ekosystemu – Tier3 (powielające procesy i czynniki powodujące emisje w glebie) i modele statystyczne – Tier2 (określające regresje czynników kontrolujących i emisji odnotowanych w terenie). Oba podejścia można stosować w celu ewidencjonowania emisji gazów cieplarnianych na podstawie Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (UNFCCC) (36). Do szacowania emisji GHG na poziomie europejskim używano modelu DNDC oraz modelu statystycznego opracowanego przez Stehfesta i Bouwmana (model S&B) (36, 37).

Poniżej przedstawiono bardziej szczegółowe porównanie dwóch modeli: rozwijanego głównie w Australii modelu APSIM oraz modelu DNDC (8, 38).

APSIM jest środowiskiem złożonym z modułów symulujących biologiczne i fizyczne procesy zachodzące w systemach rolniczych. Moduły SoilN oraz SurfaceOM symulują dynamikę obiegu azotu w kroku dziennym tj. mineralizację, demineralizację, nitryfikację, denitryfikację, absorpcję azotu dla każdej kolejnej warstwy gleby. Procesy te kontrolowane są przez zasobność gleby w wodę i jej obieg, symulowany modułem SoilWat, oraz właściwości gleby: pH, zawartość węgla i materii organicznej (38).

Nitryfikacja w tym modelu oparta jest na równaniach reakcji enzymatycznej Michaelis-Menten i bazując na zawartości jonów NH₄⁺, obliczana jest następująco:

$$R_{\text{nit}} = k_{\text{max}} \frac{(\text{NH}_4)}{(\text{NH}_4) + K_{\text{NH}_4}} f(T)f(\Theta)f(\text{pH}) \quad (4)$$

gdzie: (NH_4) oznacza koncentrację jonów amonowych w glebie (mg kg^{-1}), k_{max} jest współczynnikiem maksymalnym nitryfikacji (domyślnie $40 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dzień}^{-1}$), K_{NH_4} koncentracją przy której szybkość reakcji równa jest połowie szybkości maksymalnej, $f(T)$, $f(\Theta)$, $f(\text{pH})$ są funkcjami skalarnymi o wartościach z przedziału $(0,1)$ i zależnymi odpowiednio od temperatury, zawartości wody i współczynnika pH.

Współczynnik denitryfikacji dany jest wzorem:

$$R_{\text{denit}} = k_{\text{denit}} (\text{NO}_3) C_A f(T) f(\Theta) f(\text{pH}) \quad (5)$$

gdzie: k_{denit} jest współczynnikiem denitryfikacji (domyślna wartość $0,0006$), (NO_3) ilością jonów azotanowych w glebie (mg kg^{-1}) a C_A ilością aktywnego węgla ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), a funkcje $f(T)$, $f(\Theta)$, $f(\text{pH})$ jak w równaniu (4).

Emisja N_2O z procesu nitryfikacji jest obliczana w modelu APSIM z równania:

$$\text{N}_2\text{O}_{\text{nit}} = k R_{\text{nit}} \quad (6)$$

gdzie k oznacza współczynnik nitryfikacji (wartość domyślna $k=0,002$).

Emisja N_2O podczas denitryfikacji liczona jest ze stosunku N_2 do N_2O jak poniżej:

$$\frac{\text{N}_2}{\text{N}_2\text{O}_{\text{denit}}} = \max \left\{ (0,16k_1), \exp \left(\frac{-0,8\text{NO}_3}{\text{CO}_2} \right) \right\} \max \left\{ 0,1, \left(1,5 \frac{\Theta}{\text{TP}} - 0,32 \right) \right\} \quad (7)$$

gdzie: k_1 jest współczynnikiem dyfuzji gazu w glebie, NO_3 koncentracją jonów w suchej masie (mg kg^{-1}), CO_2 jest wielkością oddychania glebowego (w $\text{mg C g gleby}^{-1} \text{ dzień}^{-1}$), TP jest porowatością ogólną.

Model DNDC składa się z czterech modułów: woda/gleba, roślina/wzrost, dekompozycja i denitryfikacja. Model operuje na krokach dziennych, z wyjątkiem okresu bezpośrednio po opadach, kiedy stosuje kroki godzinowe. Jako danych wejściowych wymaga: informacji meteorologicznych, charakterystyki gleby i uprawy oraz informacji o zabiegach agrotechnicznych. Nitryfikacja w modelu DNDC jest opisana przez serie procesów utleniania mikrobiologicznego za pomocą równania (38):

$$R_{\text{nit}} = k_{\text{max}} \text{NH}_4 B_n f(\text{pH}) \quad (8)$$

gdzie B_n jest masą mikroorganizmów nitryfikacyjnych, k_{max} funkcją zależną od zawartości iłu koloidalnego i wilgotności gleby, $f(\text{pH})$ funkcją związaną z odczynem. Podobnie jak w modelu APSIM, emisja N_2O jest obliczana jako funkcja współczynnika nitryfikacji R_{nit} .

Model denitryfikacji działa w sekwencji $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ bazując na wielkości populacji różnych grup mikroorganizmów denitryfikacyjnych w zależności od dostępności węgla w glebie. Kolejne związki azotu ze schematu powyżej, można wyznaczyć z równania:

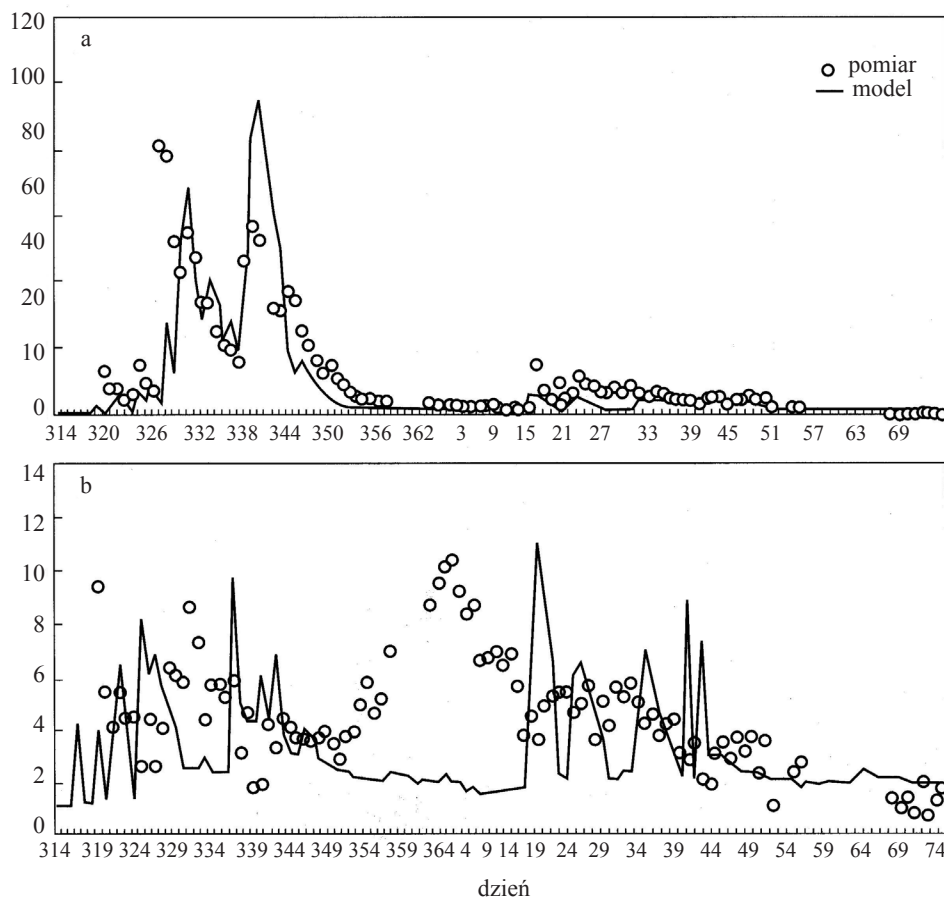
$$\frac{dN_i}{dt} = \left(\frac{UN_i}{YN_i} + MN_i \frac{N_i}{N_{\text{tot}}} \right) B(t) \mu_{\text{HN}_i} \mu_{\text{TDN}} \quad (9)$$

gdzie UN_i jest współczynnikiem wzrostu organizmów denitryfikacyjnych, YN_i maksymalnym wzrostem zawartości węgla spowodowanym denitryfikacją związku N_i , MN_i współczynnikiem efektywności (kg N kg^{-1} gleby h^{-1}), sumą substratów azotu a $B(t)$ jest masą bakterii denitryfikacyjnych, współczynniki μ są zależne od pH i temperatury.

Giltrap i in. (7) zestawili wyniki kilkudziesięciu prac, porównując symulowane przez model DNDC i zmierzone emisje gazów cieplarnianych. Stopień zgodności między wartościami symulowanymi a zmierzonymi, był bardzo różny – od dobrego do bardzo słabego. Model DNDC jest bardzo wrażliwy na dane wejściowe: klimat, gleba, uprawa więc błędne predykcje mogą być spowodowane brakiem właściwych danych pomiarowych przy kalibracji modelu.

W pracy Li i in. (17) przedstawił wyniki pomiarów i symulacji emisji N_2O z uprawy kukurydzy przeprowadzonych w La Selva Biological Station w Kostaryce w latach 1994-1995. Wyniki przedstawiono na rys. 2.

Podczas okresu pomiarowego emisja podtlenku azotu była relatywnie niska na polu bez nawożenia (ok. 10-krotnie niższa niż na polu gdzie stosowano nawożenie). Wyniki symulacji na polu z nawożeniem pokrywają się z wynikami pomiarów prowadzonych metodą komorową. Szczyty emisji wystąpiły po aplikacji nawozów, co wskazuje denitryfikację jako główny czynnik emisji. Symulowane i zmierzone wartości emisji wskazywały, że gdy inne czynniki takie jak temperatura, wilgotność i zawartość węgla nie ograniczają żywotności organizmów denitryfikacyjnych, dodatek azotu mineralnego bezpośrednio stymuluje proces denitryfikacji oraz emisji N_2O (17). Vogeler i in. (38) porównali działanie modeli DNDC i APSIM dla gleby piaszczystej (ang. *bare sandy loam*). Do opisanie parametrów glebowych użyto typowych wartości takich jak: gęstość objętościowa (ang. *bulk density*) 1 Mg m^{-3} , porowatość ogólna (ang. *total porosity*) 59%, pojemność polowa (ang. *field capacity*) 0,43 punkt trwałego wędnięcia (ang. *permanent wilting point*) 0,23, stosunek C:N ustalono na 12.



Rys. 2. Zmierzone i symulowane emisje N_2O z uprawy kukurydzy.

Wykres: a (górny) z pola nawożonego, b (dolny) z nienawożonego

Oś pozioma – dni roku (listopad 1994 -marzec 1995), oś pionowa – zmierzone/symulowane emisje (w $g\ N\ ha^{-1}\ doba^{-1}$)

Źródło: Li, 2000 (17)

Zmieniano wartości koncentracji jonów NH_4 (100 lub 500 kg/ha), współczynnika Θ (0,3; 0,45; 0,55), temperaturę gleby (5; 15; 30°C), zawartość węgla organicznego (3 lub 6%), opad ustawiono na 20 mm w pierwszym dniu i 5 mm w kolejnych. Symulację uruchomiono dla 10 dni i brano pod uwagę dzienne i skumulowane wartości nityfikacji, denityfikacji oraz emisji N_2 i N_2O . W modelu APSIM temperatura miała większy wpływ na nityfikację, w DNDC zawartość wody w glebie. Denityfikacja symulowana w modelach, była w modelu APSIM związana z zawartością wody w glebie, w DNDC uruchamiana bezpośrednio przez opad atmosferyczny. Symulowane w modelach APSIM i DNDC emisje podtlenku azotu pokazują podobne trendy jak symulowana denityfikacja; stały wzrost w DNDC, a lekki spadek w APSIM, w ciągu

10-dniowego okresu symulacji. Modele różnie reagują także na dostępność azotu, APSIM utrzymuje emisję na stałym poziomie a DNDC pokazuje wzrost liniowy. Zwiększenie intensywności opadów obniża emisję N_2O w APSIM a podwyższa w DNDC (38).

Systemy pomiarowe

Systemy pomiarowe używane do pomiarów emisji podtlenku azotu można podzielić na komorowe i mikrometeorologiczne (28).

Najszerzej rozpowszechnioną i stosowaną od ponad trzech dekad metodą pomiarów emisji N_2O jest metoda komorowa (31). Polega ona na umieszczaniu szczelnej komory na ramie wbitej w glebę i pomiarach zmian koncentracji stężenia gazu za pomocą analizatorów. Komory mogą pracować automatycznie lub być obsługiwane w sposób manualny. W pracy Rochette i in. (31) zebrano wyniki 356 eksperymentów pomiarowych i dokonano oceny ich jakości. W rozważanych pracach, czasy trwania cyklu pomiarowego wahają się od 10 do 1080 minut, liczba analizowanych próbek powietrza podczas jednego pomiaru zmienia się od 1 do 14, częstotliwość pomiarów od 1h do kilku tygodni. Stwierdzono też, że na jakość pomiarów wpływa: czas i sposób umieszczenia ramy glebowej, wymiary komory (zwłaszcza wysokość) i jej izolacja, wentylacja i wyrównywanie ciśnienia, a także warunki atmosferyczne (31). Emisja N_2O , a co za tym idzie rezultaty pomiarów z pojedynczej komory są bardzo zmienne. Na przykład Muñoz i in. (23) odnotowali emisje podtlenku azotu w zakresie od 0 do $520 \mu g m^{-2} h^{-1}$. Dlatego do wyznaczania dziennych i skumulowanych emisji używa się uśrednionych wyników pomiarów z kilku komór. Emisję N_2O w jednostce czasu wyznacza się, korzystając z równania gazu doskonałego (23):

$$F = p \frac{V}{A} \frac{\Delta c}{\Delta t} \frac{273}{(T+273)} \quad (10)$$

gdzie: F - szukana emisja gazu ($\mu g m^{-2} h^{-1}$), p - gęstość gazu ($g m^{-3}$), V - objętość komory pomiarowej (m^3), A - powierzchnia komory (m^2), $\frac{\Delta c}{\Delta t}$ - średnia zmiana koncentracji w czasie ($mg L^{-1} h^{-1}$), T jest temperaturą w $^{\circ}C$ wewnątrz komory.

Pomiary mikrometeorologiczne można przeprowadzać na powierzchniach 1-10 km^2 za pomocą analizatorów gazowych umieszczonych na wieżach pomiarowych, mierzących dodatkowo siłę wiatru, temperaturę w jednym lub większej ilości punktów nad powierzchnią ziemi lub łąnu roślinnego. Najbardziej rozpowszechnioną z metod mikrometeorologicznych jest metoda kowariancji wirów (ang. *Eddy covariance*). Zestaw pomiarowy mierzy pionową gęstość strumienia jako produkt ruchu wiatru i koncentracji gazu, w tym samym punkcie. Punktowe pomiary są uśredniane w cyklu pomiarowym, którego długość wynosi od 15 min do 1 h. Metoda jest kosztowna ze względu na wymagane przyrządy, zwłaszcza analizator gazu o częstotliwości próbkowania 10 Hz lub większej (28).

Metoda *Eddy accumulation* jest zmodyfikowaną metodą *Eddy covariance*, w której wstępujące i zstępujące prądy powietrza są zbierane do oddzielnych pojemników, w ilości proporcjonalnej do prędkości przepływu, a analizowane są skumulowane stężenia gazów. Dzięki temu można używać wolniejszych i tańszych analizatorów. Modyfikacjami tych metod są: IHF (ang. *Integrated Horizontal Flux*) używana do pomiarów na małych powierzchniach z dobrze zdefiniowanym kształtem – ze względu na uwzględnienie horyzontalnych ruchów powietrza oraz metoda bLs (ang. *backward Lagrangian stochastic dispersion technique*) używająca modelu Lagrangian’a do wyznaczenia przepływów powietrza na badanej powierzchni. Technik mikrometeorologicznych można używać także na mobilnych platformach pomiarowych, takich jak samoloty czy statki (28).

Techniki analityczne używane do wyznaczania koncentracji N_2O mogą być podzielone na trzy główne grupy: chromatograficzne, optyczne i amperometryczne (28).

Chromatografia gazowa z detektorem wychwytu elektronów ECD (ang. *Electron Capture Detector*) jest najszerzej rozpowszechnioną techniką pomiarową. Używa się jej do analizowania gazu zebranego w technice komorowej. Obecnie są już dostępne analizatory mogące pracować w warunkach polowych (28).

Do metod optycznych zaliczamy spektroskopię w podczerwieni IR (ang. *Infrared Spectroscopy*). Do pomiarów emisji N_2O szczególnie odpowiednie są: spektroskopia z transformacją Fouriera FTIR (ang. *Fourier-transform Infrared Spectroscopy*) oraz laserowa spektroskopia absorpcyjna (ang. *Infrared Laser Absorption Spectroscopy*). Dostępne są analizatory przenośne i wytrzymałe na warunki pogodowe.

Elektrochemiczne czujniki amperometryczne są rzadziej stosowane i wciąż rozwijane (28). Ich zasada działania polega na tym, iż analit (składnik próbki) wprowadzony do wnętrza czujnika ulega reakcji utleniania bądź redukcji. Natężenie generowanego w tej reakcji prądu jest proporcjonalne do stężenia analitu (28).

Praktyki ograniczania emisji

Praktyki rolnicze odpowiadają za: zmiany w strukturze gleby, jej napowietrzenie, aktywność mikrobiologiczną, stopień rozkładu resztek roślinnych, dostępność i stopień zmineralizowania azotu i są równie ważnym czynnikiem wpływającym na emisję N_2O , jak warunki pogodowe (18). Od wielu lat promowane są bezorkowe (NT - *no-tillage*) i uproszczone (RT, ang. *reduced tillage*) systemy uprawy, jako metody mające doprowadzić do redukcji erozji i zwiększenia sekwestracji węgla w glebie, w porównaniu do systemu konwencjonalnego (CT, ang. *conventional tillage*). Szacuje się, iż uprawy NT zajmują obecnie od 5% (10) do 9% (26) ogólnego areалу pól uprawnych na świecie. Wpływ tych systemów uprawy na emisje gazów cieplarnianych, szczególnie podtlenku azotu, był przedmiotem wielu badań, których wyniki nie są jednoznaczne.

W pracy Liu i in. (18) przeanalizowano uprawę monokultury kukurydzy w półpustynnym klimacie Kolorado o średniej temperaturze rocznej 10,6°C i rocznej sumie opadów atmosferycznych 382 mm na glinie lekkiej. Badano wpływ aplikacji nawozu bezpośrednio na powierzchni gleby oraz na głębokościach: 5, 10, 15 cm na emisje gazów cieplarnianych. Dokonano bezpośrednich pomiarów metodą komorową. Łączna emisja N_2O z NT była prawie 3-krotnie większa niż przy CT, przy wszystkich głębokościach nawożenia, w okresie rocznym. Część wyników zestawiono w Tabeli 2. Podobnie odnotowano większe emisje dwutlenku węgla oraz metanu.

Tabela 2

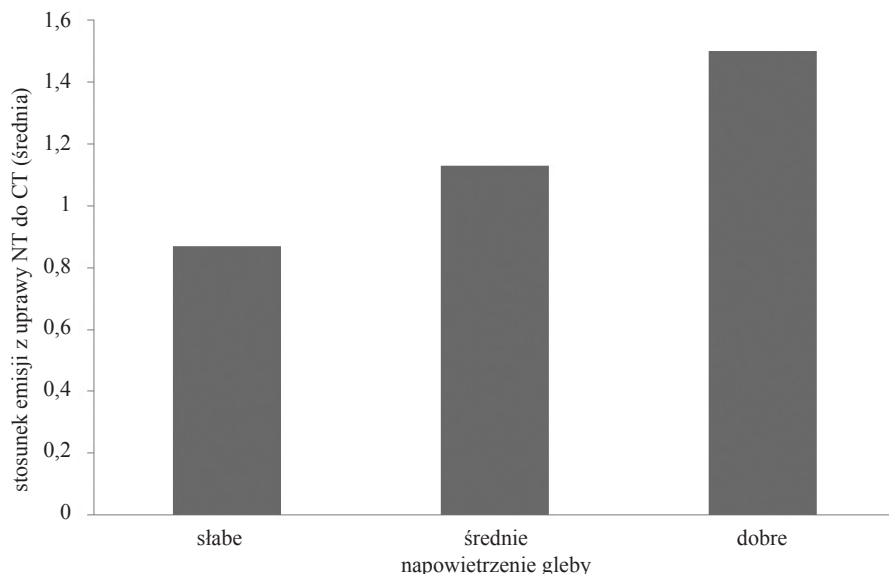
Skumulowane emisje NO i N_2O (w g N ha⁻¹) ze względu na głębokość aplikacji N i sposób uprawy.

Sposób uprawy głębokość aplikacji nawozu	CT 0,5 cm	CT 10 cm	CT 15 cm	NT 0,5 cm	NT 10 cm	NT 15 cm
NO	61,9	21,3	34,9	21,5	5,9	13,5
N_2O	385	174	125	1005	405	316

Źródło: Liu i in., 2006 (18)

Jednocześnie odnotowano kilkukrotny spadek emisji NO. Powierzchniowa aplikacja nawozu (0 lub 5 cm) znacznie zwiększa emisję tlenków azotu w obu sposobach uprawy. Sposobem na ograniczenie emisji jest nawożenie wgłębne (10 cm, 15cm). Zaobserwowano też zależność między współczynnikiem WFPS a emisją podtlenku azotu. Wartości WFPS pomiędzy 50-80% powodują wyższą emisję, a uprawa bezorkowa podnosi wilgotność gleby (18).

W pracy Rochette i in. (30) przeanalizowano pomiary z 25 różnych doświadczeń opisanych w literaturze i porównano tradycyjny (CT) i bezorkowy (NT) system uprawy, pod względem emisji podtlenku azotu. Doświadczenia podzielono na grupy w zależności od napowietrzenia gleby, które bezpośrednio powiązano z opadami i zwięzłością gleby. Uśrednionych wartości emisji N_2O dla każdej klasy napowietrzenia gleby i praktyki rolniczej, użyto do wyliczenia stosunku emisji z uprawy NT do emisji z uprawy CT. Wyniki, w podziale na klasy napowietrzenia, przedstawiono na Rysunku 3. Wyniki te sugerują że, napowietrzenie gleby ma kluczowy wpływ na emisje N_2O w uprawie bezorkowej. W dobrze napowietrzonych glebach emisje są mniejsze o 0,06 kg N·ha⁻¹ wzrastają o odpowiednio 0,12 kg N·ha⁻¹, 2 kg N·ha⁻¹ w średnio i słabo napowietrzonych.



Rysunek 3. Średni stosunek emisji N_2O z uprawy bezorkowej (NT) do uprawy konwencjonalnej (CT) w zależności od stopnia napowietrzenia gleby

Źródło: Rochette, 2008 (30)

Six i in. (34) dokonali porównania 44 zestawów danych pomiarowych emisji podtlenku azotu w uprawie NT i CT. Zestawy danych podzielono ze względu na klimat, bazując na klasyfikacji Holdridge'a. Jako wskaźnika użyto stosunku potencjalnego parowania do sumy rocznych opadów. Za klimat suchy uznano taki gdzie wskaźnik ten jest większy niż 1, a wilgotny gdy wskaźnik jest mniejszy od 1. Różnice w emisji N_2O pomiędzy uprawą bezorkową a tradycyjną przeanalizowano używając liniowego modelu mieszanego (ang. *linear mixed-effect model*). Wyznaczono różnice w emisji podtlenku azotu pomiędzy systemami uprawy CT a NT jako sumę różnic w kolejnych latach. Użyto wskaźnika stosowanego przez IPCC do wyznaczenia potencjału cieplarnianego GWP w ekwiwalentach CO_2 w 100-letnim horyzoncie czasowym, przyjmując:

$$\Delta GWP(N_2O) = \Delta N_2O \times 296 \quad (11)$$

W obu podstrefach klimatycznych i sposobach uprawy emisje N_2O zmieniały się wraz upływem czasu. W pierwszych 10-ciu latach emisja N_2O była wyższa w systemach NT niż CT, niezależnie od rodzaju klimatu. Jednakże po 20 latach, emisja podtlenku azotu w systemie bezorkowym stała się niższa w klimacie wilgotnym, a zbliżona w klimacie suchym.

W pracy Chatskikh i in. (2) przedstawiono wyniki badań i pomiarów prowadzonych w Research Centre Foulum w Danii w latach 2003-2005. Porównano wpływ praktyk rolniczych trzech systemów uprawy: konwencjonalnego CT, z orką ograniczoną RT, siewu bezpośredniego DD (ang. *direct drilling*), na emisję N_2O i CO_2 w uprawie rzepaku ozimego. Pomiary emisji podtlenku azotu wykonywane były metodą komór statycznych. Następnie dokonano symulacji emisji gazów cieplarnianych skalibrowanym modelem FASSET w okresie 30 lat. Spadek emisji N_2O w systemach RT i DD w porównaniu do uprawy tradycyjnej wyniósł odpowiednio 0,56 i 1,84 Mg CO_2eq ha⁻¹rok⁻¹.

Wpływ systemów uprawy na emisję N_2O zbadano też za pomocą modelu LandscapeDNDC (21). Do kalibracji modelu wykorzystano wyniki pomiarów metodą komorową (5 lokalizacji) i kowariancji wirów (w jednym przypadku). Model przetestowano i skalibrowano dla 6 gruntów ornych i dwóch użytków zielonych z terenu środkowej i centralnej Europy, reprezentujących różne warunki klimatyczne i glebowe. Do oceny wpływu zabiegów agrotechnicznych na emisję wykorzystano metodę Monte Carlo, biorąc pod uwagę termin siewu, zbioru, nawożenia, częstotliwość i rodzaj nawożenia, głębokość orki, ilość pozostałości roślinnych po zbiorze. Oceniono, że redukcja strat azotu poprzez emisje może być uzyskana poprzez synchronizację zapotrzebowania roślin uprawnych na azot i jego dostępności w glebie (rolnictwo precyzyjne), zmniejszenie lub podział dawek, czy użycie inhibitorów spalniających rozkład azotu i wydzielanie N_2O . Obniżenie dawek nawozu o 10% nie spowodowało spadku plonów. Optymalizacja nawożenia polegająca na podziale dawek nawozu i jego aplikacji w zależności od zapotrzebowania roślin doprowadziła do spadku emisji w przedziale od 18% do 31%.

W metaanalizie dokonanej przez Kessel i in. (10) porównano 239 badań zestawiających bezpośrednio emisje z systemów NT, RT i CT. Wpływ agrotechniki na emisje był zmienny, odnotowano zarówno wzrosty jak i spadki emisji. Podzielono uprawy ze względu na: rodzaj rośliny, czas stosowania technik uproszczonych (mniej niż 10 lat, więcej niż 10 lat), klimat (suchy, wilgotny), głębokość nawożenia (płycej niż 5 cm, głębiej niż 5 cm). Otrzymane wyniki wykazały, że sposób uprawy nie wpływa na emisje (skalowaną do powierzchni), gdy uśredniono wszystkie porównania. Jednakże uprawa bezorkowa i uproszczona redukują emisje, w porównaniu z konwencjonalną, po 10 latach od wprowadzenia, zwłaszcza w klimacie suchym (34%). Nie znaleziono znaczącej zależności między teksturą gleby a emisjami. Nawożenie wgłębne (> 5cm) zmniejsza znacząco emisje N_2O (skalowane do powierzchni), zwłaszcza w klimacie wilgotnym. Emisja (skalowana do plonu) w klimacie suchym, wzrasta znacząco (57%) przed upływem 10 lat od wprowadzenia systemów uproszczonych, ale zmniejsza się (27%) w dłuższym okresie po wprowadzeniu. Analiza wykazała także zmniejszenie emisji (skalowanej do plonu) w klimacie wilgotnym, gdy nawóz był stosowany wgłębnie. Porównanie wielkości plonów wykazało średni spadek plonu w systemach NT i RT o ok. 5%. Większy spadek odnotowano w klimacie suchym, mniejszy w wilgotnym (10).

Uproszczeniu agrotechniki muszą towarzyszyć inne działania, aby doprowadzić do zmniejszenia emisji i utrzymania plonowania. Uprawa konserwująca opiera się na trzech głównych zasadach: uproszczeniach agrotechniki (RT, NT), pozostawianiu resztek poźniwnych, wykorzystaniu wsiewek międzyplonowych oraz stosowaniu racjonalnego płodozmianu. Z przeprowadzonych porównań (27, 26) wynika, iż w klimacie suchym, bez nawadniania, uprawa konserwująca zwiększa plony (o 7,3%), co może być ważne na obszarach Afryki subsaharyjskiej i południowej Azji. Pozostawianie resztek poźniwnych i płodozmian zmniejszają negatywny wpływ praktyk uproszczonych na wielkość plonu.

Areał roślin motylkowatych zmniejszył się w Europie z 5,8 Mha w roku 1961 (4,7% obszaru) do 1,8 Mha w roku 2013 (1,6%) (29). Dobrze zbadany jest efekt zwiększania plonu rośliny następczej, zazwyczaj zboża (0,5-1,6 tony ha^{-1}), mniej znane są inne korzyści, takie jak: możliwość ograniczenia nawożenia (wiązanie atmosferycznego N_2), mniejsza emisja GHG w całej rotacji, ograniczenie występowania chorób, chwastów i szkodników, w porównaniu do monokultury (29).

Głównymi źródłami mineralnych nawozów azotowych stosowanymi w Europie są: saletra amonowa (azotan amonu AN) - zawierająca azot amonowy NH_4^+ i azot azotanowy NO_3^- w równych częściach; saletrzak (azotan wapniowo-amonowy CAN) o składzie zbliżonym do AN, zawiera ponadto dolomit lub wapień; UAN (roztwór mocznikowo-saletrzany) - wodny roztwór mocznika i saletry amonowej; mocznik (U) zawierający azot w postaci amidowej (NH_2)₂ (28). Kompleksowe badania porównujące emisje w zależności od formy nawozów azotowych przeprowadzono w okresie 2003 - 2005 dla brytyjskiego Departamentu Środowiska, Żywności i Spraw Wsi (DEFRA) (35). Testowano użycie różnych form nawozów: saletry amonowej AN (*ammonium nitrate*), mocznika U (*urea*), nawozu mocznikowo-saletrzanego UAN (*urea ammonium nitrate*), nawozu mocznikowo-siarczanowego UAS (*urea ammonium sulphate*) oraz dodatku inhibitora urolizy nBTPT (trójamid kwasu n-butylolio-fosforowego), pod nazwą handlową Agrotain, w dawkach 250/500/1000 mg czynnika aktywnego na kg nawozu (+Ag250, +Ag500, +Ag1000). Na sześciu obiektach doświadczalnych (pszenica ozima – 3 obiekty, użytek zielony – 3 obiekty), mierzono emisje N_2O metodą komorową w zależności od rodzaju zaaplikowanego nawozu. Wyniki prac przedstawia tabela 3.

Tabela 3

Emisja N₂O, wyrażona współczynnikiem EF (% zaaplikowanego N) dla poszczególnych dawek nawozu (N1-N4) - interpolowana na emisję roczną, oraz ważona średnia roczna, dla trzech obiektów upraw pszenicy ozimej (pszenica o.) i trzech obiektów trwałych użytków zielonych (TUZ) w latach 2004 i 2005. Wartości w kolumnach oznaczone różnymi literami różnią się statystycznie (P<0,05).

Wartość N/A oznacza niezastosowanie dawki nawozu.

Obiekt i uprawa	Nawóz	Współczynnik emisji podtlenku azotu w % zaaplikowanego N EF (%)				
		N1	N2	N3	N4	Średnia roczna
Rowden (TUZ)	2004 AN	0,84	1,88	2,1	2,83	2,07 ± 0,64a
	U	0,37	0,73	1,84	4,18	1,97 ± 1,34a
	U+Ag1000	0,02	0,06	0,82	1,36	0,65 ± 0,22a
	U+Ag500	0,11	0,33	1,14	1,21	0,81 ± 0,31a
	UAS	0,19	0,17	1,22	3,09	1,30 ± 0,60a
Crichton (TUZ)	2004 AN	1,02	0,6	0,84	N/A	0,78 ± 0,31a
	U	0,31	0,36	0,61	N/A	0,47 ± 0,29a
	U+Ag1000	0,23	0,22	0,65	N/A	0,42 ± 0,23a
	U+Ag500	0,4	0,91	0,99	N/A	0,85 ± 0,41a
	UAS	0,36	0,53	0,62	N/A	0,54 ± 0,26a
Terrington (pszenica o.)	2004 AN	0,34	0,31	0,65	N/A	0,45 ± 0,09a
	U	0,15	0,54	1,03	N/A	0,67 ± 0,08a
	U+Ag1000	0,26	0,47	1,07	N/A	0,68 ± 0,22a
	UAN	0,3	0,15	1,43	N/A	0,70 ± 0,08a
	UAN+Ag1000	0,2	0,14	0,42	N/A	0,27 ± 0,16a
De Bathe (TUZ)	2005 AN	0,39	1,13	N/A	N/A	0,87 ± 0,25a
	Urea	0,07	0,15	N/A	N/A	0,12 ± 0,02b
	U+Ag500	0,12	0,29	N/A	N/A	0,24 ± 0,03b
	U+Ag500	0,06	0,21	N/A	N/A	0,16 ± 0,01b
	U+Ag250	0,12	0,20	N/A	N/A	0,17 ± 0,01b
Bush (pszenica o.)	2005 AN	0,45	1,01	2,99	N/A	1,72 ± 0,43a
	U	0,49	0,3	2,73	N/A	1,32 ± 0,30ab
	U+Ag500	0,41	0,33	2,33	N/A	1,16 ± 0,22ab
	UAN	0,30	0,52	2,27	N/A	1,19 ± 0,31ab
	UAN+Ag500	0,40	0,51	1,75	N/A	1,00 ± 0,24b

Tabela 3 cd.

Boxworth (pszenica o.)	AN	0,17	0,11	0,38	N/A	0,23 ± 0,19a
	2005 U	0,23	0,38	1,08	N/A	0,60 ± 0,20a
	U+Ag500	0,18	0,41	0,78	N/A	0,49 ± 0,25a
	UAN	0,10	0,46	0,50	N/A	0,39 ± 0,22a
	UAN+Ag500	0,08	0,44	0,37	N/A	0,33 ± 0,10a

Źródło: Smith i in. (35)

Wyniki sugerują, iż nie ma uniwersalnego nawozu (lub mieszanki nawozów) o niskiej emisji N_2O . Emisja podtlenku azotu związana jest z warunkami pogodowymi i właściwościami gleby. I tak na przykład w Rowden (TUZ) nie zanotowano w roku 2004 znaczącej różnicy między nawozami AN i U stosowanymi samodzielnie (EF~2%), przy czym zastosowanie inhibitora urolizy obniżyło emisję do ok. 1/3 (EF~0,7%). Dużo mniejsze emisje zanotowano w Crichton, nie stwierdzając różnic między formami azotu i stosowaniem inhibitora (EF od 0,42%-0,85%). W Terrington (pszenica o.) nie stwierdzono różnic istotnych statystycznie między formami nawozu uzyskując EF w przedziale od 0,27% do 0,70%. Po pierwszej aplikacji nawozu (N1) emisje w Rowden (TUZ) były większe dla AN (0,42 kg N_2O -N ha⁻¹) niż dla U (0,23 kg N_2O -N ha⁻¹) lub UAS (0,16 kg N_2O -N ha⁻¹), przy czym dodanie inhibitora obniżyło emisję do 0,12 i 0,09 kg N_2O -N ha⁻¹ dla odpowiednio U+Ag500 i U+Ag1000. Temperatura gleby wynosiła 3-6°C a WFPS 70-80%. Druga aplikacja nawozu pokazała większe różnice między typami nawozów. Przy temperaturze gleby wynoszącej 8-10°C i WFPS~90% różnice emisji wyrażane jako EF były w zakresie od 0,06% (U+Ag1000) do 1,88% (UAN). Kolejna aplikacja nawozu miała miejsce przy temperaturze gleby 15°C i WFPS~70% przy której zanotowano emisję w przedziale od EF=0,82 % (U+AG1000) do EF=2,1% (AN). W przypadku mocznika i UAN (roztwór mocznikowo-saletrzany) powstają wyższe straty z uwalniania amoniaku niż w przypadku saletry amonowej lub saletrzaka (azotanu wapniowo-amonowego). Straty amoniaku z mocznika można zmniejszać przez wymieszanie go z glebą po wysianiu. Jednak jest to praktycznie możliwe tylko dla upraw jarych. Straty z użytków zielonych są wyższe, gdyż nawozy zazwyczaj rozsiewane są po powierzchni. Stosowanie mocznika powoduje straty N do 58% w formie amoniaku, w zależności od warunków naturalnych. Poza różnicami ilościowymi badania pokazały zmienność wyników zaobserwowanych w przypadku U i UAN. W związku z tym wielkości dodatkowych dawek tych nawozów nie można przewidywać z taką samą pewnością jak w przypadku AN. Plon pszenicy ozimej był niższy o odpowiednio 0,31t ha⁻¹ (UAN) i 0,39t ha⁻¹ (U) w porównaniu z obiektami na których użyto saletry amonowej.

Podsumowanie

Wpływ emisji rolniczych na powstawanie antropogenicznego efektu cieplarnianego jest przedmiotem badań naukowych od lat 70-tych XX wieku (24). Pomiary zarówno laboratoryjne jak i na terenach uprawnych wykazują dużą zmienność emisji N_2O pod wpływem warunków środowiskowych. Wielkość emisji bezpośredniej podtlenku azotu zależy od wilgotności, temperatury, właściwości fizyczno-chemicznych gleby a także sposobu użytkowania. Wydaje się, że najważniejszym czynnikiem wpływającym na emisję N_2O jest wilgotność gleby, ponieważ kontroluje ona aktywność mikrobiologiczną i związane z nią procesy. Bakterie nitryfikacyjne wymagają dostępu tlenu i proces ten osiąga swoje maksimum przy WFPS $\sim 20\%$. Procesy denitryfikacyjne (beztlenowe) przebiegają najszybciej dla WFPS w zakresie 50-80%. Długotrwała susza znacząco obniża emisję podtlenku azotu (zaobserwowano nawet pochłanianie N_2O). Jednakże opad atmosferyczny następujący po suszy powoduje wielokrotne podwyższenie emisji w czasie od kilku minut do kilku godzin i powrót do wcześniejszych wartości po upływie kilku dni. Temperatura gleby jest kolejnym czynnikiem wpływającym na emisję. Wzrost temperatury prowadzi do wyższej emisji, choć może być ona hamowana brakiem wody, potrzebnej mikroorganizmom do przekształcania składników pokarmowych. Emisja podtlenku azotu wzrasta wraz z temperaturą do ok. $37^\circ C$, a wartości współczynnika Q_{10} (wzrost szybkości reakcji przy podwyższeniu temperatury o $10^\circ C$) zmieniają się w zakresie 1,7-9,3. W temperaturze bliskiej $0^\circ C$ (cykle zamarzania/rozmarzania), emisje podtlenku azotu mogą osiągać do 50% emisji rocznych. Wpływ wilgotności i temperatury gleby może wyjaśniać do 86% zmienności emisji podtlenku azotu. W warunkach polowych wpływ wilgotności i temperatury może być trudny do zaobserwowania ze względu na inne czynniki wpływające na emisję, takie jak właściwości gleby (zwłaszcza tekstury) oraz rodzaju nawozu i sposobu nawożenia. W okresie kilku tygodni po aplikacji nawozu, w odpowiednich warunkach (wilgotność, temperatura), może dojść do strat nawet 77% N. Zalecanymi technikami ograniczającymi emisję N_2O z gruntów uprawnych są: dostosowanie wielkości dawek azotu do potrzeb roślin, zmniejszenie lub podział dawek. Związki azotu, stosowane w formie niedostępnej bezpośrednio dla roślin (np. mocznik), zwiększają emisję, zwłaszcza w uproszczonej agrotechnice (gdy zostają wysiane na powierzchni gleby). Stosowanie nawozów zawierających związki o powolnym uwalnianiu oraz stosowanie inhibitorów denitryfikacji może prowadzić do redukcji emisji. Z reguły, emisje zmniejszane są przez wgłębne stosowanie nawozu. Uproszczone praktyki uprawy (RT, NT) muszą być wprowadzane łącznie z wzbogaconym płodozmianem i pozostawianiem resztek poźniwnych, by nie prowadzić do zmniejszenia plonów. Potrzebne są dalsze badania nad emisją podtlenku azotu i innych gazów cieplarnianych, by wyeliminować istniejące niepewności i wprowadzić bardziej efektywne techniki uprawy, które jednocześnie będą przyjazne dla klimatu.

Literatura

1. Brentrup F., Kusters J., Lammel J., Kuhlmann H.: Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *The Int. J. Life Cycle Ass.*, 2000, **5(6)**: 349-357.
2. Chatskikh D., Olesen J.E., Hansen E. M., Elsgaard L., Petersen B. M. : Effects of reduced tillage on net greenhouse gas fluxes from loamy sand soil under winter crops in Denmark. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2008, **128(1)**: 117-126.
3. Dobbie K.E., McTaggart I.P., Smith K.A.: Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. *J. Geoph. Res.*, 1999, **104 (D21)**: 26891-26899.
4. Dobbie K.E., Smith K.A.: Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology*, 2003, **9(2)**: 204-218.
5. Fertilizers Europe (Europejska Organizacja Producentów Nawozów) http://www.danfertilizers.eu/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1468913359&hash=e96d11cac68d33e06a3dbfdba5d1f5eb6ae2369d&file=fileadmin/user_upload/documents/DAN_website/Smart_Agriculture-PL_V3.pdf - dostęp online 18.07.2016.
6. Flessa H., P., Dorsch F., Beese F.: Seasonal variation of N₂O and CH₄ fluxes in differently managed arable soils in southern Germany. *J. Geoph. Res.: Atmospheres*, 1995, **100(D11)**: 23115-23124.
7. Giltrap D.L., Li C., Saggar S.: DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2010, **136 (3)**: 292-300.
8. <https://www.apsim.info/Documentation/Model,CropandSoil/SoilModulesDocumentation/SoilN.aspx> -dostęp online 18.07.2016.
9. International Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2007—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, 2007.
10. Kessel C., Venterea R., Six J., Adviento-Borbe M.A., Linquist B., Groenigen K. J.: Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2013, **19(1)**: 33-44.
11. Kim D.G., Vargas R., Bond-Lamberty B., Turetsky M. R.: Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: a review of current literature and suggestions for future research. *Biogeosciences*, 2012, **9(7)**: 2459-2483.
12. Kołasa-Więcek A.: Modelowanie emisji podtlenku azotu ze źródeł rolniczych z wykorzystaniem regresji liniowej. *J. Res. App. Agric. Eng.*, 2013, **58(1)**: 86-89.
13. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE). Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2014. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2012, KOBiZE, 2014.
14. Koponen H.T., Flojt L., Martikainen P.J.: Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures: a laboratory microcosm study, *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36(5)**: 757-766.
15. Laville P., Lehuger S., Loubet B., Chaumartin F., Cellier P.: Effect of management, climate and soil conditions on N₂O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements. *Agric. Forest Meteorol.*, 2011, **151(2)**: 228-240.
16. Lesschen J.P., Velthof G.L., Wim de Vries, Kros J.: Differentiation of nitrous oxide emission factors for agricultural soils. *Environ. Pollut.*, 2011, **159**: 3215-3222.
17. Li C.: Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutr. Cycl. Agroeco.*, 2000, **58**: 259-327.

18. Liu X.J., Mosier A.R., Halvorson A.D., Zhang F.S.: The impact of nitrogen placement and tillage on NO , N_2O , CH_4 and CO_2 fluxes from a clay loam soil. *Plant and soil*, 2006, **280**(1-2): 177-188.
19. Maag M., Vinther F., P.: Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *App. Soil Ecol.*, 1996, **4**(1): 5-14.
20. Mercik S., Moskal S.: Ocena emisji podtlenku azotu (N_2O) w Polsce z rolnictwa w 1999 roku. *Nawozy i Nawożenie*, IUNG, 2002, **4**(1(10)).
21. Molina-Herrera S., Hass E., Klatt S., Kraus D.: A modeling study on mitigation of N_2O emissions and NO_3 leaching at different agricultural sites across Europe using LandscapeDNDC. *Sci. Total Environ.*, 2016, **553**: 128-140.
22. 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.
23. Muñoz C., Sagar S., Berben P., Giltrap D., Jha N.: Influence of waiting time after insertion of base chamber into soil on produced greenhouse gas fluxes. *Chil. J. Agric. Res.*, 2011, **71**(4): 610.
24. Oertel C., Matschullat J., Zurba K., Zimmermann F., Erasmi S.: Greenhouse gas emissions from soils - A review. *Chemie Erde – Geochemistry*, 2016.
25. Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Wagner F.: Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, 2003.
26. Pittelkow C.M., Liang X., Linnquist B.A., Van Groenigen K.J., Lee J.: Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 2015, **517**(7534): 365-368.
27. Powlson D. S., Stirling C. M., Thierfelder C., White R. P., Jat M.L.: Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agroecosystems? *Agr. Ecosys. Environ.*, 2016, **220**: 164-174.
28. Rapson T.D., Dacres H.: Analytical techniques for measuring nitrous oxide. *Trac-Trend. Anal. Chem.*, 2014, **54**: 65-74.
29. Reckling M., Hecker J.M., Bergkvist G., Watson C.A., Zander P., Schlafke N.: A cropping system assessment framework-evaluating effects of introducing legumes into crop rotations. *Eur. J. Agron.*, 2016, **76**: 186-197.
30. Rochette P.: No-till only increases N_2O emissions in poorly-aerated soils. *Soil Till. Res.*, 2008, **101**(1): 97-100.
31. Rochette P., Eriksen-Hamel N.: Chamber measurements of soil nitrous oxide flux: are absolute values reliable? *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2008, **72**(2): 331-342.
32. Sapek A.: Emisja tlenków azotu (NO_x) z gleb uprawnych i ekosystemów naturalnych do atmosfery. *Woda-Środowisko-Obszary wiejskie*, 2008, **8**: 283-304.
33. Signor D., Pellegrino C.E.: Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 2013, **43**(3): 322-338.
34. Six J., Ogle S.M., Breidt F.J., Conant R.T., Mosier A.R., Paustian K.: The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. *Global Change Biol.*, 2004, **10**: 155-160.
35. Smith K., Dobbie K.: WP2 The effect of N fertiliser forms on nitrous oxide emissions. Component report for DEFRA Project NT2605 (CSA 6579), 2006.
36. Sprawozdanie Komisji Europejskiej. Sprawozdanie komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady Europy na temat wykonalności sporządzenia wykazów obszarów w państwach trzecich o niskim poziomie emisji gazów cieplarnianych z upraw rolnych, 2010, KOM(2010) 427 - dostęp online dnia 17-05-2016 <http://eurlex.europa.eu/legalcontent/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010DC04:from=PL>.
37. Stehfest E., Bouwman A.: N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modelling of global annual emissions. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2006, **74**(3): 207-288.

-
38. Vogeler I., Giltrap D., Cichota R.: Comparison of APSIM and DNDC simulations of nitrogen transformations and N₂O emissions; Sci. Total Environ., 2013, **465**: 147-155
39. Zaliwski A.S.: Oszacowanie emisji podtlenku azotu i metanu z rolnictwa w przekroju województwa za lata 1999-2004, Studia i raporty IUNG-PIB, 2007, **5**: 25-48.
-

Adres do korespondencji:

mgr Tomasz Żyłowski
Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 4786898
e-mail: tylowski@iung.pulawy.pl

W serii wydawniczej „RAPORTY PIB”, a od 2007 r. „STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB” ukazały się następujące pozycje:

1. *Wybrane aspekty agrochemicznych badań gleby*. Puławy, 2006.
2. *Zasady wprowadzania nawozów do obrotu*. Puławy, 2006.
3. *Regionalne zróżnicowanie produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2006.
4. *Monitoring skutków środowiskowych planu rozwoju obszarów wiejskich*. Puławy, 2007.
5. *Sprawdzenie przydatności wskaźników do oceny zrównoważonego gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach i województwach*. Puławy, 2007.
6. *Możliwości rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2007.
7. *Współczesne uwarunkowania organizacji produkcji w gospodarstwach rolniczych*. Puławy, 2007.
8. *Efektywne i bezpieczne metody regulacji zachwaszczenia, nawożenia i uprawy roli*. Puławy, 2007.
9. *Wybrane elementy technologii produkcji roślinnej*. Puławy, 2007.
10. *Problem erozji gleb w procesie przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2008.
11. *Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce*. Puławy, 2008.
12. *Wybrane zagadnienia systemów informacji przestrzennej i obszarów problemowych rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2008.
13. *Tworzenie postępu biologicznego w hodowli tytoniu i chmielu*. Puławy, 2008.
14. *Kierunki zmian w produkcji roślinnej w Polsce do roku 2020*. Puławy, 2009.
15. *Wybrane elementy regionalnego zróżnicowania rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2009.
16. *Systemy wspomagania decyzji w zrównoważonej produkcji roślinnej*. Puławy, 2009.
17. *Stan i kierunki zmian w produkcji rolniczej (wybrane zagadnienia)*. Puławy, 2009.
18. *Produkcyjne i środowiskowe aspekty współczesnych metod nawożenia i regulacji zachwaszczenia*. Puławy, 2009.
19. *Oddziaływanie rolnictwa na środowisko przyrodnicze w warunkach zmian klimatu*. Puławy, 2010.
20. *Ocena zrównoważenia gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach, powiatach i województwach*. Puławy, 2010.
21. *Możliwości rozwoju obszarów problemowych rolnictwa (OPR) w świetle PROW 2007–2013*. Puławy, 2010.
22. *Możliwości rozwoju gospodarstw o różnych kierunkach produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2010.
23. *Związki fitogeniczne jako naturalna alternatywa antybiotykowych promotorów wzrostu*. Puławy, 2010.
24. *Wybrane aspekty przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2010.
25. *Stan obecny i perspektywy nawożenia roślin w Polsce w aspekcie regulacji prawnych*. Puławy, 2010.
26. *Stan obecny i perspektywy rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2010.
- 27(1). *Środowiskowe skutki działalności rolniczej i wdrażania PROW na obszarach problemowych rolnictwa*. Puławy, 2011.

- 28(2). *Techniki i technologie stosowane w produkcji roślinnej a środowisko przyrodnicze*. Puławy, 2012.
- 29(3). *Problemy zrównoważonego gospodarowania w produkcji rolniczej*. Puławy, 2012.
- 30(4). *Doskonalenie integrowanych technologii produkcji zbóż jarych i roślin pastewnych ze szczególnym uwzględnieniem początkowych elementów agrotechniki*. Puławy, 2012.
- 31(5). *Rola badań naukowych w kształtowaniu postępu w produkcji chmielu i tytoniu*. Puławy, 2012.
- 32(6). *Wybrane aspekty zrównoważonego rozwoju i specjalizacji gospodarstw rolniczych*. Puławy, 2013
- 33(7). *Działalność Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa-PIB w Puławach w zakresie wspierania doradztwa i praktyki rolniczej*. Puławy, 2013.
- 34(8). *Problemy gospodarki nawozowej w Polsce*. Puławy, 2013.
- 35(9). *Zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania gleb użytkowanych rolniczo – wybrane zagadnienia*. Puławy, 2013.
- 36(10). *Zmiany w technologiach produkcji roślinnej – oceny i wpływ na środowisko rolnicze*. Puławy, 2014.
- 37(11). *Dobre praktyki w nawożeniu*. Puławy, 2014.
- 38(12). *Jakość informacji w systemach wspomagania decyzji*. Puławy, 2014.
- 39(13). *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii pochodzenia rolniczego i ich wpływ na środowisko*. Puławy, 2014.
- 40(14). *Wybrane problemy rolnictwa polskiego z uwzględnieniem stanu jego zrównoważenia*. Puławy, 2014.
- 41(15). *Technologie produkcji zbóż i roślin pastewnych warunkujące wysoki plon i dobrą jakość*. Puławy, 2014.
- 42(16). *Podstawy nowoczesnego doradztwa nawozowego w Polsce*. Puławy, 2015.
- 43(17). *Wybrane problemy produkcji rolniczej z uwzględnieniem aspektu dóbr publicznych*. Puławy, 2015.
- 44(18). *Wybrane zagadnienia produkcji roślinnej w Polsce*. Puławy, 2015.
- 45(19). *Kształtowanie żyzności gleby*. Puławy, 2015.
- 46(20). *Wybrane zagadnienia związane z ochroną gleb przed degradacją*. Puławy, 2015.
- 47(1). *Problemy produkcji rolniczej w Polsce w kontekście ich oddziaływania na środowisko*. Puławy, 2016.
- 48(2). *Innowacje w nawożeniu*. Puławy, 2016
- 49(3). *Siedliskowe i agrotechniczne uwarunkowania produkcji roślinnej w Polsce*. Puławy, 2016

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

W serii wydawniczej „STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB” publikowane są recenzowane prace z zakresu agronomii oraz ochrony i kształtowania środowiska rolniczego, wykonane w ramach zadań programów wieloletnich pn. „Kształtowanie środowiska rolniczego Polski oraz zrównoważony rozwój produkcji rolniczej” (2005-2010) oraz „Wspieranie działań w zakresie kształtowania środowiska rolniczego i zrównoważonego rozwoju produkcji rolniczej w Polsce” (2011-2015). W zeszytach problemowych o charakterze monografii, wydawanych w ramach tej serii, mogą być zamieszczane również prace autorów spoza IUNG-PIB, które merytorycznie mieszczą się w tematyce zadań programu wieloletniego. **Publikowane są prace problemowe, głównie mające charakter przeglądowy, z podkreśleniem znaczenia omawianych zagadnień dla rolnictwa polskiego.**

Wydruk tekstu do recenzji:

czcionka 12 p., z odstępem 1,5-wierszowym.

Przygotowanie do druku:

- tekst i tabele w programie Word, wersja 6.0 lub wyższa
- czcionka – Times New Roman
- układ pracy: słowa kluczowe, wstęp, wyniki i dyskusja bądź omówienie wyników, podsumowanie lub wnioski, literatura

tekst

- czcionka – 11 p. (spis pozycji literatury – 9 p.)
- wcięcie akapitowe – 0,5 cm

tabele

- podział na wiersze i kolumny (z funkcji tworzenia tabel)
- szerokość dokładnie 13 cm (tabele w pionie) lub 19 cm (tabele w poziomie)
- czcionka 9 p., pojedyncze odstępy międzywierszowe
- pod tabelą przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

rysunki

- czarno-białe
- wykresy w programie Word lub Excel
- wymiary w zakresie 13 cm × 19 cm
- w podpisach czcionka 9 p.
- na płycie lub innym nośniku w oddzielnych plikach
- pod rysunkiem przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

jednostki miary

- system SI
- jednostki zapisywać potęgowo (np. t·ha⁻¹)

literatura

- spis literatury na końcu pracy w układzie alfabetycznym wg nazwisk autorów, w kolejności: nazwisko (pismo rozstrzelone), pierwsza litera imienia, tytuł pracy, miejsce publikacji: tytuł wydawnictwa (wg ogólnie przyjętych skrótów tytułów czasopism), rok, numer (pismo pogrubione), strony,
- cytowanie w tekście – jako numer pozycji ze spisu literatury (w nawiasach okrągłych) lub dodatkowo z nazwiskiem autora (pismo rozstrzelone).

Pracę do recenzji należy złożyć w 1 egzemplarzu. Po recenzji oryginalny egzemplarz recenzowany złożyć/przesłać do Redakcji, a ostateczną wersję pracy, uwzględniającą uwagi recenzenta i redaktora, przesłać e-mailem.

Dane kontaktowe:

mgr Ewa Decka-Cywińska

Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB

ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy

e-mail: edeka@iung.pulawy.pl