

Jerzy Kozyra

WPLYW PROGNOZOWANYCH
ZMIAN TEMPERATURY
POWIETRZA NA FENOLOGIĘ
ZBÓŻ OZIMYCH W POLSCE

Rozprawa habilitacyjna

MONOGRAFIE
I ROZPRAWY
NAUKOWE

40

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND PLANT CULTIVATION
STATE RESEARCH INSTITUTE

Dyrektor: *prof. dr hab. Wiesław Oleszek*

Redaktor: *prof. dr hab. Janusz Podleśny*

Recenzent: *prof. dr hab. Marian Rojek*

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Katarzyna Mikulska*

Praca jest wynikiem realizacji następujących projektów:

1. Projekt KLIMAT „Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo (zmiany, skutki i sposoby ich ograniczania, wnioski dla nauki, praktyki inżynierskiej i planowania gospodarczego)”, I Oś Priorytetowa Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, działanie 1.3.1, projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, kierowany przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie.
2. Projekt KLIMADA „Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu” kierowany przez Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie na zamówienie Ministra Środowiska i finansowany przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

ISBN 978-83-7562-143-3

Nakład 150 egz., B-5, zam. 43/E/13
Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB w Puławach
tel. (81) 8863421 w. 301 i 307; fax (81) 8863421 w. 302
e-mail: duw@pulawy.pl; <http://www.iung.pulawy.pl>

Jerzy Kozyra

WPŁYW PROGNOZOWANYCH ZMIAN TEMPERATURY POWIETRZA
NA FENOLOGIĘ ZBÓŻ OZIMYCH W POLSCE

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP I CEL BADAŃ.....	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY.....	9
2.1. MODELE FENOLOGICZNE	9
2.2. ROZWÓJ ROŚLIN A GLOBALNE OCIEPLENIE.....	12
3. MATERIAŁ I METODY	14
3.1. DANE FENOLOGICZNE.....	14
3.2. DANE METEOROLOGICZNE.....	15
3.3. SCENARIUSZE KLIMATYCZNE.....	16
3.4. TENDENCJE POJAWÓW FENOLOGICZNYCH.....	17
3.5. OPIS WYMAGAŃ TERMICZNYCH	18
3.6. OPRACOWANIE DANYCH METEOROLOGICZNYCH.....	19
3.7. OPRACOWANIE SCENARIUSZY KLIMATYCZNYCH	23
4. WYNIKI.....	24
4.1. FENOLOGIA ZBÓŻ OZIMYCH W LATACH 1990–2011.....	24
4.1.1. Siew – wschody	24
4.1.2. Wiosenne wznowienie wegetacji – kłoszenie.....	25
4.1.3. Dojrzałość woskowa.....	26
4.2. MODELE FENOLOGICZNE	31
4.2.1. Temperatura efektywna	31
4.2.2. Efekt fotoperiodyczny	33
4.3. SCENARIUSZE ZMIAN W FENOLOGII	38
4.3.1. Zmiana warunków termicznych	38
4.3.2. Zmiana terminu wznowienia wegetacji.....	42
4.3.3. Zmiana wymagań cieplnych.....	46
4.3.4. Zmiana terminów fenofaz.....	54
5. DYSKUSJA.....	70
5.1. OBSERWOWANE ZMIANY W FENOLOGII.....	70
5.2. PROGNOZOWANE ZMIANY W FENOLOGII	75
5.3. KONSTRUKCJA MODELI FENOLOGICZNYCH.....	76
5.4. ZNACZENIE ZMIAN W FENOLOGII DLA ROLNICTWA.....	78
6. WNIOSKI	80

7. ANEKS	82
8. LITERATURA	102
STRESZCZENIE/SUMMARY	111

1. WSTĘP I CEL BADAŃ

Problem globalnych zmian klimatu nadał duże znaczenie badaniom fenologicznym. Wobec prognoz wzrostu temperatury atmosfery w XXI w. (Alcamo i in. 2007), szereg proponowanych działań adaptacyjnych w rolnictwie wynika z prognozowanych zmian w fenologii i dotyczy dostosowania terminów prac polowych do warunków rozwoju roślin oraz selekcji odmian roślin uprawnych odpowiednich do warunków nowego klimatu (Bis i in. 1993, Stuczyński i in. 2000, Sadowski i in. 2009, Leśny i in. 2010, Kundzewicz i Kozyra 2011). Główne wskazanie dotyczące kierunków adaptacji w tym zakresie stanowią analizy z wykorzystaniem modeli fenologicznych i scenariuszy klimatycznych (Olesen i in. 2011). Fenologia roślin uprawnych jest istotna na etapie szacowania poziomu plonowania w warunkach scenariuszy klimatycznych (Bis i in. 1993, Górski i in. 1999, Chmielewski i in. 2004, Lobell i in. 2010, Trnka i in. 2011), a następnie przy ocenie globalnego bezpieczeństwa żywnościowego (Long i in. 2005, Lobell i in. 2008, Godfray i in. 2010). Zmiany w fenologii są uwzględniane w raportach Miedzyrządowego Panelu do Spraw Zmian Klimatu (IPCC) (Parry i in. 2007) oraz raportach Europejskiej Agencji Środowiska (EEA 2012).

Badania dotyczące fenologii koncentrują się głównie na szacowaniu wpływu obserwowanego wzrostu temperatury atmosfery na terminy pojawów fenologicznych oraz budowaniu modeli matematycznych do oceny wpływu zmian klimatu na świat roślin i zwierząt (Chuine i Beaubien 2001, Cleland i in. 2007, Harrington i in. 2007, Craufurd i Wheeler 2009). Szczególnie przydatne w tych pracach są wyniki wieloletnich doświadczeń polowych i prace eksperymentalne z zakresu modelowania rozwoju roślin w różnych warunkach środowiskowych (Mirschel i in. 2005, Porter i Semenov 2005).

Ważnym zagadnieniem związanym z adaptacją wobec zmian klimatu jest reakcja poszczególnych gatunków na obserwowany w XX i na początku XXI w. wzrost temperatury (Craufurd i Wheeler 2009). Średnia temperatura powietrza w Polsce wzrasta w ostatnich latach o 0,3°C na dekadę (Górski i Kozyra 2011), a w Europie wzrost ten szacowany jest na 0,4°C (Alcamo i in. 2007). Do 2050 r. średnia roczna temperatura powietrza w Europie ma wzrosnąć względem lat 1961–1990 od 1,5 do 3°C (van der Linden i Mitchell 2009). W niniejszej pracy podjęto próbę opisu fenologii trzech zbóż ozimych uprawianych w Polsce w latach 1990–2011. Opracowanie nawiązuje do wcześniejszych badań związanych z oceną uwarunkowań rozwoju tych roślin w Polsce (Deputat i in. 1996, Deputat i Marcinkowska 1999a i 1999b) oraz opracowań kartograficznych dotyczących ich fenologii (Korpalska-Chabior 2001, Koźmiński 2001, Michalska 2001).

W pracy podjęto próbę odpowiedzi na pytanie: czy modele rozwoju roślin opracowane dla danych obserwacyjnych pochodzących sprzed 1990 r. (Deputat i in. 1996, Deputat i Marcinkowska 1999a i 1999b) są aktualne. Podobne prace, związane z weryfikacją modeli wykorzystywanych w prognozowaniu wpływu zmian klimatu na rolnictwo, są obecnie prowadzone w ramach projektu AgMIP

(Rosenzweig i in. 2013). W skali europejskiej porównanie wyników modeli i przegląd zaimplementowanych w tych modelach algorytmów wykonano w ramach projektu COST 734 (Rötter i in. 2012), a obecnie prace te są kontynuowane w ramach projektu MACSUR (www.macsur.eu).

Wykonane analizy dotyczące fenologii zbóż ozimych w Polsce zostały przeprowadzone dla scenariuszy klimatycznych opracowanych w Regionalnych Modelach Klimatu (RCM). Większość wcześniejszych prac dotyczących analiz fenologicznych wykonywana była dla danych scenariuszowych pochodzących z Modeli Globalnej Cyrkulacji (GCM) (Bis i in. 1993, Deputat 1999, Kożuchowski i in. 2000, Kozyra i Górski 2004, Dragańska i in. 2008). Obecnie coraz częściej w analizach wykorzystuje się scenariusze RCM (Fronzek i Carter 2007, Calanca i in. 2008, Sadowski i in. 2009). Scenariusze te charakteryzują się większą niż scenariusze GCM rozdzielczością przestrzenną, która wynosi od 25 do 50 km oraz dobową rozdzielczością czasową (Halenka i in. 2012). Uzyskiwana rozdzielczość przestrzenna i czasowa scenariuszy RCM umożliwia wykonanie analiz fenologicznych w skali regionalnej bez konieczności korzystania z generatorów danych meteorologicznych (Kuchar 2005, Trnka i in. 2011). W ostatnich latach scenariusze RCM dla obszaru Europy były szczegółowo analizowane w ramach projektów PRUDENCE (Christensen i in. 2007) i ENSEMBLES (Christensen i in. 2010), a wyniki najnowszych symulacji są udostępnione na stronie internetowej projektu ENSEMBLES (van der Linden i Mitchell 2009). W ramach prac związanych z przygotowaniem Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów wrażliwych na zmiany klimatu w Polsce (projekt KLIMADA), z baz danych ENSEMBLES zostały wydodrębnione i udostępnione scenariusze RCM dla obszaru Polski (Liszewska i in. 2011). Podkreśla się jednak, że stosowane w RCM różne metody parametryzacji procesów atmosferycznych skutkują różnicami w opisie poszczególnych elementów klimatycznych (Maslim i Austin 2012). W konsekwencji wykonanie analiz dla większej liczby scenariuszy RCM wprowadza dodatkowy element niepewności w postaci dużego rozrzutu wyników (Olesen i in. 2007, Oettli i in. 2011). Najczęściej stosowanym rozwiązaniem w tym przypadku jest uśrednienie uzyskanych wyników z kilku scenariuszy RCM lub wybór najlepiej sparametryzowanego modelu dla danego regionu (Szwed i in. 2010).

Uwzględnione w pracy rośliny uprawne, szczególnie pszenica ozima, stanowią o potencjale produkcyjnym polskiego rolnictwa. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS 2011), w 2011 r. analizowane uprawy zajmowały ok. 3 mln ha, co stanowi 39% zasiewów zbóż ogółem w Polsce. Uprawy pszenicy ozimej stanowiły 1931 tys. ha, żyta ozimego – 1085 tys. ha, a jęczmienia ozimego – 230 tys. ha. Areal uprawy pszenicy ozimej utrzymywał się w ostatnim dziesięcioleciu w Polsce na wyrównanym poziomie, żyta ozimego – zmniejszył się w stosunku do 2000 r. o 50%, natomiast jęczmienia ozimego – wzrósł o 68%. Warunki klimatyczne do uprawy pszenicy ozimej i żyta ozimego w Polsce są mało zróżnicowane regionalnie, przy obserwowanej znacznej wieloletniej zmienności plonowania (Górski i in. 1999). Właściwy dobór odmian w przypadku tych upraw po-

zwala na ograniczenie wpływu zmienności klimatycznej na obniżkę ich plonowania (Grabiński i in. 2007a, Podolska i Hołubowicz-Kliza 2009). Natomiast uprawa jęczmienia ozimego była dotychczas ograniczona we wschodniej i północno-wschodniej Polsce z powodu słabego zimowania (Czarnecka 1998, Noworolnik 1999). Wyniki przeprowadzonej w pracy analizy mogą stanowić wskazania dla działań strategii adaptacyjnej polskiego rolnictwa do obserwowanych i prognozowanych zmian klimatu (Kozyra i in. 2010).

Celem niniejszej pracy jest ocena tendencji zmian w fenologii pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego w Polsce w latach 1990–2011, budowa modeli fenologicznych na podstawie danych obserwacyjnych z wielolecia 1990–2011 oraz analiza wpływu zmian cyklu rocznego temperatury według Regionalnych Modeli Klimatu w XXI w. na fenologię zbóż ozimych w Polsce.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. MODELE FENOLOGICZNE

Pojawianie się kolejnych faz rozwojowych roślin może być prognozowane z wykorzystaniem tzw. modeli rozwoju roślin nazywanych modelami fenologicznymi. Określa się w nich funkcję prędkości rozwoju roślin (ang. rate of development), która jest definiowana jako odwrotność długości okresu pomiędzy kolejnymi fazami rozwojowymi (Porter i Semenov 2005).

Wyróżnia się trzy główne typy modeli fenologicznych roślin: teoretyczny, statystyczny i mechanistyczny. Modele teoretyczne prezentują gospodarkę energetyczną rośliny i procesy optymalizujące pojawianie się kolejnych faz rozwojowych. Modele statystyczne opisują empiryczne relacje terminów obserwowanych faz fenologicznych z czynnikami wpływającymi na rozwój roślin. Modele mechanistyczne charakteryzują prędkość rozwoju poprzez ilościowe szacowanie wpływu różnych czynników środowiskowych na rozwój roślin (Cleland i in. 2007). W prognozowaniu pojawów fenologicznych upraw znalazły zastosowanie modele statystyczne i mechanistyczne. Modele fenologiczne stanowią jeden z komponentów modeli wzrostu i rozwoju roślin (van Ittersum i in. 2003, Kuchar i in. 2004), ale również istnieją jako samodzielne narzędzia wykorzystywane w pracach dotyczących oceny warunków agroklimatycznych (Deputat i in. 1996, Kalbarczyk 2005). Obecnie modele fenologiczne są bardzo często wykorzystywane w pracach związanych z oceną wpływu zmian klimatu na rolnictwo (Olesen i Bindi 2002, Kalbarczyk i in. 2011, Siebert i Ewert 2012).

W modelach fenologicznych określa się kilka podstawowych wskaźników oraz ich relacje do prędkości rozwoju roślin, tj. temperaturę efektywną (T_e), temperaturę optymalną (T_o) oraz temperaturę maksymalną ($T_{maks.}$). Uwzględnia się również wpływ na prędkość rozwoju roślin takich czynników, jak: efekt fotoperiodyczny,

efekt jarowizacji, stres suszy i natężenie promieniowania. Jednostką wyznaczającą osiąganie kolejnych faz rozwojowych roślin jest suma temperatury efektywnej określana również jako suma jednostek ciepła czy suma stopniodni ($^{\circ}\text{C}_d$) (Craufurd i Wheeler 2009).

Koncepcja jednostek ciepła i czasu termicznego jako miernika tempa rozwoju roślin została wprowadzona w 1735 r. przez Reaumura, który wykazał, że każdemu międzyfazowemu okresowi rozwoju rośliny odpowiada stała suma temperatur dobowych (za Górski i Jakubczak 1965). W dalszych badaniach dotyczących określenia czynników rozwoju stwierdzono, że dużo dokładniej można wyznaczyć sumę temperatur potrzebną do przejścia rośliny w kolejną fazę rozwojową (temperaturę efektywną) po odjęciu od wartości średniej dobowej temperatury powietrza tzw. progu termicznego, poniżej którego roślina nie rozwija się lub rozwija się bardzo powoli (Yang i in. 1995).

Temperatura efektywna (T_e) jest definiowana jako różnica zmierzonej temperatury powietrza i progu termicznego, który może mieć znaczenie fizjologiczne lub statystyczne. W znaczeniu statystycznym optymalnie oszacowany próg temperatury efektywnej minimalizuje błąd prognozy terminów faz fenologicznych (Yang i in. 1995). Wybór metody szacowania progu termicznego powinien być uzależniony od celu analizy. W pracach związanych z prognozowaniem terminów faz fenologicznych roślin, kiedy oczekuje się zminimalizowania błędu prognozy, próg termiczny szacowany jest za pomocą metody, w której uzyskuje się brak korelacji pomiędzy sumą temperatury a długością okresu pomiędzy fenofazami (Górski i Jazurek 1996). Progi T_e przyjmują zróżnicowane wartości dla różnych upraw, jak i dla różnych okresów rozwoju rośliny. Na przykład próg T_e dla pszenicy ozimej przyjmuje wartości od -9 do 13°C (Porter i Gawith 1999). Modele fenologiczne opracowane dla pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego w Polsce różnicują progi temperatury efektywnej w poszczególnych fazach rozwojowych od 1 do 10°C (Deputat i in. 1996, Deputat i Marcinkowska 1997 i 1999b).

Należy podkreślić, że w modelach fenologicznych funkcjonują różne metody sumowania temperatury efektywnej (McMaster i Wilhelm 1997). Suma dobową T_e może być określana np. od stałej daty (np. 1 marca) przy eliminowaniu dni o temperaturze poniżej progu termicznego, co daje równie ściśle wyniki jak sumowanie od zmiennej daty przejścia temperatury przez określony próg (Górski i Jakubczak 1965). Niektóre modele fenologiczne w przypadku wystąpienia po wznowieniu wegetacji temperatury poniżej progu termicznego przyjmują dla tego dnia wartość temperatury bazowej, natomiast inne – wartość zero (McMaster i Wilhelm 1997). W modelach fenologicznych zbudowanych dla danych godzinowych suma temperatury efektywnej jest obliczana z wykorzystaniem metod umożliwiających aproksymację wartości godzinowych (Cesaraccio i in. 2001, Juszczak i in. 2008). Różne metody określania progu T_e i jej sumowania utrudniają bezpośrednie porównanie wyników szacowania wymagań cieplnych upraw i posługiwanie się tzw. jednostkami ciepła (ang. heat units) (Bonhomme 2000).

Wartości temperatury optymalnej (T_o) i maksymalnej ($T_{maks.}$) wyznaczają zakres temperatury, w którym funkcja prędkości rozwoju roślin względem temperatury przyjmuje postać liniową. Temperatura optymalna dla rozwoju roślin kształtuje się dla większości gatunków w zakresie od 23 do 30°C, przy czym niższa wartość charakteryzuje wymagania np. pszenicy, a wyższa – roślin ciepłolubnych, np. kukurydzy. W klimacie umiarkowanym temperatura maksymalna, czyli wartość 30°C, jest bardzo rzadko przekraczana. Z tego względu wskaźnik ten jest zazwyczaj pomijany w modelach rozwoju roślin stosowanych w Europie, bez wpływu na precyzję prognoz terminów faz rozwojowych (Olesen i in. 2012).

Do czynników środowiskowych decydujących o wymaganiach cieplnych zbóż ozimych, zalicza się również oddziaływanie niskiej temperatury jesienią i zimą (jarowizacja) oraz długość dnia wiosną (fotoperiod) (González i in. 2002).

W matematycznym opisie wymagań jarowizacji, czyli pobudzania roślin do kwitnienia poprzez oddziaływanie niskich temperatur, zakłada się najczęściej kilka warunków empirycznych. W przypadku pszenicy jarowizacja następuje w zakresie temperatury od 3 do 10°C (T_{o1} , T_{o2}), a kończy się poniżej –4°C ($T_{min.}$) i powyżej 17°C ($T_{maks.}$) (Kirby i in. 1999).

W modelach fenologicznych efekt fotoperiodyczny modyfikuje zazwyczaj wymagania cieplne roślin w okresie od wznowienia wegetacji do kłoszenia (Tao i in. 2012) i jest na przykład wprowadzany jako współczynnik (α) przy określaniu sumy temperatury efektywnej (Olesen i in. 2002):

$$S = \sum (T_i - T_b) \alpha$$

$$\alpha = \min. \left[1, \frac{(\gamma - 7)}{13} \right]$$

gdzie:

S – suma stopniodni (°C_d); sumowane są tylko wartości dodatnie;

T_i – średnia dobową temperaturę powietrza (°C);

T_b – próg termiczny temperatury efektywnej (°C);

γ – długość dnia (godz.).

W modelach fenologicznych zbóż ozimych opracowanych w Polsce efekt fotoperiodyczny był uwzględniany na etapie szacowania funkcji prędkości rozwoju, jako funkcja łącznego działania temperatury efektywnej i długości 20. dnia po wznowieniu wegetacji wiosną (Deputat i in. 1996, Deputat i Marcinkowska 1999a i 1999b).

W opracowaniach fenologicznych wykorzystane są również informacje pochodzące ze zdjęć satelitarnych (Myneni i in. 1997, Zhang i in. 2003). Wskazuje się, że połączenie metod modelowania rozwoju roślin z obserwacjami satelitarnymi pomaga w ustalaniu terminu wiosennego wznowienia wegetacji roślin, który jest bardzo subiektywnie określany przez obserwatorów (Badeck i in. 2004). Inną zaletą

wykorzystania zdjęć satelitarnych w monitoringu wegetacji jest możliwość ustalenia rzeczywistego zróżnicowania przestrzennego wegetacji wywołwanego przez osobliwości obszarowe, np. przez „miejską wyspę ciepła” (Fisher i in. 2006).

2.2. ROZWÓJ ROŚLIN A GLOBALNE OCIEPLENIE

Modele fenologiczne znalazły zastosowanie nie tylko w pracach związanych z prognozowaniem pojawów fenologicznych w warunkach scenariuszy klimatycznych w XXI w. (Cleland i in. 2007), ale również przy rekonstrukcji pojawów fenologicznych w warunkach klimatu przeszłego (Keatley i in. 2002, Chuine i in. 2004).

Obserwowane w XX w. i na początku XXI w. ocieplenie globalne atmosfery przyspieszyło pojawy fenologiczne wiosną, zwłaszcza roślin dzikorosnących i drzew owocowych (Demidowicz i in. 2001, Chmielewski i Rotzer 2002 i 2001, Menzel i in. 2006c, Tryjanowski i in. 2006). W mniejszym stopniu sygnalizuje się zmiany terminów pojawów fenologicznych jednorocznych roślin uprawnych, których rozwój zależy również od terminów agrotechnicznych (Menzel i in. 2006a).

Globalne analizy pojawów fenologicznych roślin dzikorosnących wykazały, że przyspieszenie wiosennych faz rozwojowych wynosi średnio 2,3 dnia na dekadę (Parmesan i Yohe 2003). W Europie od 1971 r. następuje przyspieszenie wiosennych pojawów fenologicznych w tempie o 2,5 dnia na dekadę (Menzel i in. 2006b). Zaobserwowano jednocześnie coraz większą zmienność terminów wiosennych faz rozwojowych roślin (Scheifinger i in. 2003). Wraz ze wcześniejszymi fazami fenologicznymi na wiosnę zauważa się trend przyspieszania późnych przymrozków wiosennych, jednak trend ten jest mniejszy i wynosi 1,5 dnia na dekadę, co stwarza zagrożenie związane z przymrozkami (Schwartz i in. 2006). Większe zmiany w terminach pojawów fenologicznych następują w późniejszych fazach sezonu wegetacyjnego (późne lato) niż w fazach wiosennych, co jest naturalną konsekwencją kumulowania się efektu wzrostu temperatury w czasie sezonu wegetacyjnego (Sparks i Menzel 2002). Jesienne pojawy fenologiczne wykazują opóźnienie wynoszące 1,3 dnia na dekadę (Menzel i in. 2006b).

Prace dotyczące wpływu obserwowanego ocieplenia na fenologię roślin uprawnych są mniej liczne niż dotyczące roślin dzikorosnących (Menzel i in. 2006c). W ostatnich latach liczba prac poświęconych fenologii roślin uprawnych znacznie wzrosła, co można wiązać z przygotowywanymi strategiami adaptacji do zmian klimatu (Challinor i in. 2009, Olesen i in. 2011). Z uwagi na następujące duże zmiany w rolniczych systemach produkcji, polegające głównie na doskonaleniu agrotechniki i wymianie odmian, dane fenologiczne dotyczące tendencji pojawów fenologicznych roślin uprawnych nie zawsze są przydatne do analizy trendów wieloletnich w relacji do obserwowanego ocieplenia (Sparks i Menzel 2002). Stwierdza się, że terminy prac polowych nie zmieniają się tak znacząco jak pojawy fenologiczne zależne bezpośrednio od czynników klimatycznych, np. tendencja przyspieszania terminów prac polowych w Europie wynosi tylko 0,4 dnia na dekadę (Menzel i in.

2006b). Zaobserwowano również, że wcześniejszy początek wegetacji nie pociąga za sobą decyzji rolników o wcześniejszym siewie, co jest związane z faktem, że termin siewu uzależniony jest również od zagrożenia przymrozkami oraz od innych czynników niezależnych od temperatury (van Oort i in. 2012). Oceniono na przykład, że w latach 1951–2004 w Niemczech fazy fenologiczne drzew owocowych są wcześniejsze w każdej kolejnej dekadzie o 4,4–7,1 dnia, natomiast terminy siewu (i wschodów) upraw ozimych i jarych oraz terminy zbiorów są przyspieszane o 2,1 dnia na dekadę. Mniejszy efekt wpływu obserwowanej zmiany warunków klimatycznych na uprawy jednoroczne wynikają z faktu, że rolnicy podejmują decyzję o zmianie terminów zabiegów agrotechnicznych, uwzględniając inne czynniki organizacyjne. W konsekwencji utrudnia to ocenę faktycznych efektów wzrostu temperatury w ostatnich latach dla produkcji roślinnej (van Oort i in. 2012).

W latach 2031–2050, według scenariuszy klimatycznych RCM, siew pszenicy jarej, owsa i kukurydzy w Europie ma być wcześniejszy o 1–21 dni niż w latach 1985–2009. Większe zmiany nastąpią w Europie Północnej niż Południowej. W przypadku terminu dojrzewania analizowanych upraw zmiany są znacznie mniejsze. Pszenica ozima ma dojrzewać 7–13 dni, a kukurydza 11–23 dni wcześniej niż w okresie odniesienia (1985–2009) (Olesen i in. 2012). Tendencje do skracania się okresów międzyfazowych (poza okresem od pojawienia się znamion do dojrzałości pełnej) oraz długości okresu wegetacji kukurydzy w Wielkopolsce wykazała także Dragańska (2008), analizując scenariusz GISS GCM dla roku 2050.

W najnowszych badaniach wskazuje się również na problem przeszacowywania efektów zmiany klimatu w fenologii roślin w eksperymentach laboratoryjnych czy modelowych, które nadmiernie upraszczają założenia doświadczeń lub modele (Wolkovich i in. 2012). Innym problemem są znaczące różnice pomiędzy prognoząmi wykonanymi dla scenariuszy klimatycznych opracowywanych w różnych modelach klimatycznych (Olesen i in. 2012).

W pracach związanych z analizą zmian warunków klimatycznych w Polsce publikowanych na początku XXI w. wskazano na znaczący wzrost temperatury wiosną i złagodzenie warunków termicznych zimą (Kozuchowski i Żmudzka 2001). Michalska (2011), analizując trend temperatury w latach 1951–2005, stwierdziła największy wzrost temperatury w lutym: od 0,4°C na 10 lat w południowej części Polski do 0,7°C na 10 lat na północy kraju.

W analizach sum temperatury powyżej 5°C w Polsce w latach 1951–2006 wskazano na tendencję wzrostową 4°C na rok, natomiast suma temperatury powietrza powyżej 10°C wzrastała w tempie 2,6°C na rok (Żmudzka 2012).

Obserwacje warunków klimatycznych w ostatnim dziesięcioleciu (2001–2010) potwierdziły wzrost temperatury w miesiącach letnich, natomiast w mniejszym stopniu zimą (Górski i Kozyra 2011).

3. MATERIAŁ I METODY

W pracy wykorzystano trzy zbiory danych:

- dane fenologiczne udostępnione przez Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych (COBORU) w Słupi Wielkiej,
- dobowe wartości temperatury powietrza udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie (IMGW-PIB) w ramach realizacji projektu KLIMAT (<http://klimat.imgw.pl/>) oraz publikowane przez COBORU miesięczne charakterystyki termiczne dla stacji meteorologicznych zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie doświadczeń odmianowych (Rybarczyk 2011),
- Scenariusze klimatyczne udostępnione w ramach europejskiego projektu ENSEMBLES (van der Linden i Mitchell 2009), a opracowane dla obszaru Polski podczas realizacji projektu KLIMADA (Liszewska i in. 2011).

3.1. DANE FENOLOGICZNE

Dane fenologiczne dotyczące terminów faz fenologicznych pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego pochodzą z doświadczeń odmianowych prowadzonych w 44 Stacjach Doświadczalnych Oceny Odmian (SDOO) przez COBORU z lat 1990–2011. Analizowane daty faz fenologicznych, tj.: siewu, wschodów, wznawienia wegetacji, kłoszenia i dojrzałości woskowej, dotyczą średniego terminu pojawów dla wszystkich odmian testowanych w danej stacji doświadczalnej. Materiały udostępnione przez COBORU w arkuszach kalkulacyjnych zostały opracowane w bazie danych, gdzie daty faz fenologicznych określono jako numer kolejnego dnia w roku. Podczas transformacji do bazy danych przeprowadzono kontrolę jakości danych polegającą na wykluczeniu notowań o potencjalnie dużym błędzie obserwatora lub poprawieniu błędów zapisu (np. numeru miesiąca).

Liczba notowań wykorzystana w analizach wynosiła maksymalnie dla okresu siew – wschody w przypadku pszenicy ozimej – 826, żyta ozimego – 545, jęczmienia ozimego – 618 (tab. 1). Dla pszenicy ozimej z powodu złego przezimowania i likwidacji doświadczeń brak było danych z 1999 r., a dla żyta ozimego – z 1998 i 1999 r. W przypadku jęczmienia ozimego w latach tych liczba obserwacji była znacznie mniejsza.

W opisie wyników, charakteryzując terminy pojawów fenologicznych, pomija się w tekście przymiotnik ozimy.

Tabela 1

Liczba obserwacji fenologicznych wykorzystana do określenia wymagań termicznych
 pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego
 Number of observation used for evaluation thermal requirement of winter wheat, winter rye
 and winter barley

Okres rozwoju; Development period	Pszenica ozima; Winter wheat	Żyto ozime; Winter rye	Jęczmień ozimy; Winter barley
Siew – wschody; Sowing – emergence	826	545	618
Wiosenne wznowienie wegetacji – kłoszenie; Spring vegetation renewal – heading	719	466	528
Wiosenne wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa; Spring vegetation renewal – yellow ripeness	707	466	529
Kłoszenie – dojrzałość woskowa; Heading – yellow ripeness	743	463	496

3.2. DANE METEOROLOGICZNE

Średnie dobowe wartości temperatury powietrza wykorzystane do analizy wymagań termicznych badanych upraw pochodziły ze stacji synoptycznych IMGW-PIB z lat 1981–2011 (rys. 1). Dobowe wartości temperatury powietrza z okresu 1981–2009 pochodziły z bazy danych udostępnionej do analiz w ramach prac projektu KLIMAT (<http://klimat.imgw.pl/>). Dobowe wartości temperatury powietrza ze stacji synoptycznych IMGW-PIB z lat 2010 i 2011 pobrano z zasobów World Data Center (WDC) for Meteorology (<http://www.ncdc.noaa.gov/>).

W pracy wykorzystano również publikowane przez Rybarczyk (2011) charakterystyki wieloletnie średniej rocznej temperatury powietrza z lat 1981–2000 ze stacji meteorologicznych COBORU zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie prowadzonych doświadczeń odmianowych (rys. 1).

Location of the COBORU Experimental Station (black colour type) and synoptic meteorological

$\chi^2 = 0.96$, $p = 0.81$

(ECMWF). Wersja modelu przeznaczona do analiz klimatycznych (ARPEGE-Climat) powstała w latach 90. XX w. (Déqué i in. 1994) i jest ciągle doskonała (Ghibelline i Déqué 2003). Model globalnej cyrkulacji ECHAM5 powstał w Max Planck Institute for Meteorology (MPIM) w Niemczech we współpracy z Europejskim Centrum Prognoz w Reading w Wielkiej Brytanii (ECMWF) (Roeckner i in. 2003).

Dane RCM dotyczyły okresu bazowego 1971–2000 oraz scenariuszy na lata 2021–2050 i 2071–2100. Rozdzielczość przestrzenna wykorzystanych danych wynosiła 25 km². Dane RCM dla obszaru Polski zostały wyodrębnione ze zbiorów EOBS opracowanych w ramach projektu ENSEMBLES (<http://ensemblesrt3.dmi.dk>) i udostępnione przez Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego w ramach projektu KLI-MADA (Liszewska i in. 2011). Scenariusze RCM na lata 2021–2050 i 2071–2100 dotyczą scenariusza emisyjnego IPCC – A1B, czyli zakładają średni wzrost koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze.

Tabela 2

Dane źródłowe dotyczące wykorzystanych danych scenariuszowych
(za Liszewska i in. 2011)

Literature data source for climate scenarios evaluated in the study
(from Liszewska et al. 2011)

RCM	Publikacje; Publications	GCM	Referencje; Reference
RM5.1 (RM ARPEGE)	Radu i in. 2008	ARPEGE	http://www.cnrm.meteo.fr/gmgec/arpege/arpege.html
DMI-HIRHAM5 (DMI ARPEGE)	Christensen i in. 2007	ARPEGE	
MPI-M-REMO (MPI ECHAM)	Jacob 2001, Jacob i in. 2001	ECHAM5	http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam/echam5.html
KNMI-RACMO2 (KNMI ECHAM))	van Meijgaard i in. 2008	ECHAM5	

3.4. TENDENCJE POJAWÓW FENOLOGICZNYCH

Tendencje fenofaz pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego w latach 1990–2011 scharakteryzowano, podając współczynniki kierunkowe regresji liniowej analizowanych faz fenologicznych względem lat. Istotność statystyczną równań regresji liniowej podano na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Tendencje scharakteryzowano również graficznie, wykorzystując metodę regresji lokalnej mocnej (Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots) (Cleveland 1979). W metodzie tej dla każdej wartości X szacowana jest wartość Y na podstawie regre-

sji w zakresie sąsiednich wartości X , przy czym wpływ kolejnych wartości X jest ważony w zależności od odległości. Stosując tę metodę, uzyskuje się ocenę mniej wrażliwą w stosunku do regresji liniowej na wartości początku i końca analizowanej serii czasowej. Wyraźnie można wyodrębnić okresy o zróżnicowanych tendencjach (Cleveland i Devilin 1988). Metoda ta, podobnie jak średnia krocząca, pozwala na zobrazowanie tendencji w przebiegu wieloletnim danego zjawiska, nie podaje jednak liczbowo współczynników opisywanych tendencji. Kierunek i wielkość zmian w dniach szacowano na podstawie graficznych obrazów opracowanych regresji. Analizę wykonano w pakiecie statystycznym STATGRAPHICS Centurion X5.

3.5. OPIS WYMAGAŃ TERMICZNYCH

Wymagania termiczne pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego określono, wykorzystując metodę sum temperatur efektywnych (Górski i Jakubczak 1965). Szczegółowe wskazówki dotyczące budowy modeli opisujących prędkość rozwoju analizowanych zbóż zaczerpnięto z wcześniej prowadzonych w Polsce badań dotyczących budowy modeli fenologicznych (Deputat i in. 1996, Deputat i Marcinkowska 1997 i 1999b).

Temperatura efektywna (T_e) jest definiowana w pracy jako różnica średniej dobowej temperatury powietrza (t) i progu termicznego (e) dla określonej fazy rozwojowej:

$$T_e = t - e.$$

Wartość progu termicznego temperatury efektywnej (e) dla wydzielonych okresów rozwojowych wyznaczono według metody, która minimalizuje błąd stawianych prognoz terminów fenologicznych (Górski i Jazurek 1996):

$$e = \frac{\bar{L} \bar{L}t - \bar{L}^2 \bar{t}}{\bar{L}^2 \bar{L}^2}$$

gdzie:

t – średnia temperatura powietrza danego okresu rozwoju ($^{\circ}\text{C}$),

L – długość danego okresu rozwoju (dni).

Sumę temperatury efektywnej (ΣT_e) określono jako iloczyn liczby dni w danym okresie (L) i średniej temperatury efektywnej (T_e) (Deputat i in. 1996):

$$\Sigma T_e = L \cdot T_e.$$

Związek pomiędzy długością okresów fenologicznych (L) a temperaturą efektywną okresu (T_e) ma postać hiperboli. Zależność liniową pomiędzy temperaturą

efektywną (T_e) uzyskuje się dla odwrotności długości faz fenologicznych ($1/L$), która jest nazywana prędkością rozwoju (C) (Górski i Jakubczak 1965):

$$C = \frac{1}{L}$$

Związek prędkości rozwoju (C) z temperaturą efektywną (T_e) określano metodą regresji liniowej Pearsona. Dla uniknięcia małych wartości ułamkowych w analizie zamiast wartości 1 przyjęto 10000 (podobnie jak we wcześniejszych, wymienionych wyżej pracach dotyczących tej problematyki):

$$C = a + b T_e$$

Dokładniejsze oszacowanie wymagań termicznych uzyskano po uwzględnieniu modyfikującego wpływu długości dnia, czyli reakcji fotoperiodycznej (Listowski 1977). Szacowano związek prędkości rozwoju (C) z temperaturą efektywną (T_e) i długością 20. dnia (f) po wiosennym wznowieniu wegetacji. W przypadku okresu siew – wschody szacowano wpływ długości 10. dnia po siewie, jednak podobnie jak we wcześniejszych pracach nie uzyskano istotnych zależności. W analizie wykorzystano metodę regresji wielokrotnej:

$$C = a + b T_e + c f$$

W obliczeniach statystycznych wykorzystano pakiet STATGRAPHICS Centurion X5.

3.6. OPRACOWANIE DANYCH METEOROLOGICZNYCH

Do określenia sum temperatury efektywnej dla modelu fenologicznego potrzebne są średnie dobowe wartości temperatury. Dane dobowe ze stacji meteorologicznych położonych w bezpośrednim sąsiedztwie doświadczeń odmianowych COBORU nie zostały dotychczas przetworzone do formy cyfrowej. Z tego względu wykorzystywano dane z najbliższej stacji meteorologicznej IMGW skorygowane o poprawkę opracowaną na podstawie średniej rocznej temperatury. Metoda ta była dotychczas stosowana przy konstrukcji modeli fenologicznych (Deputat i in. 1996).

Poprawkę korygującą dane dobowe stacji synoptycznej IMGW wyznaczono na podstawie średnich rocznych wartości temperatury obliczonych dla stacji IMGW i charakterystyk Stacji Doświadczalnych COBORU opublikowanych przez Rybarczyk (2011). Wykorzystano dane z okresu 1981–2000, dla którego dysponowano udostępnionym w projekcie KLIMAT pełnym ciągiem obserwacji dobowych, zweryfikowanym przez IMGW. Przyporządkowanie stacji synoptycznych do stacji, w której prowadzono doświadczenia odmianowe przeprowadzono na podstawie analizy sąsiedztwa (tab. 3). Na rysunku 1 przyporządkowanie to wskazane jest jednokolorowym kolorem sygnatur.

Tabela 3

Długość (ϕ) i szerokość (λ) geograficzna oraz wysokość nad poziomem morza (h) stacji doświadczalnych COBORU oraz odległość (O) od najbliższej stacji synoptycznej IMGW

The longitude (ϕ), latitude (λ), and elevation (h) of COBORU experimental stations and distance (O) to the nearest synoptic IMGW station

Lp.	COBORU	ϕ	λ	h	IMGW	O (km)
1	Bezek	23,27	51,18	224	Włodawa	44
2	Białogard	15,99	53,99	24	Koszalin	26
3	Bobrowniki	17,13	52,82	105	Piła	43
4	Bukówka	15,96	50,71	510	Jelenia Góra	27
5	Chrzastowo	17,58	53,17	105	Piła	56
6	Cicibór Duży	23,08	52,03	150	Terespol	37
7	Czesławice	22,27	51,32	206	Lublin	22
8	Dukla	21,68	49,57	324	Lesko	48
9	Głębokie	18,45	52,65	85	Toruń	43
10	Głodowo	19,25	52,83	129	Płock	44
11	Głubczyce	17,83	50,20	280	Racibórz	31
12	Jelenia Góra	15,70	50,90	342	Jelenia Góra	2
13	Karżniczka	17,23	54,48	60	Ustka	26
14	Kawęczyn	20,35	52,17	90	Warszawa	43
15	Kochcice	18,70	50,68	270	Katowice	55
16	Kościelec	18,67	52,20	116	Koło	2
17	Kościelna Wieś	18,08	51,73	140	Kalisz	3
18	Krościna Mała	16,94	51,38	106	Wrocław	31
19	Krzyżewo	22,75	53,03	130	Białystok	29
20	Lisewo	18,83	54,08	7	Elbląg	40
21	Lubinicko	15,55	52,25	86	Zielona Góra	36
22	Lubliniec Nowy	18,70	50,68	270	Lesko	104
23	Lućmierz	19,38	51,90	175	Koło	69
24	Marianowo	22,11	53,21	140	Białystok	39
25	Masłowice	18,58	51,22	195	Wieluń	0
26	Nowa Wieś Ujska	16,75	53,03	100	Piła	11
27	Przeclaw	21,48	50,18	185	Tarnów	40
28	Radostowo	18,75	53,98	40	Elbląg	49
29	Rarwino	14,83	53,93	10	Świnoujście	39
30	Ruska Wieś	22,21	53,87	130	Suwałki	56
31	Rychliki	19,53	53,98	70	Elbląg	22
32	Seroczyn	21,90	52,02	150	Siedlce	31
33	Słupia Jędrzej	19,96	50,63	290	Kielce	56
34	Słupia Wielka	17,22	52,21	85	Poznań	58
35	Śrem Wójtostwo	17,03	52,08	76	Leszno	44
36	Sulejów	19,87	51,35	188	Sulejów	0

cd. tab. 3

Lp.	COBORU	ϕ	λ	h	IMGW	O (km)
37	Tarnów Śląski	16,80	50,58	295	Kłodzko	21
38	Tomaszów Bol.	15,68	51,28	200	Legnica	37
39	Uhnin	23,07	51,58	157	Włodawa	33
40	Węgrzce	19,98	50,12	285	Kraków	14
41	Wróclikowo	20,68	53,83	112	Olsztyn	18
42	Wyczechy	17,03	53,68	152	Chojnice	33
43	Zadąbrowie	22,82	49,90	230	Lesko	59
44	Zybiszów	16,92	51,07	130	Wrocław	4

Średnia wartość temperatury roku dla wielolecia 1981–2000 dla stacji COBORU wynosiła 8,05°C, natomiast dla wytypowanych do dalszej analizy stacji synoptycznych IMGW – 8,07°C. Średnia odległość stacji synoptycznych IMGW wybranych do analizy od stacji doświadczalnych COBORU wynosiła 36 km, natomiast maksymalna – 104 km (Lubliniec Nowy – Lesko) (tab. 3). Najwyższą wartość opracowanej poprawki uzyskano dla stacji położonych na obszarach górskich, tj. Tarnów Śląski (1,0°C) i Bukówka (–1,3°C). Dla 13 stacji wytypowanych do dalszej analizy szacowana poprawka wynosiła 0°C, a dla 9 stacji: 0,1 i –0,1°C (tab. 4).

Tabela 4

Średnia roczna temperatura powietrza w latach 1981–2000 w stacjach meteorologicznych zlokalizowanych przy doświadczeniach COBORU (T_c)

i stacjach synoptycznych IMGW (T_i), różnica tych wartości ($T_c - T_i$)

The mean early air temperature for weather stations located in COBORU experiments and for the nearest available for analysis synoptic IMGW station, difference between that values ($T_c - T_i$)

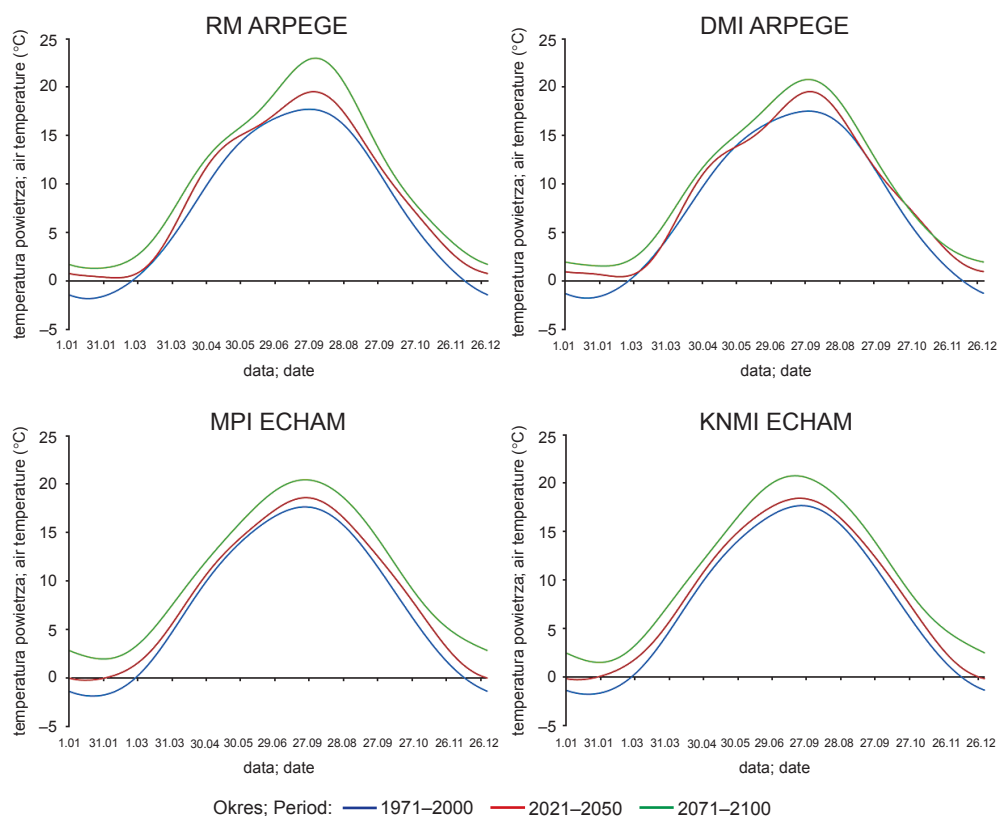
Lp.	COBORU	T_c	IMGW	T_i	$T_c - T_i$
1	Bezek	7,7	Włodawa	7,7	0,0
2	Białogard	8,2	Koszalin	8,2	0,0
3	Bobrowniki	8,3	Piła	8,1	0,2
4	Bukówka	6,3	Jelenia Góra	7,6	–1,3
5	Chrzastowo	8,0	Piła	8,1	–0,1
6	Cicibór Duży	7,6	Terespol	7,8	–0,2
7	Czesławice	7,9	Lublin	7,6	0,3
8	Dukla	7,6	Lesko	7,5	0,1
9	Głębokie	8,3	Toruń	8,3	0,0
10	Głodowo	7,9	Płock	8,2	–0,3
11	Głubczyce	8,4	Racibórz	8,7	–0,3
12	Jelenia Góra	7,6	Jelenia Góra	7,6	0,0

cd. tab. 4

Lp.	COBORU	T_c	IMGW	T_l	$T_c - T_l$
13	Karżniczka	7,7	Ustka	8,4	-0,7
14	Kawęczyn	8,3	Warszawa	8,3	0,0
15	Kochcice	8,1	Katowice	8,5	-0,4
16	Kościelec	8,5	Koło	8,6	-0,1
17	Kościelna Wieś	8,7	Kalisz	8,7	0,0
18	Krościna Mała	9,0	Wrocław	8,9	0,1
19	Krzyżewo	7,3	Białystok	7,2	0,1
20	Lisewo	7,9	Elbląg	8,1	-0,2
21	Lubinicko	8,8	Zielona Góra	8,7	0,1
22	Lubliniec Nowy	7,8	Lesko	7,5	0,3
23	Lućmierz	8,3	Sulejów	8,0	0,3
24	Marianowo	7,5	Białystok	7,2	0,3
25	Masłowice	8,5	Wieluń	8,5	0,0
26	Nowa Wieś Ujska	8,1	Piła	8,1	0,0
27	Przeclaw	8,1	Tarnów	8,8	-0,7
28	Radostowo	7,7	Elbląg	8,1	-0,4
29	Rarwino	8,6	Świnoujście	8,6	0,0
30	Ruska Wieś	7,0	Suwałki	6,6	0,4
31	Rychliki	7,9	Elbląg	8,1	-0,2
32	Seroczyn	7,8	Siedlce	7,8	0,0
33	Słupia Jędrzej,	7,9	Kielce	7,6	0,3
34	Słupia Wielka	8,8	Poznań	8,7	0,1
35	Śrem Wójtostwo	9,0	Leszno	8,8	0,2
36	Sulejów	8,0	Sulejów	8,0	0,0
37	Tarnów Śląski	8,6	Kłodzko	7,6	1,0
38	Tomaszów Bolesławicki	8,4	Legnica	9,1	-0,7
39	Uhnin	7,7	Włodawa	7,7	0,0
40	Węgrzce	8,4	Kraków	8,3	0,1
41	Wróćkowo	7,4	Olsztyn	7,5	-0,1
42	Wyczechy	7,6	Chojnice	7,3	0,3
43	Zadąbrowie	8,2	Lesko	7,5	0,7
44	Zybiszów	8,9	Wrocław	8,9	0,0

3.7. OPRACOWANIE SCENARIUSZY KLIMATYCZNYCH

Przyjęta metoda opisu wymagań termicznych wymaga wyznaczenia terminu wiosennego wznowienia wegetacji. Ponieważ dane scenariuszy klimatycznych w analizowanych trzydziestoleciach (1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100) nie wykazywały regularnego cyklu rocznego, właściwego dla dłuższych serii czasowych, przebieg roczny dobowych wartości temperatury w punktach siatki geograficznej aproksymowano analizą harmoniczną (Górski 2005). Cykl roczny przedstawiono, wykorzystując cztery pierwsze współczynniki Fouriera (rys. 2). Do obliczenia współczynników Fouriera posłużono się pakietem statystycznym „R” (The R Project for Statistical Computing, <http://www.r-project.org>). Termin wiosennego wznowienia wegetacji określono jako pierwszy dzień, w którym średnia dobowa temperatura powietrza, aproksymowana analizą harmoniczną, przekracza próg termiczny 5°C. Powyższa metoda wyznaczania początku okresu wegetacji jest stosowana w Modelu Agroklimatu Polski (Górski i Zaliwski 2002) i pracach korzystających z tego modelu (Kozyra i Górski 2004, Kozyra i in. 2005).



Rys. 2. Uśredniony dla Polski cykl roczny temperatury powietrza aproksymowany za pomocą analizy harmonicznej

The annual cycle of average daily temperature in Poland, smoothed using harmonic analysis

4. WYNIKI

4.1. FENOLOGIA ZBÓŻ OZIMYCH W LATACH 1990–2011

4.1.1. Siew – wschody

W latach 1990–2011 w doświadczeniach COBORU ze zbożami ozimymi, najwcześniej wysiewany był jęczmień, następnie żyto i pszenica; średni termin siewu tych zbóż określono odpowiednio na 18 września, 23 września i 27 października. Wschody jęczmienia notowano przeciętnie 29 września, żyta – 3 października, a pszenicy – 9 października. Średnia długość okresu od siewu do wschodów w przypadku pszenicy wyniosła 13 dni, natomiast jęczmienia i żyta odpowiednio: 11 i 10 dni. Największe odchylenie standardowe długości okresu siew – wschody określono dla pszenicy (4,5 dnia), nieznacznie mniejsze dla jęczmienia (3 dni), a najmniejsze dla żyta (2,2 dnia). Współczynnik zmienności długości tego okresu dla pszenicy, żyta i jęczmienia wynosił odpowiednio: 35, 29 i 27% (tab. 5).

Analiza trendu liniowego terminu siewu wskazuje na istotne opóźnienie w przypadku jęczmienia (2,2 dnia na 10 lat) i pszenicy (1,5 dnia na 10 lat), natomiast nie stwierdzono zmian terminu siewu żyta (tab. 6). W przypadku wszystkich analizowanych roślin uprawnych opóźnia się natomiast termin wschodów. Współczynnik kierunkowy regresji liniowej terminu wschodów pszenicy przyjmuje wartość +3,5, jęczmienia +1,3, natomiast żyta +1,1 dnia na 10 lat. Konsekwencją zmian jest wydłużanie się okresu od siewu do wschodów pszenicy i żyta, odpowiednio o 1,9 i 1,1 dnia na 10 lat, natomiast skracanie się tego okresu o 0,9 dnia na 10 lat w przypadku jęczmienia (tab. 7).

Według przebiegu linii regresji lokalnej mocnej, opóźnienie terminu siewu i wschodów pszenicy nastąpiło od 2005 r., a zmianę tę można ocenić na ok. 5 dni (rys. 3). Opóźnienie terminu siewu jęczmienia następowało stopniowo i wyniosło w całym okresie ok. 2 dni, natomiast zmiana terminu wschodów – 1 dzień. Termin siewu żyta według tej analizy był pod koniec badanego okresu o ok. 1 dzień późniejszy, natomiast wschodów – o 2 dni późniejszy niż na początku lat 90. XX w. W analizowanych latach stwierdzono wydłużenie się okresu siew – wschody, w przypadku pszenicy o 5 dni (z 11 do 16 dni), a żyta o 2 dni (z 8 do 10 dni). Natomiast okres ten w odniesieniu do jęczmienia uległ skróceniu o ok. 2 dni (z 12 na 10 dni) (rys. 4).

4.1.2. Wiosenne wznowienie vegetacji – kłoszenie

W latach 1991–2011 średni termin wiosennego wznowienia vegetacji pszenicy i jęczmienia określono na 24 marca, natomiast żyta na 25 marca (późniejsza data wznowienia vegetacji żyta jest wynikiem innej liczby obserwacji i lokalizacji stacji doświadczalnych). Fazę kłoszenia w pierwszej kolejności osiągało żyto, przeciętnie 14 maja, następnie jęczmień – 18 maja i pszenica – 1 czerwca. Długość okresu od wznowienia vegetacji do kłoszenia wynosiła przeciętnie dla żyta, jęczmienia i pszenicy, odpowiednio: 50, 55 i 69 dni. Największe odchylenie standardowe długości tego okresu uzyskano dla pszenicy (14 dni), następnie dla żyta (12,8 dnia) i jęczmienia (11,5 dnia). Największą zmiennością długości okresu od wznowienia vegetacji do kłoszenia, wyrażoną współczynnikiem zmienności, wyróżniało się żyto (26%), natomiast dla jęczmienia i pszenicy współczynnik ten wyniósł odpowiednio: 21 i 20% (tab. 5).

Współczynniki kierunkowe trendu liniowego nie wskazują na istotne tendencje zmian terminu wznowienia vegetacji analizowanych upraw. Natomiast termin kłoszenia cechuje tendencja do przyspieszenia, w przypadku pszenicy o 3,6, żyta o 2,8 i jęczmienia o 2,6 dnia na 10 lat (tab. 6). W wyniku przyspieszenia terminu kłoszenia analizowanych upraw w przypadku pszenicy i jęczmienia następuje istotne skracanie długości okresu od wznowienia vegetacji do kłoszenia odpowiednio: 2,7 i 2,3 dnia na 10 lat, natomiast dla żyta trend ten jest mniejszy i nie jest istotny (tab. 7).

Wyglądzenie serii czasowej terminów wznowienia vegetacji z wykorzystaniem regresji lokalnej mocnej wskazuje, że od 1991 do 1996 r. następowało opóźnienie terminu wiosennego wznowienia vegetacji analizowanych upraw, natomiast po 1996 r. tendencja ta uległa odwróceniu. Należy wskazać, że pod koniec lat 90. wiosenne wznowienie vegetacji następowało o ok. 5 dni później niż obecnie. Przyspieszenie terminu kłoszenia w latach 1991–2011 w przypadku pszenicy można ocenić na ok. 5 dni, żyta – ok. 4 dni, a jęczmienia – ok. 3 dni (rys. 3).

W latach 1991–2011 wyróżnić można 3 okresy o zróżnicowanych tendencjach zmian długości fenofazy wznowienia vegetacji – kłoszenie. W latach 1991–1997 w przypadku trzech analizowanych zbóż zaznaczyła się tendencja do skracania tej fenofazy. Prawdopodobnie było to rezultatem opóźnienia w tym okresie wznowienia vegetacji, a więc zwiększenia efektu fotoperiodycznego. Od 1997 do 2003 r. nie zaobserwowano wyraźnych tendencji w długości okresu wznowienia vegetacji – kłoszenie, natomiast po 2003 r. wykazano tendencję do jego wydłużania (rys. 3 i 4).

4.1.3. Dojrzałość woskowa

W latach 1991–2011 średnia data dojrzałości woskowej jęczmienia przypadała na 30 czerwca, żyta – 17 lipca, a pszenicy – 19 lipca. Długość okresu od kłoszenia do dojrzałości woskowej jęczmienia wynosiła przeciętnie 43, pszenicy – 48, a żyta – 64 dni. Natomiast długość okresu od wiosennego wznowienia wegetacji do dojrzałości woskowej wynosiła dla pszenicy 117, żyta – 114, a jęczmienia – 98 dni. Odchylenie standardowe długości okresu kłoszenie – dojrzałość woskowa w przypadku pszenicy wyniosło 7,3 dnia, natomiast żyta i jęczmienia – 6 dni. Odchylenie standardowe długości okresu wiosenne wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa dla pszenicy i żyta wynosiło 14, a dla jęczmienia 12 dni. Zmienność długości okresu od kłoszenia do dojrzałości woskowej było dwukrotnie mniejsze niż okresu od wznowienia wegetacji do kłoszenia. W przypadku jęczmienia współczynnik zmienności długości okresu kłoszenie – dojrzałość woskowa wynosi 14, pszenicy – 13, a żyta – 11%. Współczynnik zmienności długości okresu wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa dla analizowanych upraw przyjmuje wartość 12% (tab. 5).

Trend liniowy terminu dojrzałości woskowej analizowanych upraw w Polsce wskazuje na istotne przyspieszenie, w przypadku żyta o 5,5, pszenicy o 5,0, a jęczmienia o 4,3 dnia na 10 lat. Tendencja do skracania się okresu od wznowienia wegetacji do dojrzałości woskowej wynosi w przypadku pszenicy 4,4, jęczmienia – 4,1, a żyta – 3,6 dnia na 10 lat. Natomiast największą tendencję do skracania się okresu od kłoszenia do dojrzałości oszacowano dla żyta (–2,7 dnia na 10 lat), następnie pszenicy (–1,5 dnia na 10 lat) i jęczmienia (–1 dzień na 10 lat).

Analiza regresji lokalnej mocnej terminu dojrzałości woskowej analizowanych upraw w wieloleciu 1991–2011 wskazała, że w pierwszych latach wystąpiła tendencja do opóźniania, natomiast po 2000 r. do przyspieszania tego terminu. Można ocenić, że w 2011 r. w stosunku do sytuacji z końca lat 90. XX w. termin dojrzałości woskowej żyta jest wcześniejszy o 8, pszenicy o 6, a jęczmienia o 4 dni (rys. 3). W latach 1991–1996 długość okresu od kłoszenia do dojrzałości woskowej wykazywała tendencję do wydłużania, a od 1997 r. do skracania. Długość okresu od wznowienia wegetacji do dojrzałości woskowej skracała się wyraźnie do 1995 r., natomiast w następnych latach nie zmieniała się znacząco (rys. 4).

Tabela 5

Średnie terminy faz fenologicznych pszenicy ozimej (P), żyta ozimego (Z) i jęczmienia ozimego (J) oraz długość okresów międzyfazowych w doświadczeniach COBORU w latach 1990–2011

The mean dates of a phenological stages of winter wheat (P), winter rye (Z), and winter barley (J), and their length for COBORU experiments in the years 1990–2011

Okres rozwoju; Development period	U*	N	Data; Date	L	STD L	V L
Siew – wschody; Sowing – emergence	P	826	27.09–9.10	13	4,5	35
	Z	545	23.09–3.10	10	2,9	29
	J	618	18.09–29.09	11	3,0	27
Wiosenne wznowienie wegetacji – kłoszenie; Vegetation renewal – heading	P	719	24.03–1.06	69	14,0	20
	Z	466	25.03–14.05	50	12,8	26
	J	528	24.03–18.05	55	11,5	21
Wiosenne wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa; Vegetation renewal – yellow ripeness	P	707	24.03–19.07	117	14,0	12
	Z	466	25.03–17.07	114	14,0	12
	J	529	24.03–30.06	98	12,0	12
Kłoszenie – dojrzałość woskowa; Heading – yellow ripeness	P	743	1.06–19.07	48	6,0	13
	Z	463	14.05–17.07	64	7,3	11
	J	496	18.05–30.06	43	6,0	14

* U – roślina uprawna; crop, N – liczba doświadczeń; number of experiments, L – średnia długość okresu (dni); mean length of the period (days), STD L – odchylenie standardowe długości okresu (dni), standard deviation for the length of the period (days), V L – współczynnik zmienności długości okresu (%); variability coefficient for the length of the period (%)

Tabela 6

Współczynniki kierunkowe trendu liniowego (dni/10 lat) terminów pojawów fenologicznych pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego względem lat
Slope of the linear regression (days/10 years) for phenological stages of winter wheat, winter rye, and winter barley, and years

Faza fenologiczna; Phenological stage	Pszenica ozima; Winter wheat	Żyto ozime; Winter rye	Jęczmień ozimy; Winter barley
Siew; Sowing	1,5*	0,0	2,2*
Wschody; Emergence	3,5*	1,1*	1,3*
Wiosenne wznowienie wegetacji; Spring vegetation renewal	-0,8	-1,8	-0,3
Kłoszenie; Heading	-3,6*	-2,8*	-2,6*
Dojrzałość woskowa; Yellow ripeness	-5,0*	-5,5*	-4,3*

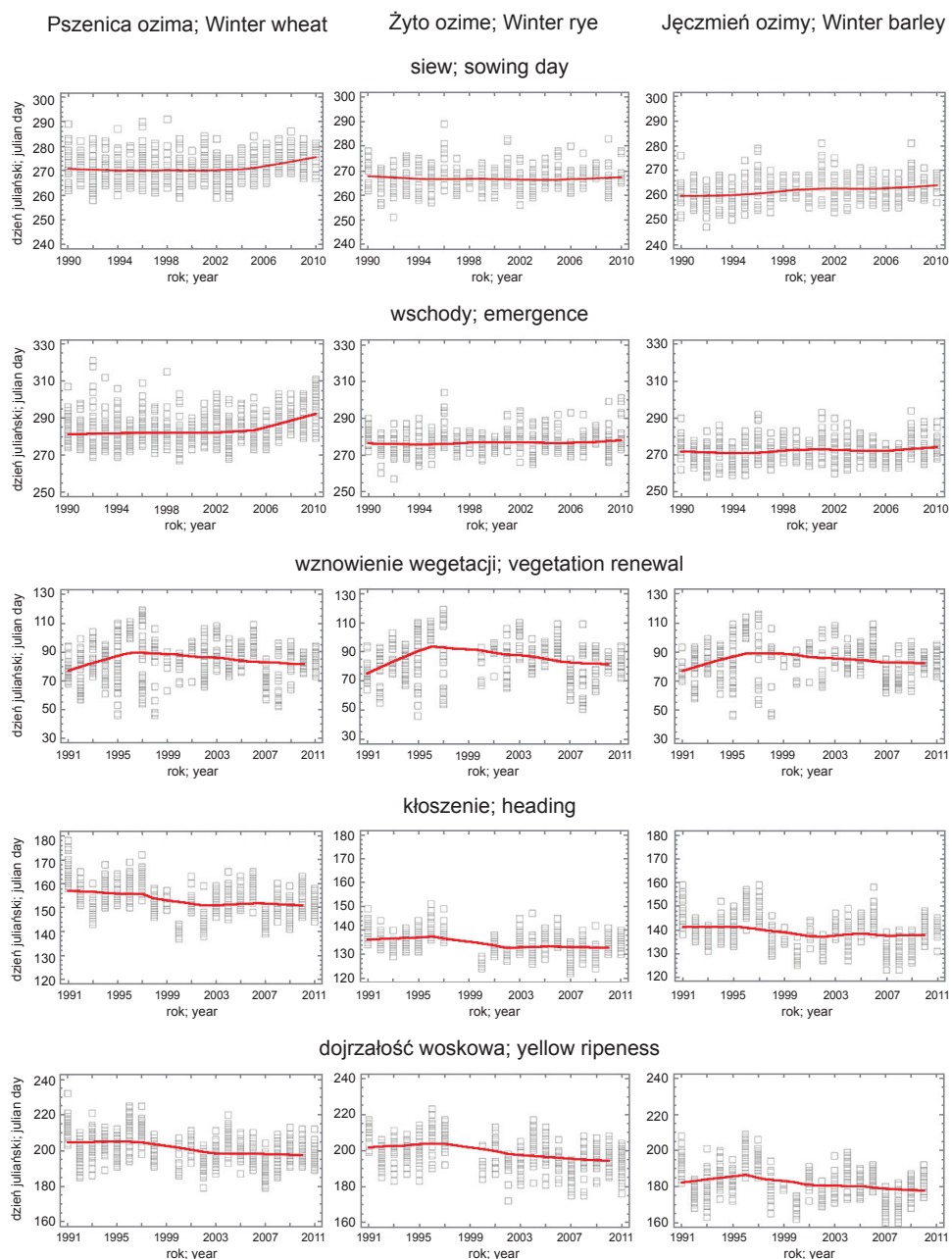
*trend istotny na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; significant level at $\alpha = 0,05$

Tabela 7

Współczynniki kierunkowe trendu liniowego (dni/10 lat) długości okresów międzyfazowych pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego względem lat
Slope of the linear regression (days/10 years) for development periods of winter wheat, winter rye, and winter barley, and years

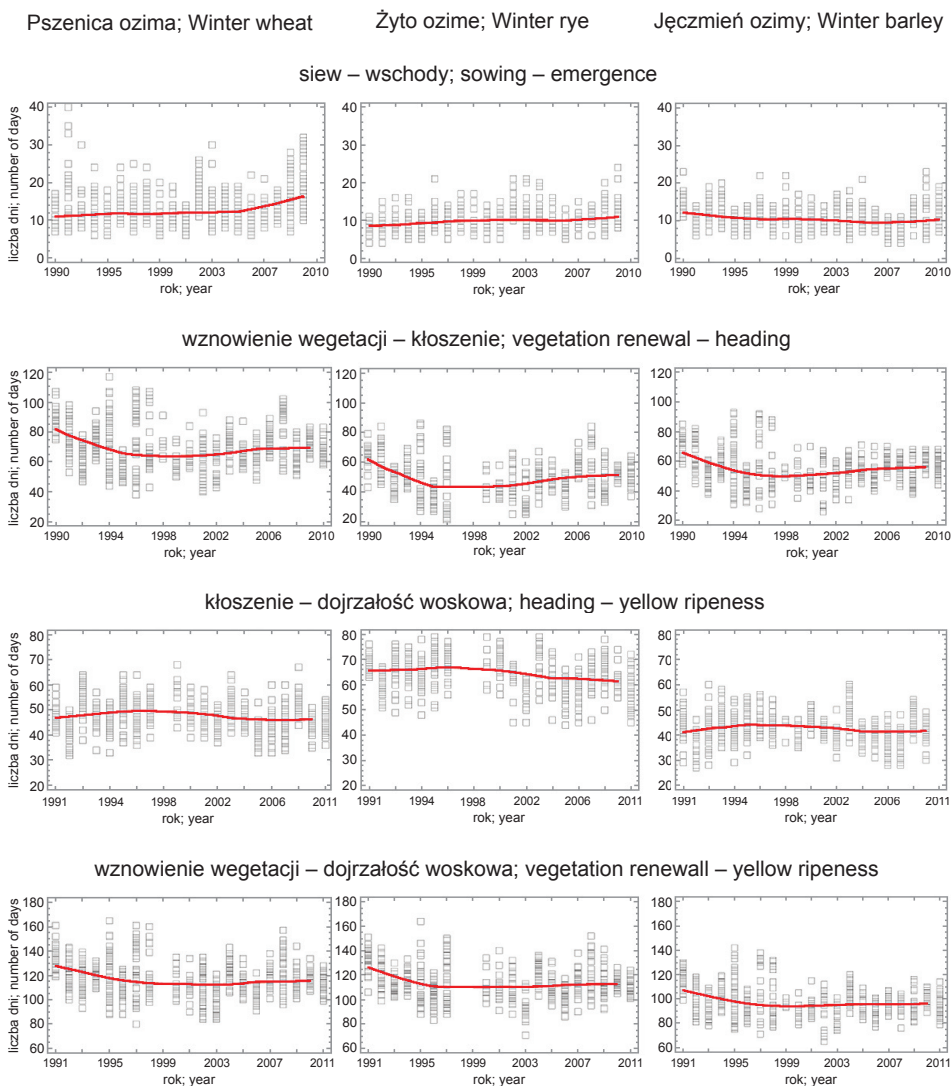
Okres rozwoju; Development period	Pszenica ozima; Winter wheat	Żyto ozime; Winter rye	Jęczmień ozimy; Winter barley
Siew – wschody; Sowing – emergence	+1,9*	+1,1*	-0,9*
Wiosenne wznowienie wegetacji – kłoszenie; Spring vegetation renewal – heading	-2,7*	-0,1	-2,3*
Wiosenne wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa; Spring vegetation renewal – yellow ripeness	-4,4*	-3,6*	-4,1*
Kłoszenie – dojrzałość woskowa; Heading – yellow ripeness	-1,5*	-2,7*	-1,0*

*trend istotny na poziomie istotności $\alpha = 0,05$; significant level at $\alpha = 0,05$



Rys. 3. Terminy faz fenologicznych pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego w doświadczeniach COBORU w latach 1990–2011

Dates of phenological stages of winter wheat, winter rye, and winter barley in the experiments of COBORU in the period 1990–2011



Rys. 4. Długość okresów międzyfazowych pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego w doświadczeniach COBORU w latach 1990–2011

Number of days between phenological stages of winter wheat, winter rye, and winter barley in the experiments of COBORU in the period 1990–2011

4.2. MODELE FENOLOGICZNE

W przyjętej koncepcji budowy modeli fenologicznych matematyczny opis rozwoju roślin polega na wyznaczeniu funkcji regresji określającej zależność prędkości rozwoju od temperatury efektywnej. Prędkość rozwoju definiowana jest jako odwrotność długości fenofazy i przyjmuje postać liniowej funkcji temperatury. Na podstawie znanej długości okresu i średniej temperatury efektywnej obliczana jest suma temperatury efektywnej potrzebna do osiągnięcia kolejnych faz rozwojowych. Terminy pojawów fenologicznych wyznacza się następnie na podstawie średniej temperatury dobowej jako datę osiągnięcia sumy temperatury efektywnej charakterystycznej dla danej fazy rozwojowej.

4.2.1. Temperatura efektywna

Pierwszym etapem opracowania algorytmów do prognozowania terminów faz fenologicznych było określenie progów temperatury efektywnej w wydzielonych fenofazach oraz określenie zależności prędkości rozwoju od temperatury efektywnej.

Według przyjętej metody szacowania wartości progowej temperatury efektywnej uzyskano zróżnicowane wartości progów zarówno dla analizowanych upraw, jak i poszczególnych fenofaz, z wyjątkiem okresu wznowienie vegetacji – kłoszenie. Przy wyznaczaniu sum temperatury efektywnej wartość progów zaokrąglono do liczb całkowitych. Najniższy próg temperatury efektywnej wynoszący 3°C wyznaczono dla wszystkich analizowanych zbóż w okresie wznowienia vegetacji – kłoszenie oraz dla pszenicy w okresie siew – wschody. Najwyższy próg temperatury efektywnej wynoszący 12°C uzyskano dla żyta i jęczmienia w okresie kłoszenie – dojrzałość woskowa. W przypadku pszenicy próg temperatury efektywnej wyniósł w tym okresie 11°C (tab. 8). Najniższe współczynniki zmienności sumy temperatury efektywnej charakteryzują okres wznowienie vegetacji – dojrzałość woskowa, następnie wznowienie vegetacji – kłoszenie, kłoszenie dojrzałość – woskowa i siew – wschody (tab. 8).

Najściślejsze związki pomiędzy prędkością rozwoju a temperaturą efektywną, wyrażone współczynnikiem determinacji, uzyskano dla okresu wznowienie vegetacji – kłoszenie (pszenica – 72, żyto – 68, jęczmień – 47%). Nieznacznie niższe współczynniki determinacji uzyskano dla okresu wznowienie vegetacji – dojrzałość woskowa (pszenica – 65, żyto – 50, jęczmień – 34%). Najmniej ściśle związki pomiędzy prędkością rozwoju a temperaturą efektywną określono dla fenofazy kłoszenie – dojrzałość woskowa (pszenica – 42, żyto – 18, jęczmień – 15%) (tab. 8).

Tabela 8

Wymagania cieplne pszenicy ozimej (P), żyta ozimego (Z) i jęczmienia ozimego (J) według modeli fenologicznych opracowanych dla doświadczeń COBORU w latach 1991–2011

Temperature requirements of winter wheat (P), winter rye (Z), and winter barley (J) according to the model evaluated for COBORU experiments carried out in the years 1991–2011

Okres rozwoju; Development period	U*	N	e	T _e	STD T _e	ΣT _e	STD ΣT _e	V%	R ²
Siew – wschody; Sowing – emergence	P	826	3,3	8,6	2,7	100 > 3	22	25	58
	Z	545	6,4	6,5	2,4	60 > 6	20	33	40
	J	618	7,6	4,9	2,3	48 > 8	19	40	36
Wiosenne wznowienie wegetacji – kłoszenie; Spring vegetation renewal – heading	P	719	3,3	7,8	1,6	522 > 3	54	10	72
	Z	466	3,5	6,6	1,7	311 > 3	46	15	68
	J	528	3,2	6,8	1,7	365 > 3	67	18	47
Wiosenne wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa; Spring vegetation renewal – yellow ripeness	P	707	4,3	8,5	1,1	1088 > 4	78	8	65
	Z	466	5,3	8,3	1,0	932 > 5	86	9	50
	J	529	5,1	7,5	1,0	725 > 5	99	13	34
Kłoszenie – dojrzałość woskowa; Heading – yellow ripeness	P	743	11,1	6,4	1,2	304 > 11	42	14	42
	Z	463	12,1	4,4	0,9	282 > 12	51	18	18
	J	496	12,1	4,1	1,1	170 > 12	42	25	15

* U – roślina uprawna; crop, N – liczba doświadczeń; numer of experiments, e – próg termiczny temperatury efektywnej (°C); temperature threshold for effective temperature (°C), T_e – średnia temperatura efektywna; average effective temperature, STD T_e – odchylenie standardowe średniej temperatury efektywnej (°C); standard deviation of average effective temperature, ΣT_e – suma temperatury efektywnej (°C_d); sum of effective temperature (°C_d), STD ΣT_e – odchylenie standardowe sumy temperatury efektywnej (°C_d); standard deviation for sum of effective temperature (°C_d), R² – współczynnik determinacji zależności T_e od prędkości rozwoju; R-squared coefficient between T_e and rate of development

4.2.2. Efekt fotoperiodyczny

W drugim etapie opracowania algorytmów określono związki prędkości rozwoju ze średnią temperaturą efektywną i dodatkową zmienną w postaci długości 20. dnia po wiosennym wznowieniu wegetacji. Wprowadza to do opracowanych modeli informacje o działaniu efektu fotoperiodycznego. Na istnienie tego typu zależności wskazywano we wcześniejszych pracach dotyczących opisywanych zbóż w Polsce (Deputat i in. 1996, Deputat i Marcinkowska 1997 i 1999b). W analizie wykorzystano metodę regresji wielokrotnej.

Istotny wpływ długości dnia i średniej temperatury na prędkość rozwoju uzyskano w fenofazach: wznowienie wegetacji – kłoszenie i wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa. Wpływ fotoperiodu na prędkość rozwoju roślin w znaczeniu fizjologicznym można jednak przypisać tylko do okresu wznowienie wegetacji – kłoszenie (Listowski 1977, van Ittersum i in. 2003) (tab. 9).

Wprowadzenie do równań określających prędkość rozwoju zmiennej objaśniającej wpływ fotoperiodu zwiększyło precyzję opracowanych modeli. W przypadku pszenicy i żyta w okresie wznowienie wegetacji – kłoszenie współczynnik determinacji uzyskanych równań jest podobny i wynosi odpowiednio: 84 i 83%. Znacznie niższą wartość współczynnika determinacji uzyskano w tym okresie dla jęczmienia (68%). W okresie wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa współczynnik determinacji uzyskanych równań regresji wyniósł dla pszenicy, żyta i jęczmienia odpowiednio: 75, 65 i 50%. W okresie siew – wschody i kłoszenie – dojrzałość woskowa współczynniki determinacji równań określających prędkość rozwoju mają niższą wartość niż przedstawione powyżej, jednak w dalszym ciągu zachowują przydatność prognostyczną (tab. 9).

Wyższy współczynnik determinacji równań regresji opisujących prędkość rozwoju występował zawsze w fenofazach pszenicy niż żyta i jęczmienia. Wynikać to może ze znacznie większej liczby doświadczeń z pszenicą. Większa liczba doświadczeń wyraża w praktyce większe zróżnicowanie środowiska. Przy małym zróżnicowaniu warunków środowiskowych lub krótszej serii czasowej uzyskuje się zazwyczaj mniej istotne korelacje. Inną przyczyną mniejszego współczynnika determinacji równań regresji opisujących rozwój żyta i jęczmienia jest fakt, że ich rozwój następuje w niższych temperaturach niż pszenicy i z tego względu odznaczają się większą zmiennością (tab. 8). Istnieje wtedy również większe prawdopodobieństwo popełnienia błędu obserwacyjnego.

Średni błąd szacowania terminów pojawów fenologicznych notowanych w doświadczeniach COBORU według opracowanych modeli fenologicznych wynosi około 3 dni (tab. 9). Należy jednak podkreślić, że wielkość błędu ma różną wagę przy szacowaniu poszczególnych fenofaz. Przy prognozowaniu daty wschodów uzyskana średnia wielkość błędu równa 3 dni jest relatywnie duża w stosunku do średniej długości tej fenofazy wynoszącej 10–13 dni. Natomiast dla pozostałych analizowanych okresów międzyfazowych błąd 3 dni może być uznany za względnie mały. Może on być związany z faktem powstawania podobnej wielkości błędów w notowaniach faz fenologicznych (Deputat 1974).

Szczególnie istotny dla dalszej analizy jest określony w algorytmach (modelach) efekt fotoperiodyczny (tab. 9), który zmniejsza lub zwiększa wymagania cieplne w zależności od terminu wznowienia wegetacji wiosną. Mechanizm ten powstał w wyniku ewolucji, a jego zadaniem było zabezpieczenie roślin przed suchym latem występującym w klimacie śródziemnomorskim (Górski i in. 1999).

Określona w równaniach zależność prędkości rozwoju od długości dnia wskazuje, że w warunkach późnej wiosny wymagania cieplne zbóż ozimych zmniejszają się. Natomiast w warunkach wczesnej wiosny, przy krótszym dniu, wzrastają. W przypadku zwiększenia się długości 20. dnia po wznowieniu wegetacji o godzinę, np. z 12,5 do 13,5 godziny (co odpowiada zmianie, jaka dokonuje się na szerokości geograficznej Szczecina pomiędzy 25 marca a 9 kwietnia) przeciętne skrócenie okresu od wznowienia wegetacji do kłoszenia wyniesie dla żyta 12, jęczmienia – 11, a dla pszenicy – 9 dni (rys. 5). Należy zakładać, że wraz z realizacją scenariuszy klimatycznych prognozujących przyśpieszenie terminu początku wegetacji nastąpi wzrost wymagań termicznych zbóż ozimych w Polsce. Opóźnienie terminu początku wegetacji zmniejszy wymagania termiczne zbóż ozimych, powodując efekt analogiczny do istniejącego obecnie zróżnicowania tych wymagań wynikających z rozciągłości geograficznej Polski.

Uzyskane na podstawie opracowanych równań regresji i danych meteorologicznych z lat 1991–2011 dla Stacji Doświadczalnych COBORU średnie daty kłoszenia w przypadku pszenicy i jęczmienia są identyczne jak obserwowane, natomiast dla żyta uzyskana szacunkowa średnia data kłoszenia jest o 2 dni wcześniejsza niż w analizowanych doświadczeniach (tab. 10). Rozbieżność powstała w przypadku żyta może wynikać z różnej liczby lat i miejscowości włączonych do obliczenia wartości średniej.

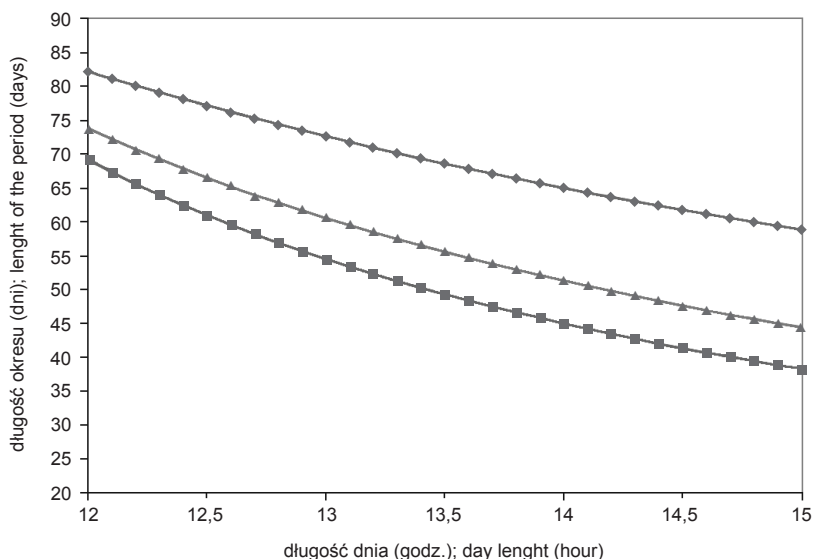
Tabela 9

Wpływ temperatury efektywnej (T_e) i fotoperiodu na prędkość rozwoju pszenicy ozimej (P), żyta ozimego (Z) i jęczmienia ozimego (J) według modelu fenologicznego opracowanego dla doświadczeń COBORU z lat 1990–2011

Impact of effective temperature (T_e), and photoperiod on the development of winter wheat (P), winter rye (Z), and winter barley (J) in the phenological models evaluated for COBORU experiments in the years 1990–2011

Okres rozwoju; Development period	U*	e	Równanie regresji; Regression equation	R ²	E
Siew – wschody; Sowing – emergence	P	3	$C = 252,4 + 70,8T_e$	58	3,2
	Z	6	$C = 563,1 + 80,9T_e$	40	2,9
	J	8	$C = 642,4 + 77,8T_e$	36	3,0
Wiosenne wznowienie vegetacji – kłoszenie; Spring vegetation renewal – heading	P	3	$C = -147,1 + 9,6T_e + 16,1f$	84	2,6
	Z	3	$C = -412,2 + 13,6T_e + 38,9f$	83	2,8
	J	3	$C = -266,2 + 6,4T_e + 29,8f$	68	3,2
Wiosenne wznowienie vegetacji – dojrzałość woskowa; Spring vegetation renewal – yellow ripeness	P	4	$C = -26,5 + 4,1T_e + 5,4f$	75	3,5
	Z	5	$C = -32,1 + 2,9T_e + 7,1f$	65	3,9
	J	5	$C = -23,2 + 2,2T_e + 8,1f$	50	4,0
Kłoszenie – dojrzałość woskowa; Heading – yellow ripeness	P	11	$C = 117,2 + 14,7T_e$	42	2,9
	Z	12	$C = 117,2 + 9,3T_e$	18	3,6
	J	12	$C = 189,9 + 12,3T_e$	15	3,4

* U – roślina uprawna; crop, e – próg termiczny temperatury efektywnej; temperature threshold for effective temperature, R² – współczynnik determinacji (%); R-squared (%), E – średni błąd absolutny równania (dni); mean absolute error of equation (days), C – prędkość rozwoju (10000/L); development rate (10000/L), L – średnia długość okresu (dni); mean length of the period (days), T_e – średnia temperatura efektywna (°C); average effective temperature (°C), f – długość 20. dnia od wiosennego wznowienia vegetacji; length of the 20th day after vegetation renewal



Zboże; Cereal: —◆— pszenica ozima; winter wheat —■— żyto ozime; winter rye —▲— jęczmień ozimy; winter barley

Rys. 5. Wpływ fotoperiodu określony przez długość 20. dnia po wiosennym wznowieniu wegetacji na długość okresu od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego, według opracowanego modelu fenologicznego (tab. 9).

Założono średnią temperaturę okresu

The impact the fotoperiod evaluated by the length of the 20th day after spring vegetation removal on the length of the period from vegetation removal to heading of winter wheat, winter rye, and winter barley, according to evaluated model (table 9) at mean temperature

Tabela 10

Obliczona z modelu suma temperatury efektywnej (ΣT_e) od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia oraz termin kłoszenia pszenicy ozimej (P), żyta ozimego (Z) i jęczmienia ozimego (J) w stacjach doświadczalnych COBORU w latach 1991–2011
Model estimated effective temperature sum (ΣT_e) for the period from spring vegetation renewal to yellow ripeness, and the date of yellow ripeness of winter wheat (P), winter rye (Z), and winter barley (J) for COBORU experimental station in the years 1991–2011

Lp.	Stacja doświadczalna; Experimental station	ΣT_e			Data; Date		
		P	Z	J	P	Z	J
1	Bezek	515	304	354	1.06	13.05	18.05
2	Białogard	499	290	340	5.06	16.05	21.05
3	Bobrowniki	515	304	354	30.05	11.05	17.05
4	Bukówka	507	297	347	15.06	26.05	31.05
5	Chrzastowo	507	297	347	1.06	13.05	18.05
6	Cicibór Duży	507	297	354	31.05	12.05	18.05
7	Czesławice	515	304	354	31.05	12.05	17.05

cd. tab. 10

Lp.	Stacja doświadczalna; Experimental station	ΣT_e			Data; Date		
		P	Z	J	P	Z	J
8	Dukla	515	310	360	4.06	16.05	20.05
9	Głębokie	507	297	347	31.05	12.05	17.05
10	Głodowo	507	297	347	1.06	13.05	18.05
11	Głubczyce	530	323	374	30.05	11.05	16.05
12	Jelenia Góra	507	297	354	6.06	17.05	22.05
13	Karżnieszka	491	284	333	15.06	25.05	31.05
14	Kawęczyn	515	304	354	29.05	11.05	15.05
15	Kochcice	507	304	354	1.06	13.05	18.05
16	Kościelec	513	316	342	26.05	7.05	12.05
17	Kościelna Wieś	515	304	360	28.05	9.05	14.05
18	Krościna Mała	538	330	381	26.05	8.05	12.05
19	Krzyżewo	499	290	340	4.06	16.05	21.05
20	Lisewo	499	290	340	4.06	14.05	20.05
21	Lubinicko/Świebodzin	515	304	360	26.05	8.05	12.05
22	Lubliniec Nowy	515	310	360	2.06	14.05	19.05
23	Lućmierz	515	304	360	30.05	11.05	16.05
24	Marianowo	499	290	340	3.06	15.05	19.05
25	Masłowice	523	310	360	29.05	10.05	15.05
26	Nowa Wieś Ujska	507	297	347	1.06	12.05	18.05
27	Przeclaw	530	323	374	31.05	12.05	17.05
28	Radostowo	499	290	340	4.06	15.05	20.05
29	Rarwino	499	290	347	4.06	15.05	21.05
30	Ruska Wieś	491	284	340	5.06	16.05	21.05
31	Rychliki	499	290	340	4.06	14.05	20.05
32	Seroczyn	507	297	354	1.06	13.05	18.05
33	Słupia Jędrzejowska	530	323	374	30.05	11.05	16.05
34	Słupia Wielka	530	323	374	27.05	8.05	13.05
35	Sulejów	515	304	354	1.06	13.05	17.05
36	Śrem Wójtostwo	538	323	374	27.05	8.05	13.05
37	Tarnów Śląski	530	323	374	30.05	11.05	16.05
38	Tomaszów Bolesławicki	515	310	360	31.05	11.05	17.05
39	Uhnin	507	304	354	1.06	13.05	18.05
40	Węgrzce	523	310	360	1.06	13.05	18.05
41	Wróćkowo	499	290	340	5.06	16.05	22.05
42	Wyczechy	499	290	340	4.06	15.05	21.05
43	Zadąbrowie	530	323	374	31.05	12.05	17.05
44	Zybiszów	538	330	381	27.05	9.05	13.05
Średnia; Average		513	304	354	1.06	12.05	18.05

4.3. SCENARIUSZE ZMIAN W FENOLOGII

Zmiany w fenologii zbóż ozimych w Polsce w warunkach ocieplenia prognozowanego przez analizowane scenariusze klimatyczne w XXI w., według opracowanych modeli fenologicznych, będą zależały również od zmian terminu wiosennego wznowienia wegetacji.

4.3.1. Zmiana warunków termicznych

Wykorzystane w opracowaniu dane pochodzące z Regionalnych Modeli Klimatu (RCM) zostały wcześniej skorygowane dla obszaru Polski w Projekcie KLIMADA (Liszewska 2011). Średnia roczna temperatura powietrza w Polsce w latach 1971–2000, według analizowanych danych RCM, wynosiła 7,8°C. Najchłodniejszym miesiącem był styczeń (–1,8°C), a najcieplejszym lipiec (17,4°C). Różnice między średnimi wartościami temperatury poszczególnych miesięcy dla obszaru Polski szacowane przez poszczególne RCM nie przekraczają 0,1°C (tab. 11).

Według analizowanych scenariuszy RCM, wzrost średniej rocznej temperatury powietrza w latach 2021–2050 i 2071–2100 w stosunku do średniej z lat 1971–2000 wyniesie odpowiednio: 1,2 i 2,8°C (tab. 12 i 13).

Średnia roczna temperatura powietrza na obszarze Polski w latach 2021–2050 wzrośnie do 9,0°C, natomiast w latach 2071–2100 nawet do 10,6°C. Rozbieżności pomiędzy analizowanymi scenariuszami w prognozie średniej rocznej temperatury w latach 2021–2050 nie są duże. Największą zmianę prognozuje model DMI ARPEGE (1,3°C), a najmniejszą RM ARPEGE (1,0°C). Większe rozbieżności pomiędzy scenariuszami występują w prognozie średniej rocznej temperatury powietrza na lata 2071–2100. Największe zmiany wykazuje model MPI ECHAM (3,0°C), a najmniejsze model DMI ARPEGE (2,4°C). Jeszcze znaczniejsze rozbieżności pomiędzy analizowanymi modelami RCM stwierdzono w prognozie przebiegu rocznego temperatury (rys. 6).

Największy wzrost średniej temperatury powietrza nastąpi w styczniu. W latach 2021–2050 średnia temperatura stycznia ma wynosić 0,3°C, natomiast w latach 2071–2100 wyniesie 1,9°C. Należy zwrócić uwagę na duże rozbieżności pomiędzy modelami w prognozie na lata 2021–2050. Modele MPI ECHAM i KNMI ECHAM prognozują wzrost temperatury w tym miesiącu o 1,5°C, natomiast modele RM ARPEGE i DMI ARPEGE – o 2,6°C. Mniejsze różnice stwierdzono w prognozie zmian temperatury stycznia w latach 2071–2100. Według modelu MPI ECHAM, temperatura w styczniu ma wzrosnąć o 4°C, według modelu DMI ARPEGE – o 3,7°C, natomiast według modeli RM ARPEGE i KNMI ECHAM – o 3,5°C.

W latach 2021–2050 zmniejszy się różnica między średnią temperaturą stycznia i lutego. W latach 1971–2000 styczeń był chłodniejszy od lutego o $0,9^{\circ}\text{C}$, natomiast w latach 2021–2050 różnica ta ma wynosić $0,3^{\circ}\text{C}$. W latach 2071–2100 analizowane scenariusze nie wykazują różnicy w średniej wartości temperatury stycznia i lutego.

Należy wskazać na dużą rozbieżność analizowanych scenariuszy w określeniu zmian warunków termicznych od maja do sierpnia. W latach 2021–2050 model RM ARPEGE wskazuje na wzrost temperatury maja o $1,2^{\circ}\text{C}$, a model MPI ECHAM tylko o $0,2^{\circ}\text{C}$. Dla czerwca model DMI ARPEGE prognozuje spadek temperatury o $0,6^{\circ}\text{C}$ względem lat 1971–2000, model DMI ARPEGE wskazuje na wzrost o $0,1^{\circ}\text{C}$, a model KNMI ECHAM – o 1°C (tab. 12 i 13).

Tabela 11

Średnia miesięczna i roczna temperatura powietrza na obszarze Polski według
analizowanych danych RCM w latach 1971–2000
The average monthly, and annual air temperature in Poland evaluated for the period
1971–2000 according to RCM data used in the study

Miesiąc; Month	RCM				Średnia; Average
	RM ARPEGE	DMI ARPEGE	MPI ECHAM	KNMI ECHAM	
Styczeń; January	−1,8	−1,8	−1,8	−1,8	−1,8
Luty; February	−0,9	−0,9	−0,9	−0,9	−0,9
Marzec; March	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7
Kwiecień; April	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Maj; May	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
Czerwiec; June	15,7	15,6	15,6	15,6	15,6
Lipiec; July	17,4	17,4	17,3	17,4	17,4
Sierpień; April	17,1	17,1	17,0	17,0	17,1
Wrzesień; September	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
Październik; October	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
Listopad; November	2,8	2,9	2,8	2,8	2,8
Grudzień; December	−0,2	−0,1	−0,2	−0,2	−0,2
Rok; Year	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8

Tabela 12

Średnia miesięczna i roczna temperatura powietrza na obszarze Polski według analizowanych modeli klimatycznych RCM w latach 2021–2050
The average monthly, and annual air temperature for Poland evaluated for the period 2021–2050 according to RCM used in the study

Miesiąc; Month	RCM				Średnia; Average
	RM ARPEGE	DMI ARPEGE	MPI ECHAM	KNMI ECHAM	
Styczeń; January	0,8	0,8	–0,2	–0,3	0,3
Luty; February	0,1	0,5	0,8	0,9	0,6
Marzec; March	2,9	2,5	3,5	3,8	3,2
Kwiecień; April	8,9	8,3	8,5	8,4	8,5
Maj; May	14,0	13,3	12,9	13,4	13,4
Czerwiec; June	15,8	15,0	16,3	16,6	15,9
Lipiec; July	18,7	18,8	18,2	18,1	18,5
Sierpień; April	18,5	18,4	17,9	17,6	18,1
Wrzesień; September	13,8	13,2	13,7	13,6	13,6
Październik; October	9,0	8,9	9,7	9,5	9,3
Listopad; November	4,6	4,7	4,4	4,0	4,4
Grudzień; December	1,6	1,7	1,0	0,7	1,3
Rok; Year	9,1	8,8	8,9	8,9	9,0

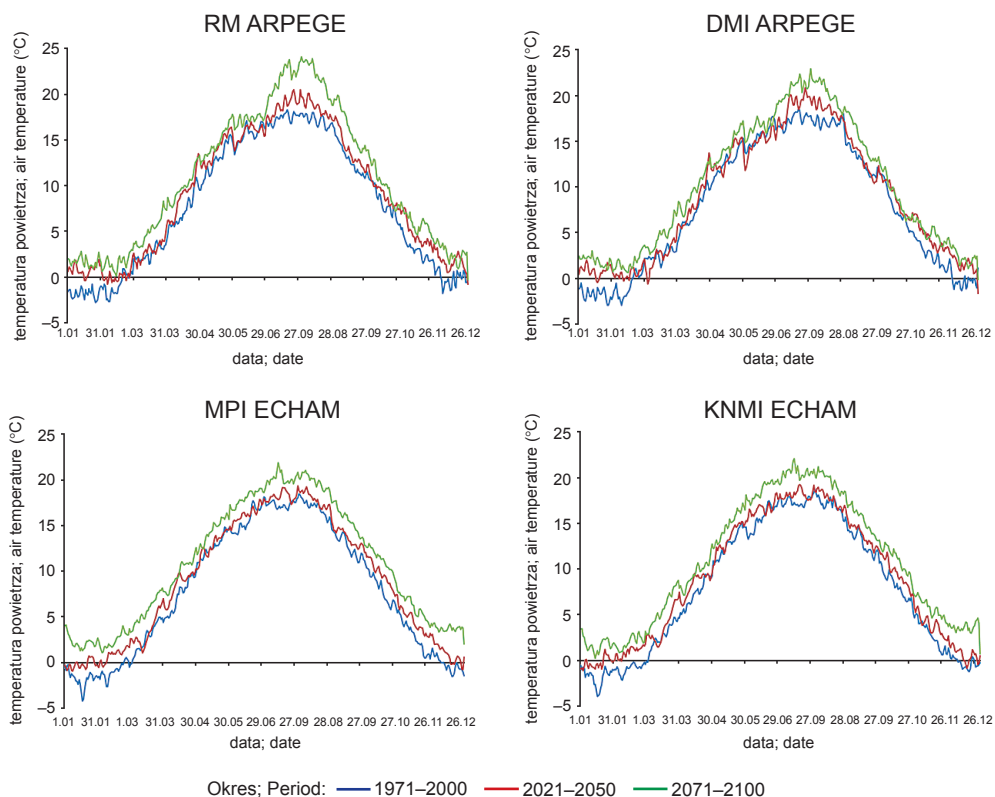
Tabela 13

Średnia miesięczna i roczna temperatura powietrza na obszarze Polski według analizowanych modeli klimatycznych RCM w latach 2071–2100
The average monthly, and annual air temperature for Poland evaluated for the period 2071–2100 according to RCM used in the study

Miesiąc; Month	RCM				Średnia; Average
	RM ARPEGE	DMI ARPEGE	MPI ECHAM	KNMI ECHAM	
Styczeń; January	1,7	1,9	2,2	1,7	1,9
Luty; February	1,6	1,6	2,4	2,0	1,9
Marzec; March	5,1	4,6	5,7	5,7	5,3
Kwiecień; April	10,0	9,7	9,8	9,5	9,8
Maj; May	14,8	14,4	14,5	14,9	14,7

cd. tab. 13

Miesiąc; Month	RCM				Średnia; Average
	RM ARPEGE	DMI ARPEGE	MPI ECHAM	KNMI ECHAM	
Czerwiec; June	17,3	16,7	18,1	18,7	17,7
Lipiec; July	21,8	20,8	20,1	20,5	20,8
Sierpień; April	21,8	20,3	19,9	19,6	20,4
Wrzesień; September	16,2	15,3	15,7	15,2	15,6
Październik; October	10,1	9,3	11,2	10,9	10,4
Listopad; November	5,8	5,1	6,0	5,8	5,7
Grudzień; December	2,5	2,5	3,7	3,6	3,1
Rok; Year	10,7	10,2	10,8	10,7	10,6



Rys. 6. Roczny przebieg dobowej temperatury powietrza w Polsce według analizowanych danych RCM w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100

The early course of mean daily temperature in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100 according to RCMs data used in the study

4.3.2. Zmiana terminu wznowienia wegetacji

Termin wznowienia wegetacji zbóż ozimych wyznaczono jako datę przejścia temperatury powietrza wiosną przez próg 5°C , co jest uznawane za przeciętny termin wznowienia wegetacji w Polsce (Romer 1949, Kozuchowski i in. 2000, Żmudzka i Dobrowolska 2001).

W latach 1971–2000 średni termin wznowienia wegetacji w Polsce, według analizy cyklu rocznego temperatury czterech RCM, przypadał na 31 marca (tab. 14). Najwcześniej, w dniach od 16 do 20 marca, wznowienie wegetacji następowało w południowo-zachodniej Polsce, najpóźniej w północno-wschodniej Polsce oraz na południu kraju na obszarach górskich – po 6 kwietnia (rys. 7).

W latach 2021–2050 termin wznowienia wegetacji w Polsce ma być wcześniejszy o 4 dni (27 marca) niż w latach 1971–2000, natomiast w latach 2071–2100 – o 16 dni (16 marca). Największą zmianę tego terminu w Polsce w latach 2021–2050 prognozuje model KNMI ECHAM (6 dni), a najmniejszą model DMI ARPEGE (1 dzień). Największą przeciętną zmianę terminu wznowienia wegetacji w latach 2071–2100 oszacowano według modelu MPI ECHAM (19 dni), a najmniejszą według modelu DMI ARPEGE (11 dni) (tab. 14).

Według danych z czterech scenariuszy RCM, w latach 2021–2050 w stosunku do lat 1971–2000 na przeważającym obszarze Polski przyspieszenie terminu wznowienia wegetacji wyniesie do 4 dni, a w północno-zachodniej Polsce – od 5 do 9 dni (rys. I i II w aneksie). Należy wskazać, że model RM ARPEGE prognozuje większe zmiany terminu wznowienia wegetacji na północy i południu Polski niż w centrum, natomiast model MPI ECHAM – na zachodzie niż na wschodzie Polski. Modele DMI ARPEGE i KNMI ECHAM nie wykazują zróżnicowania regionalnego zachodzących zmian, różnią się natomiast ich zakresem. Według modelu DMI ARPEGE, na całym obszarze Polski nastąpi zmiana terminu wznowienia wegetacji nieprzekraczająca 4 dni, natomiast według modelu KNMI ECHAM zmiana ta wyniesie od 5 do 9 dni (rys. 7 i 8; rys. I i II w aneksie).

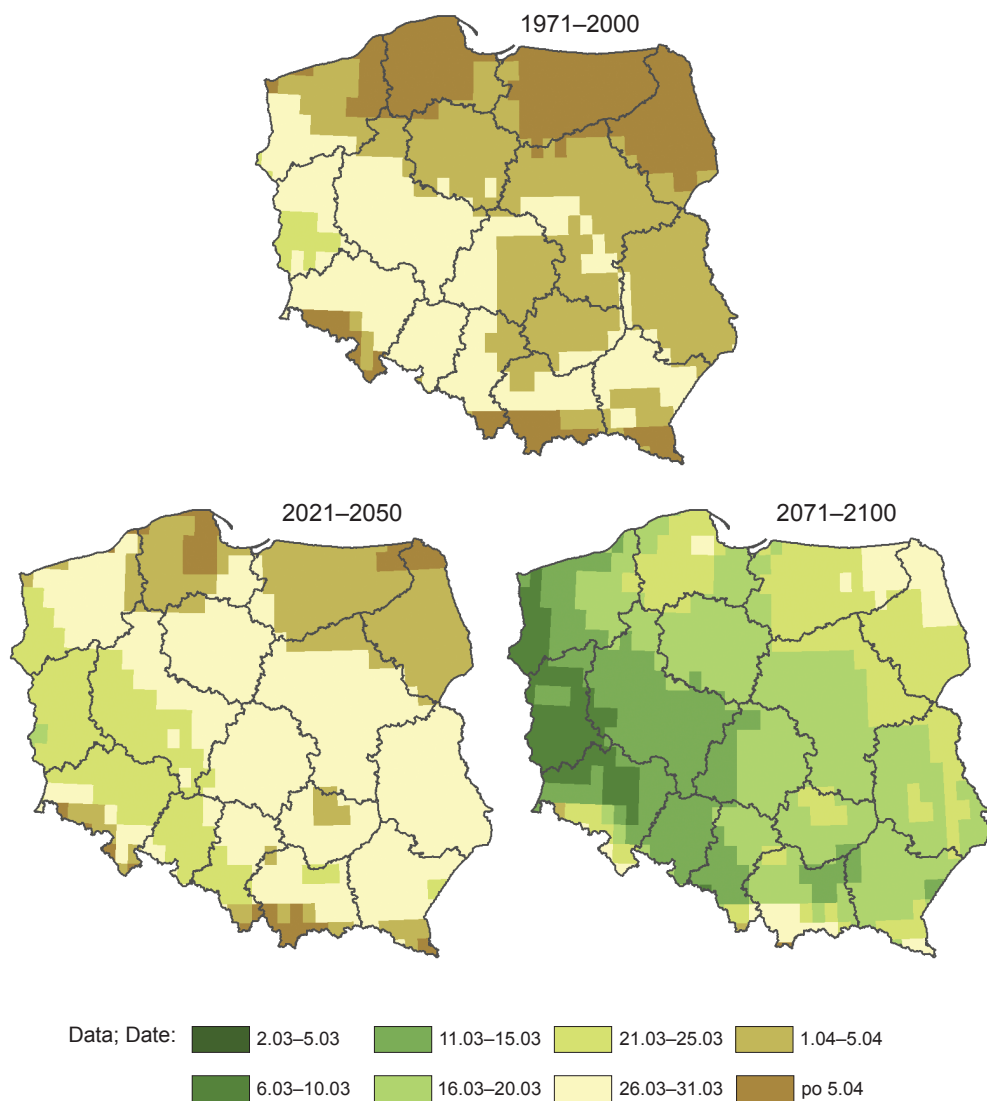
W latach 2071–2100, według wartości średnich z czterech scenariuszy RCM, największe przyspieszenie terminu wznowienia wegetacji nastąpi w północno-zachodnim pasie wybrzeża Morza Bałtyckiego i wyniesie od 25 do 30 dni. W zachodniej części kraju termin wznowienia wegetacji będzie wcześniejszy o 15–19 dni, we wschodniej części o 10–14 dni. Średni termin wznowienia wegetacji w latach 2071–2100 w południowo-zachodniej Polsce ma przypadać w dniach od 2 do 5 marca, na wschodzie kraju – od 21 do 25 marca, na północnym wschodzie – od 26 do 31 marca. Mapy terminu wznowienia wegetacji wskazują, że większe zmiany nastąpią w zachodniej niż we wschodniej części Polski (rys. I i II w aneksie). Anali-

zowane modele w tej perspektywie czasowej nie są jednak zgodne co do wielkości zmian. Na przykład model RM ARPEGE prognozuje na wschodzie kraju przyspieszenie terminu wznowienia wegetacji w zakresie od 10 do 14 dni, natomiast model DMI ARPEGE – od 5 do 9 dni (rys. 7 i 8; rys I i II w aneksie).

Tabela 14

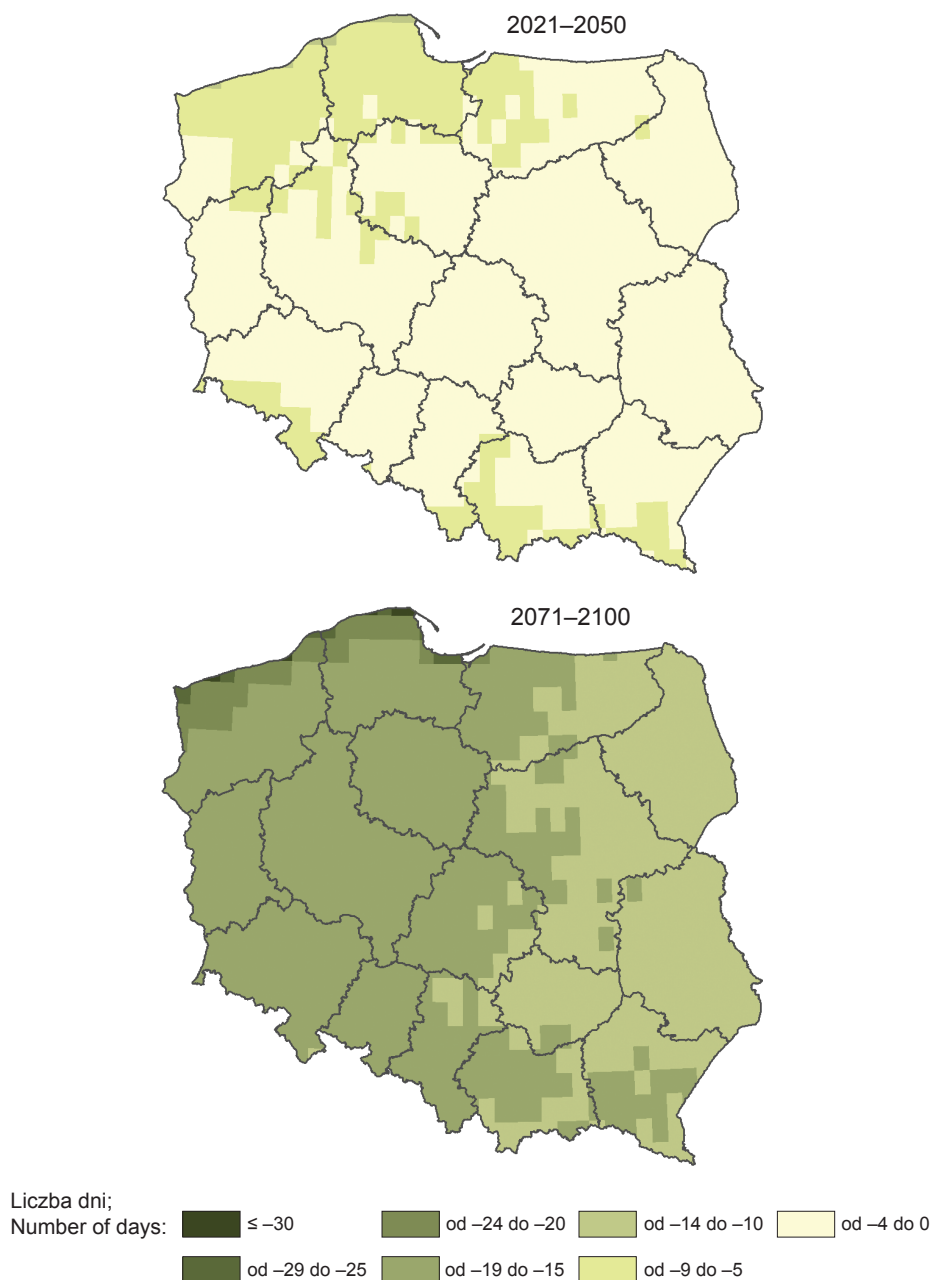
Średnia data przejścia temperatury powietrza w Polsce przez próg 5°C według analizowanych danych RCM w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100
The average date when normal air temperature exceeded 5°C temperature threshold, according evaluated RCMs data in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100

Okres; Period	RCM				Średnia; Average
	RM ARPEGE	DMI ARPEGE	MPI ECHAM	KNMI ECHAM	
1971–2000	2.04	1.04	31.03	31.03	31.03
2021–2050	29.03	31.03	25.03	25.03	27.03
2071–2100	18.03	21.03	12.03	13.03	16.03
zmiana względem okresu 1971–2000 (dni); change from 1971–2000 period (days)					
2021–2050	–4	–1	–5	–6	–4
2071–2100	–15	–11	–19	–18	–16



Rys. 7. Termin przejścia temperatury powietrza przez próg termiczny 5°C w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM

The date when mean air temperature exceeds threshold 5°C in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data



Rys. 8. Zmiana terminu przejścia temperatury powietrza przez próg 5°C (liczba dni)
w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia
dla analizowanych scenariuszy RCM

Change in the date when daily mean air temperature exceeded a threshold 5°C (number of days)
in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000,
average for evaluated RCMs scenarios

4.3.3. Zmiana wymagań cieplnych

Ustalając datę wznowienia wegetacji w warunkach analizowanych scenariuszy klimatycznych i długość 20. dnia po tym terminie, oszacowano zmiany wymagań cieplnych zbóż ozimych w okresie od wznowienia wegetacji do kłoszenia w Polsce w latach 1971–2000 i w warunkach prognozowanych na lata 2021–2050 i 2071–2100. Według szacunków zagregowanych dla czterech RCM, w latach 1971–2000 pszenica w okresie wznowienia wegetacji – kłoszenia miała najwyższe wymagania cieplne w zachodniej Polsce ($511\text{--}540^{\circ}\text{C}_d$), natomiast najniższe – w północnej i północno-wschodniej Polsce ($431\text{--}460^{\circ}\text{C}_d$) (rys. 9; rys III w aneksie). W latach 2021–2050 w zachodniej Polsce strefa z wymaganiami cieplnymi pszenicy w zakresie $511\text{--}540^{\circ}\text{C}_d$ znacząco powiększy się w porównaniu ze strefą widoczną na mapie dla okresu 1971–2000. Według danych modeli KNMI ECHAM i MPI ECHAM, w tej perspektywie czasowej w południowo-zachodniej Polsce wyróżnia się już obszar z wymaganiami cieplnymi od 541 do 570°C_d . W północnej części Polski na skutek wzrostu wymagań cieplnych pszenicy zanika strefa z wymaganiami $431\text{--}460^{\circ}\text{C}_d$. Widoczna jest natomiast w dalszym ciągu w tym regionie, lecz na mniejszym obszarze niż w latach 1971–2000, strefa z wymaganiami cieplnymi w zakresie $461\text{--}490^{\circ}\text{C}_d$. W latach 2071–2100 wymagania cieplne pszenicy w okresie wznowienia wegetacji – kłoszenia na znaczącym obszarze Polski wyniosą $541\text{--}570^{\circ}\text{C}_d$. Na północnych obszarach kraju wymagania cieplne pszenicy w okresie wznowienia wegetacji – kłoszenia przekroczą 510°C_d , czyli osiągną wartość notowaną w latach 1971–2000 w południowo-zachodniej Polsce (rys. 9; rys. III w aneksie).

W latach 2021–2050 zmiany wymagań cieplnych pszenicy w Polsce, według analiz zagregowanych dla czterech modeli klimatycznych, nie wykazują wyraźnych tendencji regionalnych. Modele KNMI ECHAM i MPI ECHAM wskazują na większe zmiany wymagań cieplnych pszenicy w zachodniej ($31\text{--}40^{\circ}\text{C}_d$) niż we wschodniej Polsce ($11\text{--}20^{\circ}\text{C}_d$). W latach 2071–2100 wystąpią już wyraźne różnice w skali zachodzących zmian na zachodzie ($61\text{--}70^{\circ}\text{C}_d$) i wschodzie kraju ($31\text{--}40^{\circ}\text{C}_d$). Większe zróżnicowanie zmian w tej perspektywie czasowej przedstawiają scenariusze zbudowane z wykorzystaniem modelu globalnego ARPEGE niż ECHAM, natomiast większy zakres zmian prognozują modele ECHAM niż ARPEGE (rys. 10; rys. IV w aneksie).

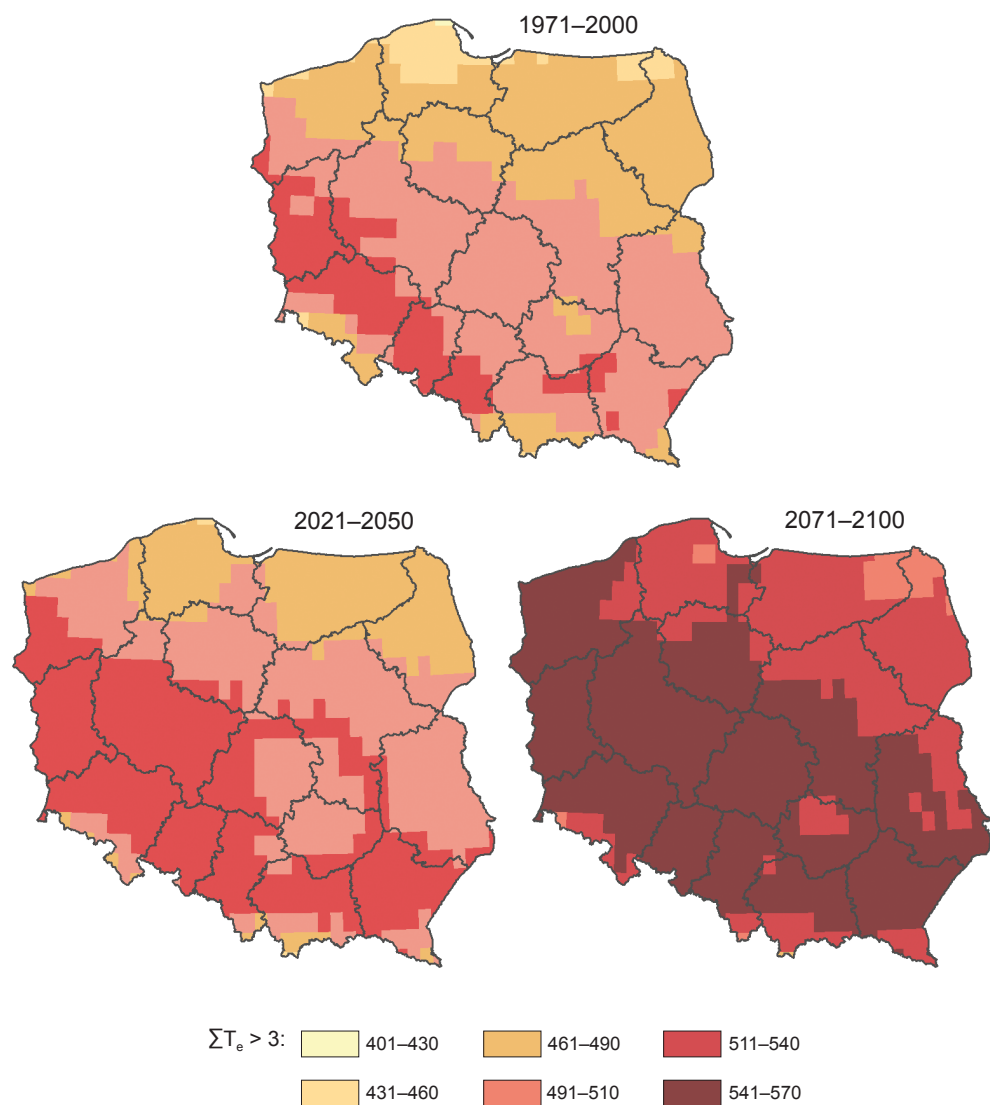
W latach 1971–2000 największymi wymagania cieplnymi w okresie od wznowienia wegetacji do kłoszenia żyta ($311\text{--}340^{\circ}\text{C}_d$) charakteryzował się obszar południowo-zachodniej Polski. Najniższe wymagania cieplne żyta stwierdzono na Pojezierzu Kaszubskim, gdzie nie przekraczały one 250°C_d . W latach 2021–2050 obszar z wymaganiami cieplnymi w zakresie $311\text{--}340^{\circ}\text{C}_d$ powiększy się i obejmie znaczący obszar południowo-zachodniej Polski. Na północy kraju zmniejszy się natomiast obszar z wymaganiami cieplnymi dla żyta z zakresu $251\text{--}280^{\circ}\text{C}_d$.

W latach 2071–2100 w południowo-zachodniej Polsce wymagania cieplne żyta osiągną wartość od 371 do 400°C_d, a na północnym wschodzie Polski – od 281 do 310°C_d (rys. 11; rys. V w aneksie).

Wzrost wymagań cieplnych żyta, według zagregowanej analizy czterech modeli klimatycznych, w północno-wschodniej Polsce w latach 2021–2050 wyniesie około 10°C_d, co potencjalnie o 1 dzień wydłuży okres wznowienie wegetacji – kłoszenie. Na pozostałym obszarze Polski szacowany wzrost wymagań cieplnych wyniesie od 11 do 20°C_d, przez co wydłuży się okres od wznowienia wegetacji do kłoszenia o ok. 2 dni. W zachodniej części Polski większy wzrost wymagań cieplnych prognozują w tej perspektywie czasowej modele MPI ECHAM i KNMI ECHAM (31–40°C_d). W latach 2071–2100 widoczne są bardzo wyraźne różnice we wzroście wymagań cieplnych żyta pomiędzy obszarami Polski zachodniej i wschodniej. Na wschodzie Polski wzrost wymagań cieplnych osiągnie 31–40°C_d, a na zachodzie 61–70°C_d, czyli prawie dwukrotnie więcej. Należy zauważyć, że model MPI ECHAM wskazuje na wzrost wymagań cieplnych w całym kraju od 61 do 70°C_d (rys. 12; rys. VI w aneksie).

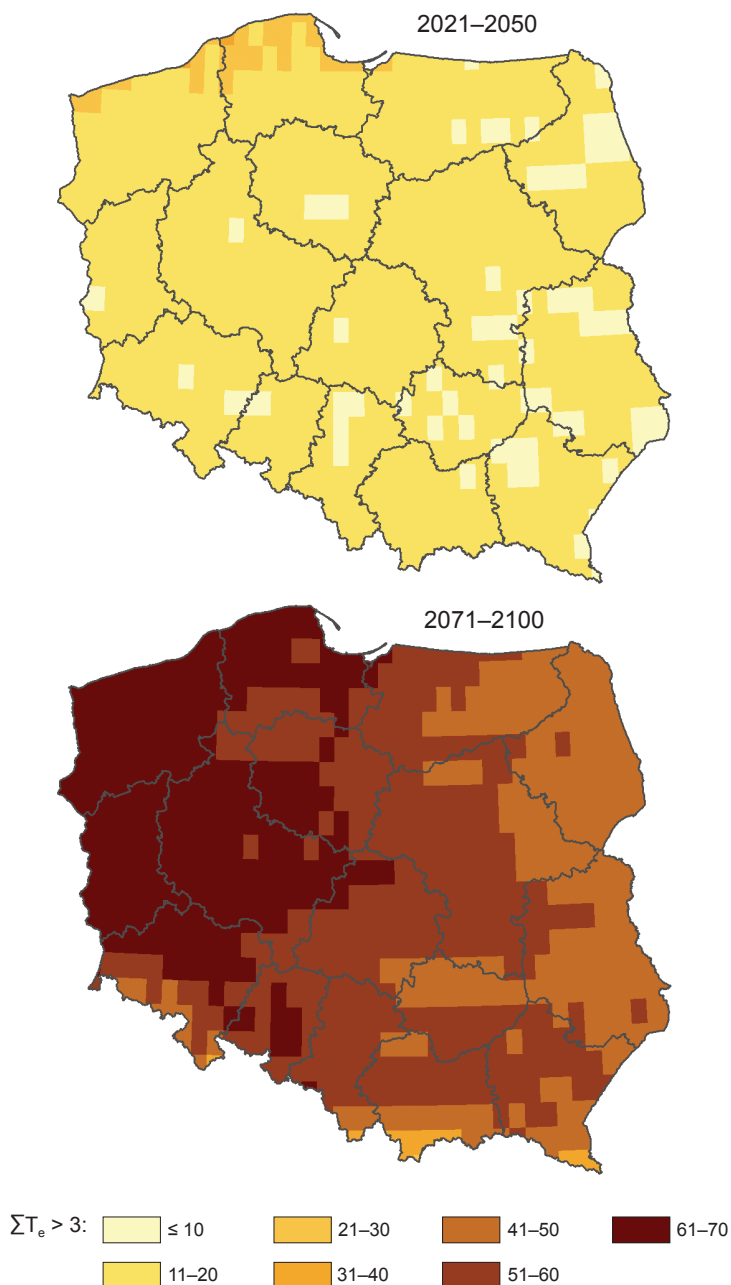
Wymagania cieplne jęczmienia w latach 1971–2000, według czterech analizowanych modeli klimatycznych, wynosiły w południowej i południowo-zachodniej Polsce od 341 do 370°C_d. W północnej i północno-wschodniej Polsce wymagania te kształtowały się w zakresie 265–310°C_d. W latach 2021–2050 w południowo-zachodniej Polsce zaznacza się już obszar z wymaganiami cieplnymi dla jęczmienia od 371 do 400°C_d, a na północy Polski – od 311 do 340°C_d. Znaczący wzrost wymagań cieplnych jęczmienia w Polsce nastąpi w perspektywie lat 2071–2100. W południowo-zachodniej części kraju wymagania cieplne jęczmienia wyniosą 431–460°C_d. Według szacunków dla modelu MPI ECHAM, wymagania te mogą osiągnąć wartości 461–490°C_d. W regionie północnym Polski wymagania cieplne jęczmienia w okresie od wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 2071–2100 osiągną wartości w zakresie 341–370°C_d, będą więc zbliżone do takich, jakie występowały w południowo-zachodniej Polsce w latach 1971–2000 (rys. 13).

Podobnie jak w przypadku analizy różnic regionalnych wzrostu wymagań cieplnych pszenicy i żyta, obraz średnich zmian w latach 2021–2050 nie wykazuje dużych różnic regionalnych. Scenariusze zbudowane na modelu globalnym ECHAM wskazują natomiast już w tej perspektywie czasowej tendencję do większych zmian na zachodzie niż na wschodzie Polski. Tendencja ta jest już bardzo wyraźna w obrazie zmian wymagań cieplnych jęczmienia dla okresu 2071–2100. Na zachodzie Polski w tej perspektywie czasowej wzrost wymagań cieplnych jęczmienia wyniesie 61–70°C_d, natomiast na północnym-wschodzie od 31 do 50°C_d (rys. 14; rys. VII w aneksie).



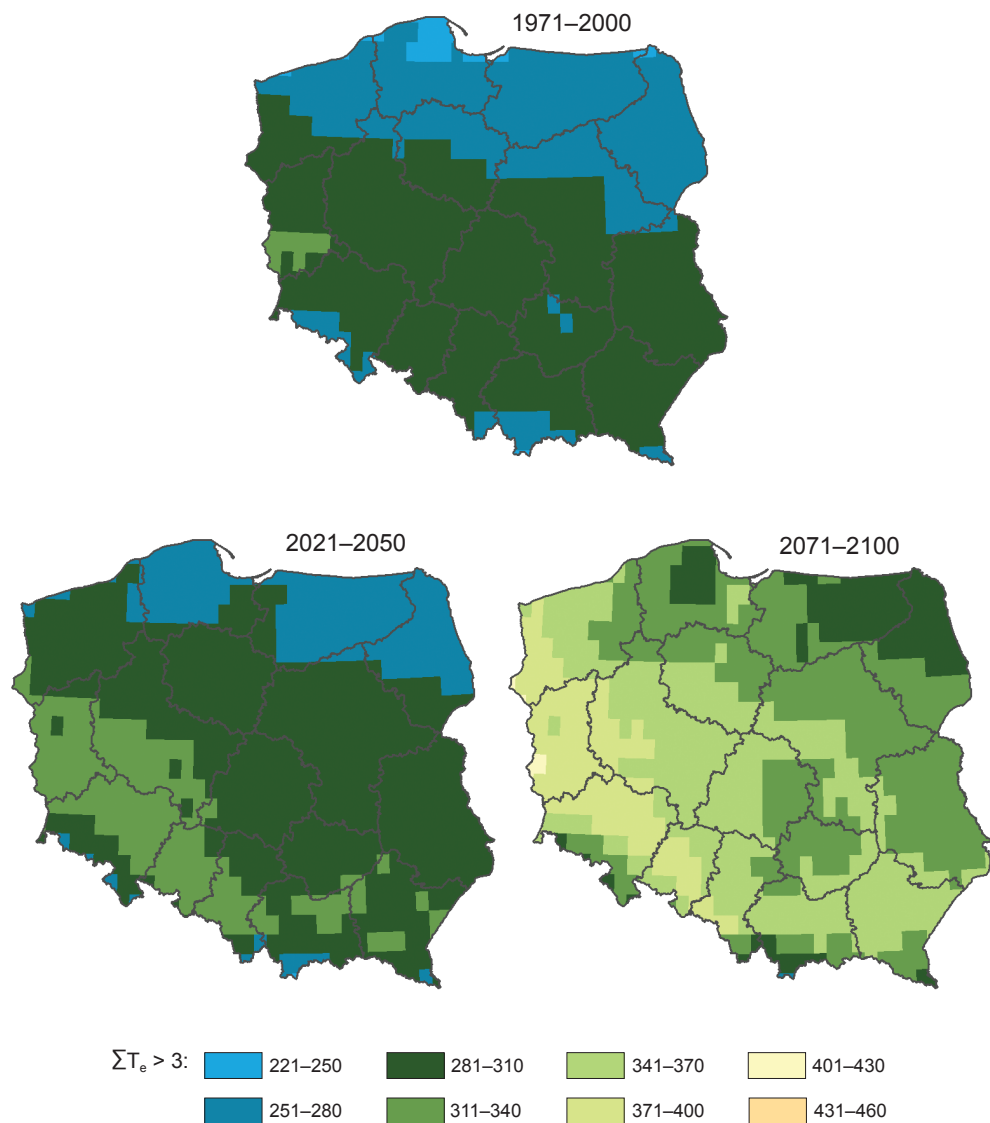
Rys. 9. Wymagania cieplne pszenicy ozimej ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM

Temperature requirements of winter wheat during ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data



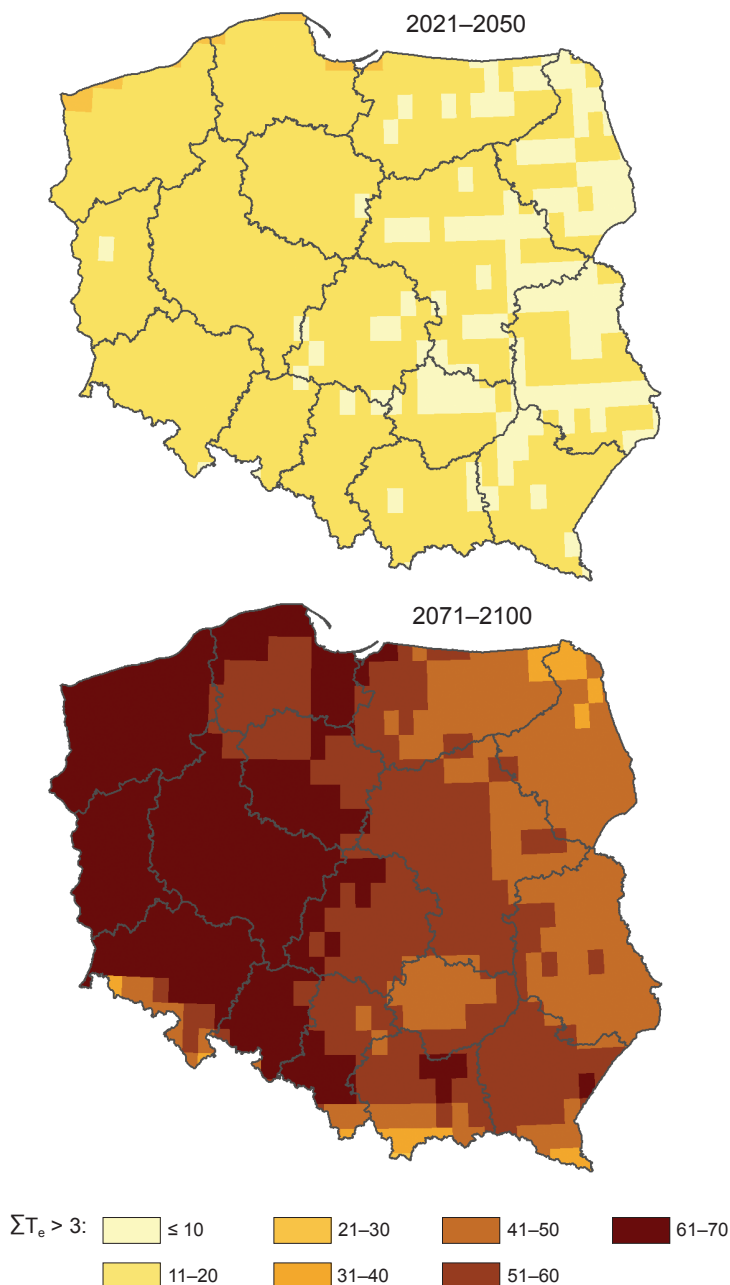
Rys. 10. Zmiana wymagań cieplnych pszenicy ozimej ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM

Change in the temperature sum requirements of winter wheat ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios



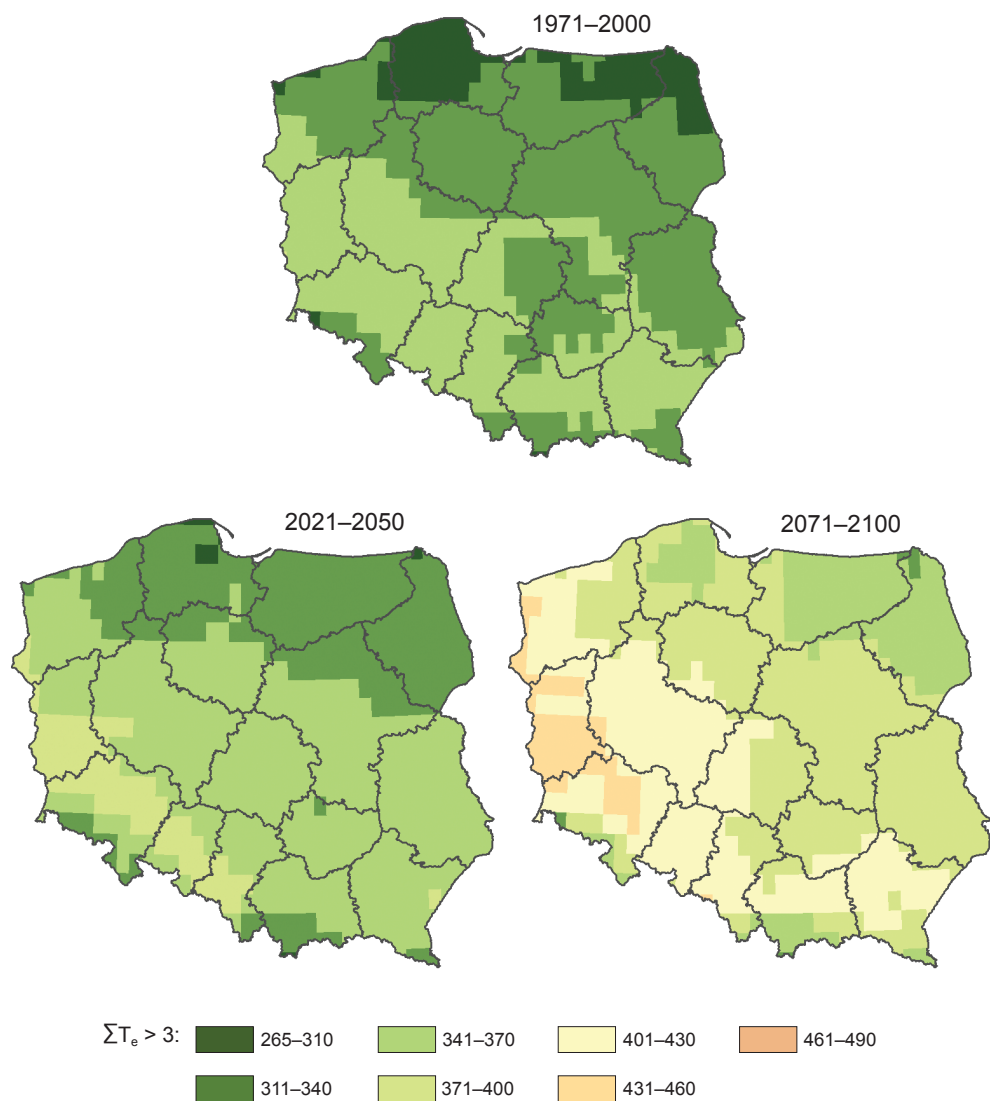
Rys. 11. Wymagania cieplne żyta ozimego ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM

Temperature requirements of winter rye ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data



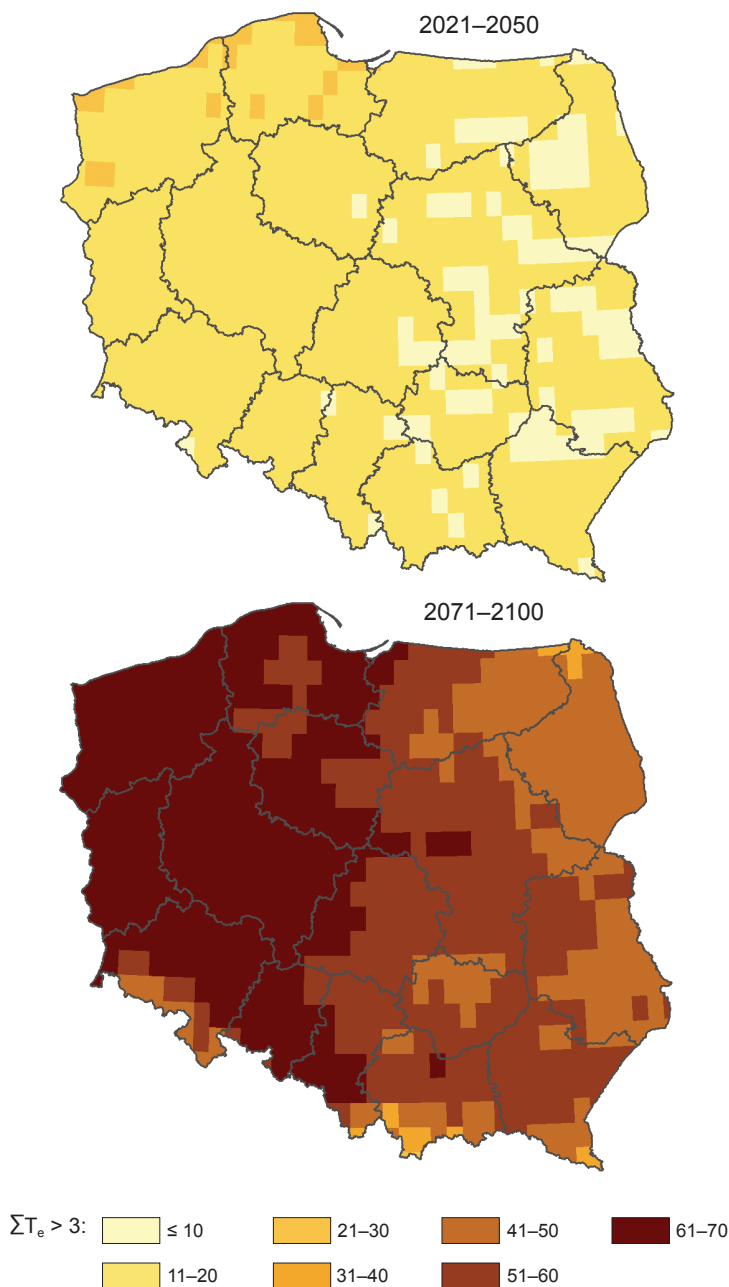
Rys. 12. Zmiana wymagań cieplnych żyta ozimego ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM

Change in the temperature sum requirements of winter rye ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios



Rys. 13. Wymagania cieplne jęczmienia ozimego ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM

Temperature requirements of winter barley ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data



Rys. 14. Zmiana wymagań cieplnych jęczmienia ozimego ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM

Change in the temperature sum requirements of winter barley ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios

4.3.4. Zmiana terminów fenofaz

Kłoszenie

Średni termin kłoszenia pszenicy w Polsce w latach 1971–2000, według danych czterech modeli klimatycznych, wyznaczono na 3 czerwca, żyta na 15 maja, a jęczmienia na 20 maja. W prognozowanych warunkach klimatycznych w latach 2021–2050 nastąpi czterodniowe przyśpieszenie terminu kłoszenia analizowanych zbóż. Dla pszenicy wystąpi on 30 maja, żyta – 11 maja, jęczmienia – 16 maja. W latach 2071–2100 przyśpieszenie terminu kłoszenia względem lat 1971–2000 w przypadku jęczmienia i żyta wyniesie 9 dni, a pszenicy 10 dni. Średni termin kłoszenia żyta i jęczmienia w Polsce w latach 2071–2100 wystąpi odpowiednio: 6 i 11 maja, natomiast pszenicy – 24 maja (tab. 15).

W latach 1971–2000 w południowej części województwa lubuskiego pszenica osiągała kłoszenie w dniach od 26 do 31 maja, w północnej Polsce – po 6 czerwca. Na przeważającym obszarze Polski termin kłoszenia tego zboża występował od 1 do 6 czerwca. W warunkach klimatycznych prognozowanych na lata 2021–2050 w centralnej Polsce kłoszenie pszenicy ma występować w dniach od 26 do 31 maja, natomiast w północnej Polsce oraz na wyżynach i obszarach podgórskich – po 1 czerwca. W latach 2071–2100 w centralnej Polsce termin kłoszenia pszenicy ma występować od 21 do 25 maja, a na północnych obszarach i wyżynach – od 26 do 31 maja. Na niewielkim obszarze województwa lubuskiego kłoszenie pszenicy będzie występować przed 20 maja (rys. 15).

W latach 1971–2000 na zachodzie i w centralnej Polsce termin kłoszenia żyta przypadał w dniach od 11 do 15 maja, na pozostałym obszarze – od 16 do 31 maja. W latach 2021–2050 na zachodzie kraju termin kłoszenia żyta ma być notowany w dniach od 6 do 10 maja. Na przeważającym obszarze kraju kłoszenie nastąpi w dniach od 11 do 15 maja, natomiast w województwie pomorskim oraz na obszarach górskich – od 16 do 25 maja. W latach 2071–2100 kłoszenie żyta w zachodniej Polsce będzie notowane w dniach od 1 do 5 maja, natomiast na większości obszaru Polski – od 6 do 10 maja (rys. 17).

Termin kłoszenia jęczmienia w latach 1971–2000 w południowo-zachodniej i centralnej Polsce był notowany w dniach od 16 do 20 maja, natomiast w północnej części województwa pomorskiego i na obszarach górskich – od 1 do 5 czerwca. W warunkach klimatycznych prognozowanych na lata 2021–2050 kłoszenie jęczmienia w zachodniej Polsce ma następować w dniach od 11 do 15 maja, a na przeważającym obszarze Polski w dniach od 16 do 20 maja. W północnej części województwa pomorskiego, na obszarach wyżynnych i górskich jęczmień będzie kłosił się w dniach od 21 do 31 maja. W perspektywie klimatycznej lat 2071–2100 jęczmień ma osiągać fazę kłoszenia w zachodniej Polsce w dniach od 5 do 10 maja, a na przeważającym obszarze Polski – od 11 do 15 maja (rys. 19).

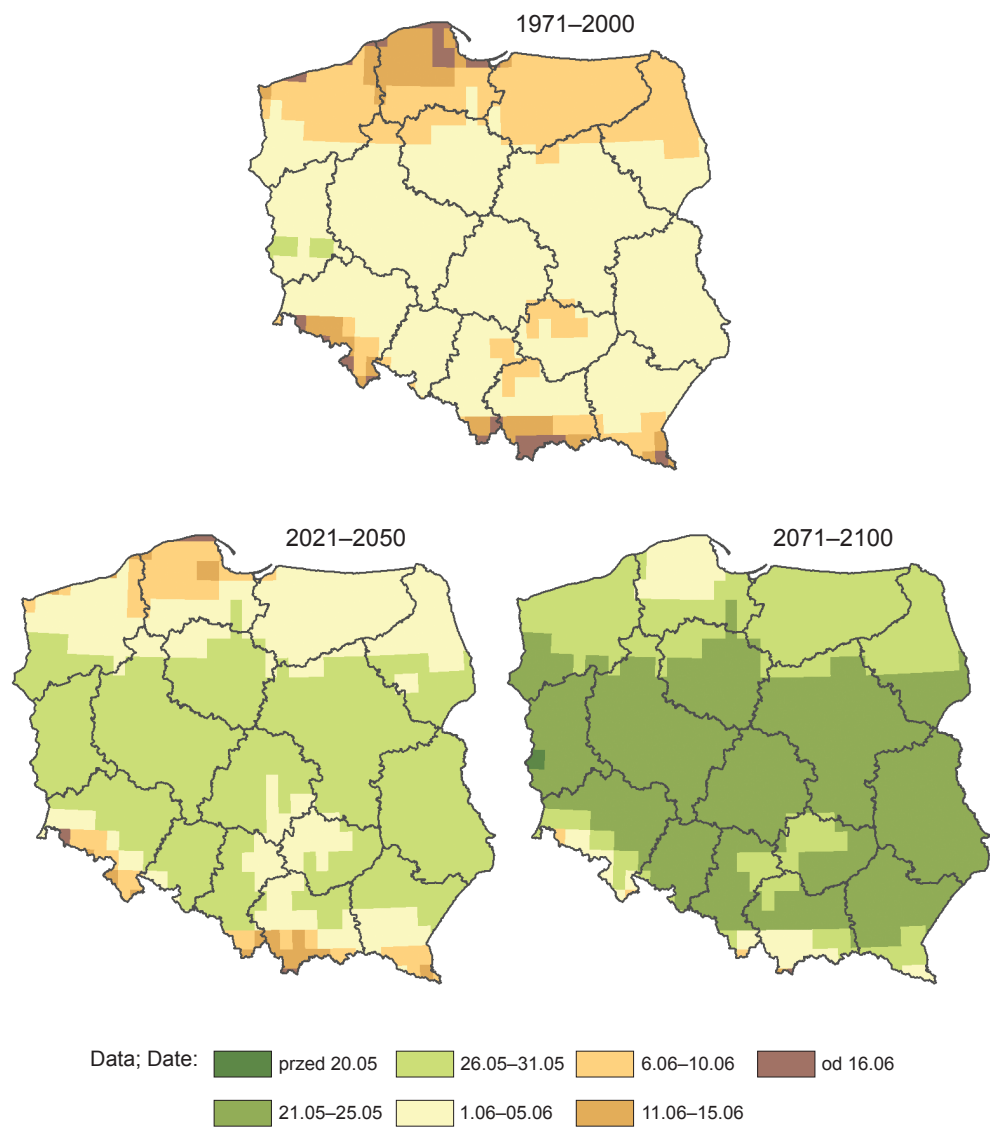
W perspektywie lat 2021–2050 ocena zmian terminu kłoszenia analizowanych zbóż w Polsce według czterech analizowanych modeli nie wskazuje wyraźnych różnic geograficznych. W latach 2071–2100 większe zmiany terminu kłoszenia stwierdzono na północy i południu (11–15 dni) niż w centralnej części Polski (9–10 dni) (rys. X, XII, XIV w aneksie). Największe zmiany w terminie kłoszenia analizowanych zbóż w perspektywie lat 2071–2100 nastąpią według modelu RM ARPEGE, a najmniejsze według modelu DMI ARPEGE (rys. 16, 18 i 20; rys. X, XII, XIV w aneksie).

Tabela 15

Średni termin kłoszenia pszenicy ozimej (P), żyta ozimego (Z) i jęczmienia ozimego (J) w Polsce określony według opracowanych modeli fenologicznych (tab. 9) i danych RCM dla lat 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100

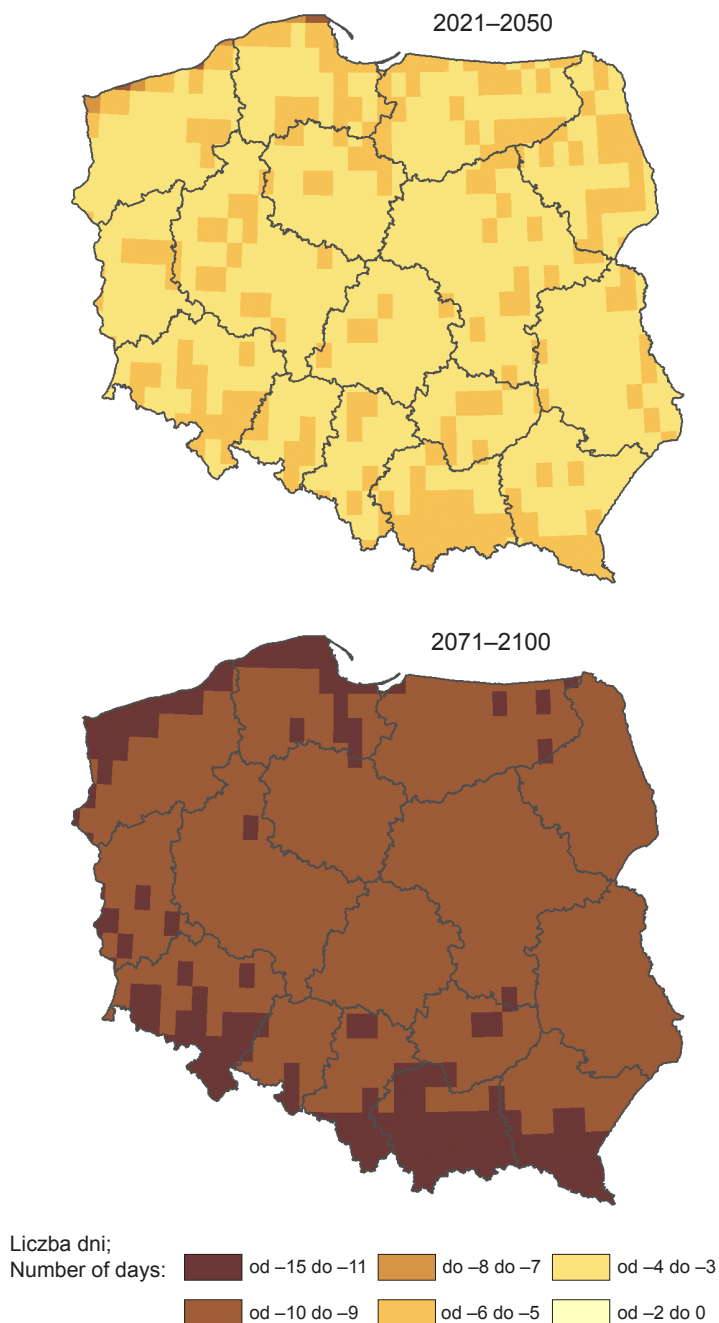
The average heading date for winter wheat (P), winter rye (Z) and winter barley (J) in Poland according to the evaluated phenological models (table 9) RCM data in the period 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100

Roślina uprawna; Crop	Okres; Period	RCM				Średnia; Average
		RM ARPEGE	DMI ARPEGE	MPI ECHAM	KNMI ECHAM	
P	1971–2000	4.06	3.06	3.06	3.06	3.06
	2021–2050	28.05	31.05	31.05	30.05	30.05
	2071–2100	24.05	26.05	24.05	24.05	24.05
Z	1971–2000	16.05	16.05	15.05	15.05	15.05
	2021–2050	10.05	12.05	12.05	11.05	11.05
	2071–2100	6.05	8.05	6.05	6.05	6.05
J	1971–2000	21.05	21.05	20.05	20.05	20.05
	2021–2050	15.05	17.05	17.05	16.05	16.05
	2071–2100	11.05	13.05	11.05	11.05	11.05
zmiana względem okresu 1971–2000 (dni); change from 1971–2000 period (days)						
P	2021–2050	–7	–3	–3	–4	–4
	2071–2100	–11	–8	–10	–10	–10
Z	2021–2050	–6	–4	–3	–4	–4
	2071–2100	–10	–8	–9	–9	–9
J	2021–2050	–6	–4	–3	–4	–4
	2071–2100	–10	–8	–9	–9	–9

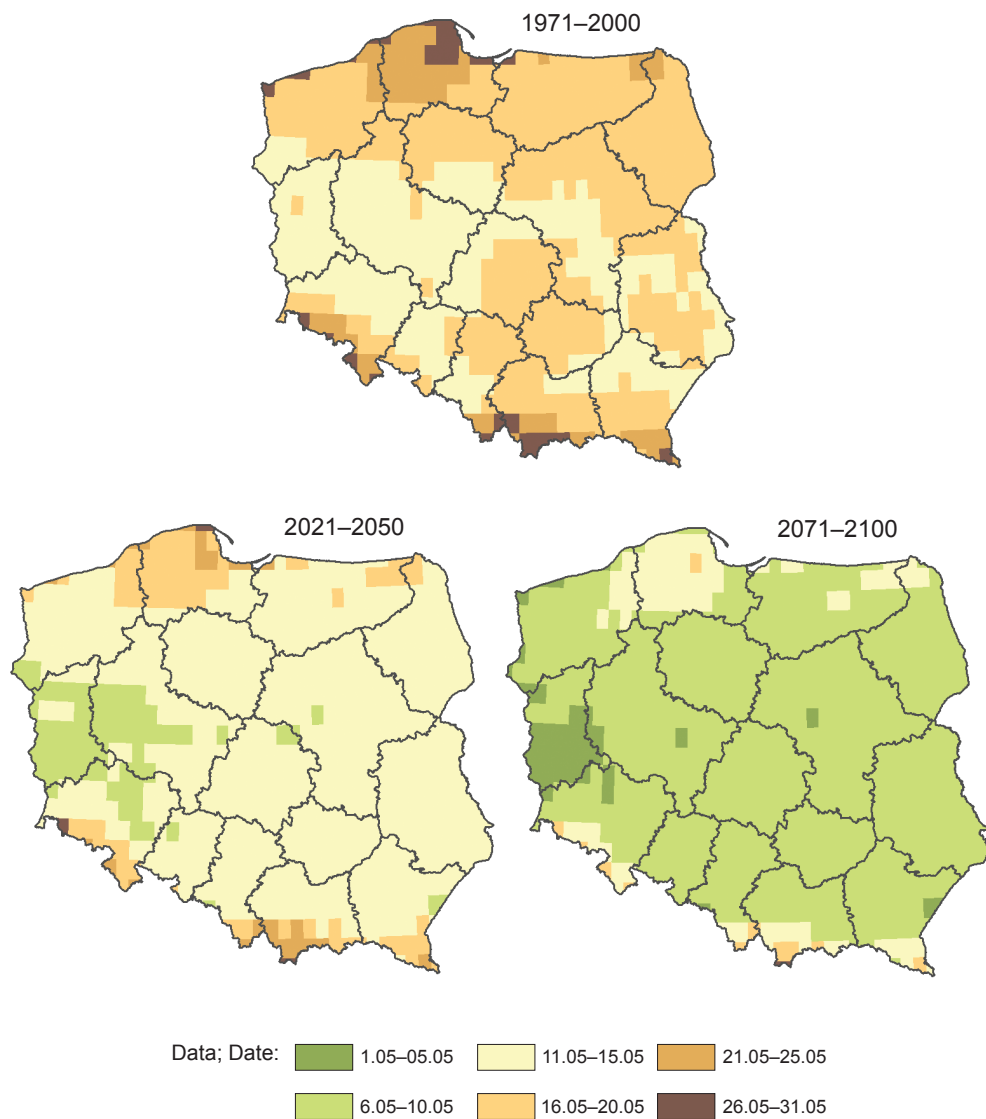


Rys. 15. Termin kłoszenia pszenicy ozimej w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM

The date of heading for winter wheat in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data

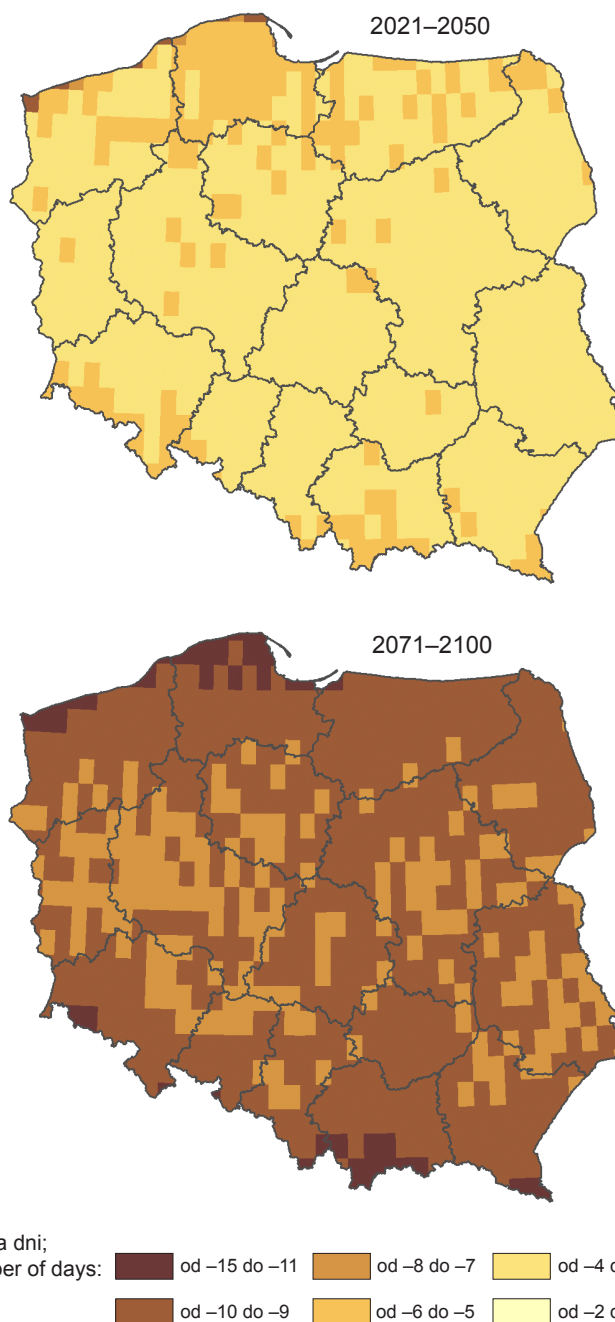


Rys. 16. Zmiana terminu kłoszenia pszenicy ozimej w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM
Change in the date of heading for winter wheat in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios

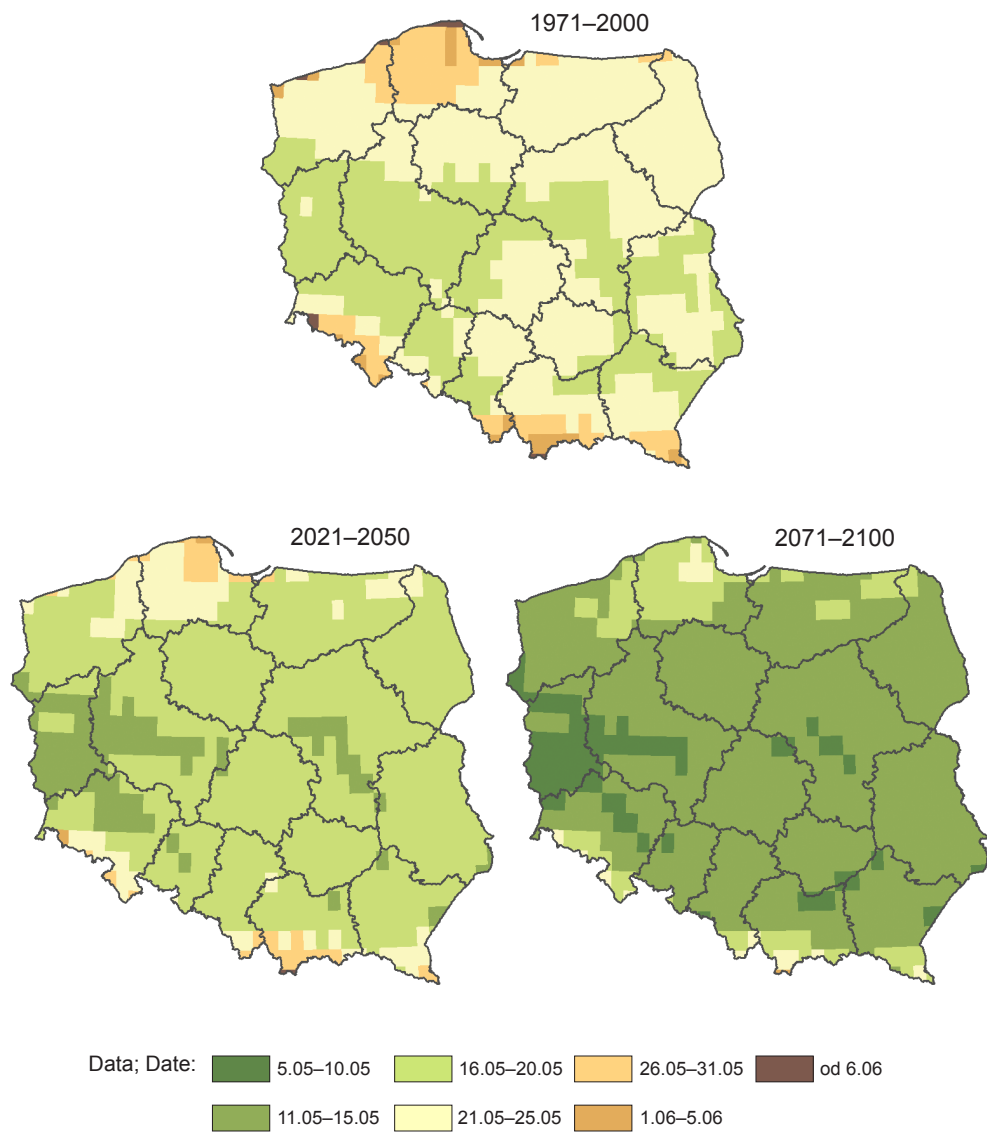


Rys. 17. Termin kłoszenia żyta ozimego w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM

The date of heading for winter rye in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data

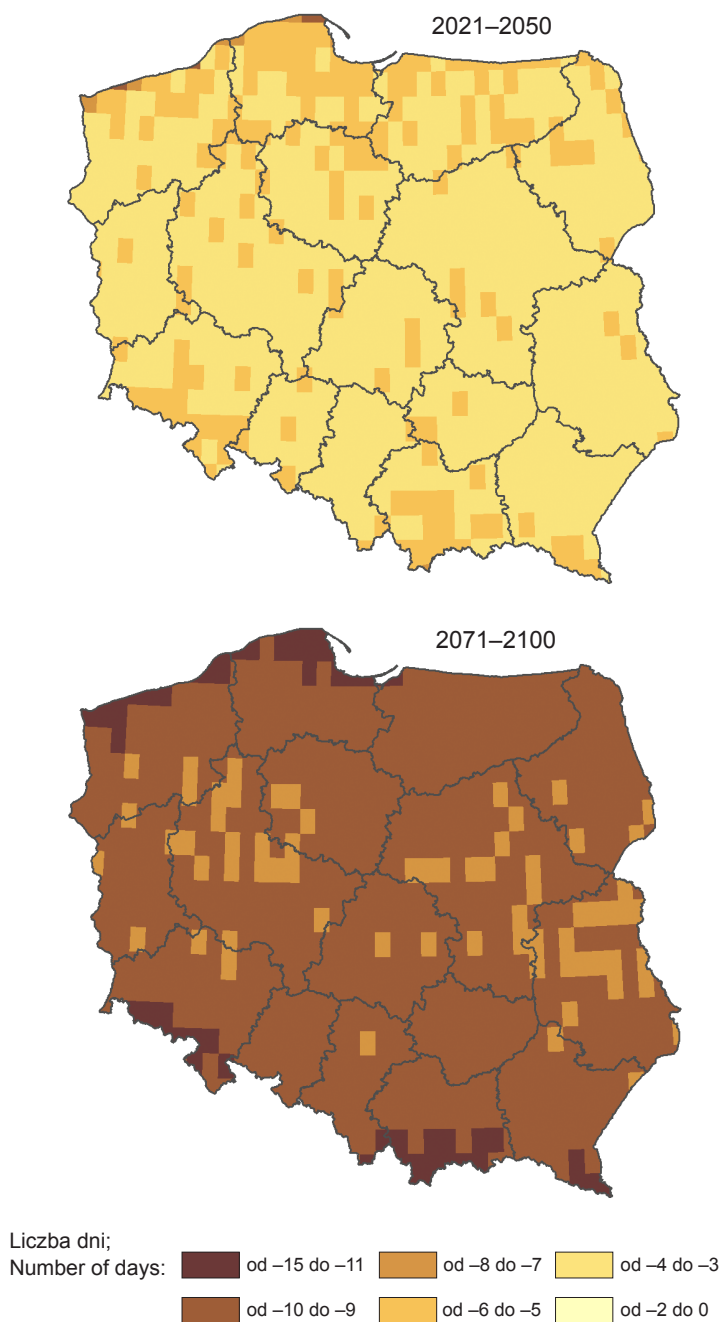


Rys. 18. Zmiana terminu kłoszenia żyta ozimego w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM
Change in the date of heading for winter rye in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to the period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios



Rys. 19. Termin kłoszenia jęczmienia ozimego w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM

The date of heading for winter barley in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data



Rys. 20. Zmiana terminu kłoszenia jęczmienia ozimego w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM
Change in the date of heading for winter barley in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to the period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios

Dojrzałość woskowa

Średni termin dojrzałości woskowej pszenicy w Polsce wyznaczony dla lat 1971–2000 określono na 27 lipca, żyta – 21 lipca, a jęczmienia – 5 lipca. Przeciętna zmiana tego terminu na obszarze Polski w latach 2021–2050 w przypadku pszenicy i żyta ma wynieść 5 dni, a jęczmienia 4 dni. W warunkach klimatycznych prognozowanych na lata 2021–2050 pszenica ma osiągać dojrzałość woskową 22 lipca, żyto – 16 lipca, jęczmień – 1 lipca. Średni termin dojrzałości woskowej w latach 2071–2100 wyznaczono odpowiednio na 13 lipca, 8 lipca i 23 czerwca. Przyspieszenie tego terminu względem lat 1971–2000 wyniesie więc dla pszenicy 14, żyta – 12, a dla jęczmienia – 11 dni (tab. 16).

W latach 1971–2000, według danych zagregowanych z czterech modeli klimatycznych, pszenica osiągała dojrzałość woskową w centralnej Polsce w dniach od 21 do 25 lipca, natomiast na północy Polski i na wyżynach – od 26 lipca do 5 sierpnia. W latach 2021–2050 dojrzałość woskowa pszenicy wystąpi na większości obszaru Polski o 4–6 dni wcześniej niż w latach 1971–2000. W centralnej Polsce pszenica ma osiągać dojrzałość woskową od 16 do 20 lipca, a na północy Polski – od 26 do 31 lipca. Przyspieszenie terminu dojrzewania pszenicy w warunkach klimatycznych prognozowanych na lata 2071–2100 na większości obszaru Polski wyniesie 9–10 dni. Na południowym wschodzie Polski, gdzie pszenica ma osiągać dojrzałość woskową najwcześniej, termin ten ma być notowany w dniach od 6 do 10 lipca, a w centralnej Polsce – od 11 do 15 lipca. W północnej części Polski dojrzałość woskowa pszenicy wystąpi w dniach od 1 do 5 sierpnia (rys. 21).

Według danych zagregowanych z czterech modeli klimatycznych, w latach 1971–2000 w centralnej Polsce żyto osiągało dojrzałość woskową w dniach od 16 do 20 lipca. W północnej części kraju i na wyżynach termin ten był późniejszy i wypadł w dniach od 21 do 31 lipca. W latach 2021–2050 żyto osiągnie dojrzałość woskową na znacznym obszarze Polski o 4–6 dni wcześniej niż w latach 1971–2000. Najmniejsze zmiany wystąpią w zachodniej Polsce (do 3 dni), a największe na obszarach górskich na południu Polski (7–9 dni). W centralnej i wschodniej Polsce dojrzałość woskowa będzie notowana od 6 do 10 lipca, a na północy i na obszarach górskich od 26 do 31 lipca. Przyspieszenie terminu dojrzałości woskowej żyta w warunkach klimatycznych prognozowanych na lata 2071–2100 na większości obszaru Polski wyniesie 10–13 dni w stosunku do lat 1971–2000. Na południowym wschodzie Polski pszenica ma osiągać dojrzałość woskową w dniach od 1 do 5 lipca, natomiast w centralnej i zachodniej Polsce – od 6 do 10 lipca (rys. 23).

Termin dojrzałości woskowej jęczmienia w warunkach klimatycznych w latach 1971–2000 w centralnej Polsce występował od 1 do 5 lipca, natomiast w północnej części Polski – po 6 lipca. W latach 2021–2050 jęczmień osiągnie dojrzałość woskową na większości obszaru Polski o 4–6 dni wcześniej niż w latach 1971–2000. W centralnej Polsce data dojrzałości woskowej jęczmienia będzie notowana od 26 do 30 czerwca, a na północy – od 11 do 15 lipca. Przyspieszenie terminu dojrzewania

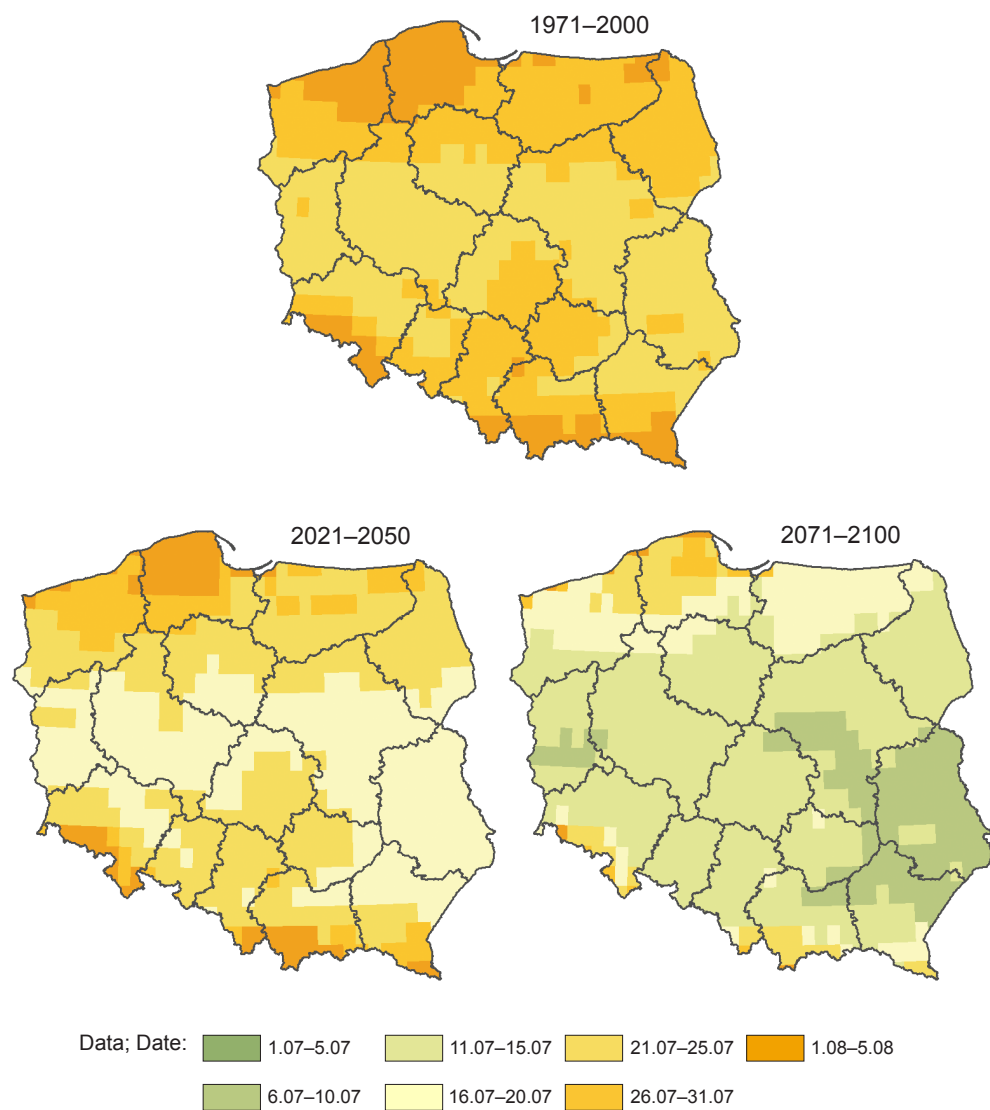
jęczmienia w warunkach klimatycznych w latach 2071–2100 na większości obszaru Polski wyniesie 10–13 dni. Na południowym wschodzie Polski, gdzie jęczmień podobnie jak żyto ma dojrzewać najwcześniej, termin dojrzałości ma być notowany od 15 do 20 czerwca. Na przeważającym obszarze Polski dojrzałość woskową jęczmienia osiągnie w dniach od 21 do 25 czerwca, natomiast w północnej części Polski – od 1 do 10 lipca (rys. 25).

Podobnie jak w przypadku zmian w terminie kłoszenia analizowanych zbóż zgeneralizowany obraz zmian terminu dojrzałości nie wykazuje dużych różnic regionalnych (rys. XVI, XVIII, XX w aneksie). Największe zmiany terminu dojrzałości woskowej w przypadku pszenicy uzyskano dla danych modelu RM ARPEGE, który prognozuje w perspektywie lat 2071–2100 na północy i południu Polski przyspieszenie terminu dojrzałości woskowej w zakresie 11–15 dni. W przypadku żyta i jęczmienia największe przyspieszenie dojrzałości woskowej (14–15 dni) prognozują modele MPI ECHAM i DMI ARPEGE dla południowo-wschodniej Polski (rys. 22, 24 i 26; rys. XVI, XVIII, XX w aneksie).

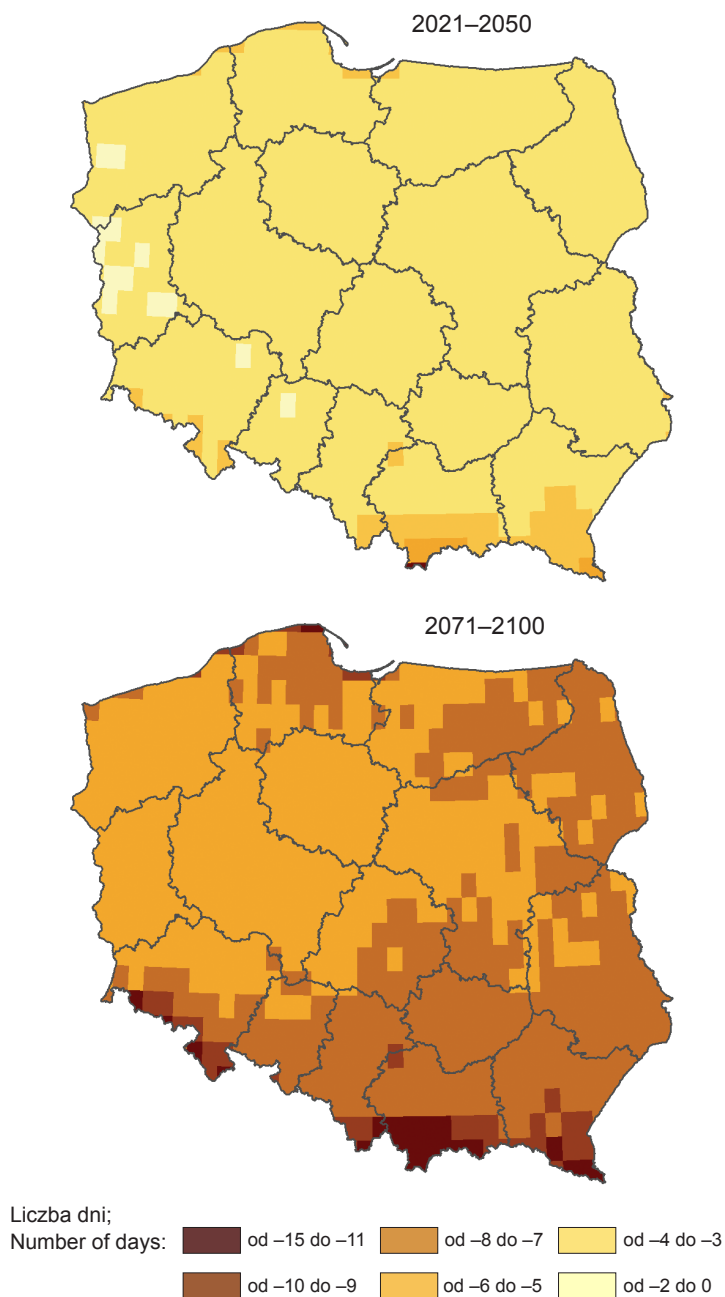
Tabela 16

Średnia data dojrzałości woskowej pszenicy ozimej (P), żyta ozimego (Z) i jęczmienia ozimego (J) w Polsce według uśrednionych danych RCM w latach 1971–2000, 2021–2050, 2071–2100 i opracowanego modelu wymagań termicznych
The average date of yellow ripeness for winter wheat (P), winter rye (Z) and winter barley (J) in Poland in the periods 1971–2000, 2021–2050, 2071–2100, according evaluated phenological models, and RCM data

Roślina uprawna; Crop	Okres; Period	RCM				Średnia; Average
		RM ARPEGE	DMI ARPEGE	MPI ECHAM	KNMI ECHAM	
P	1971–2000	27.07	27.07	27.07	27.07	27.07
	2021–2050	20.07	23.07	23.07	21.07	22.07
	2071–2100	13.07	16.07	13.07	11.07	13.07
Z	1971–2000	21.07	21.07	21.07	21.07	21.07
	2021–2050	14.07	18.07	17.07	16.07	16.07
	2071–2100	8.07	11.07	8.07	6.07	8.07
J	1971–2000	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07
	2021–2050	29.06	3.07	2.07	30.06	1.07
	2071–2100	23.06	26.06	23.06	22.06	23.06
zmiana względem okresu 1971–2000 (dni); change from 1971–2000 period (days)						
P	2021–2050	–7	–4	–4	–6	–5
	2071–2100	–14	–11	–14	–16	–14
Z	2021–2050	–7	–3	–3	–5	–5
	2071–2100	–13	–10	–12	–14	–12
J	2021–2050	–6	–2	–3	–5	–4
	2071–2100	–12	–9	–11	–13	–11

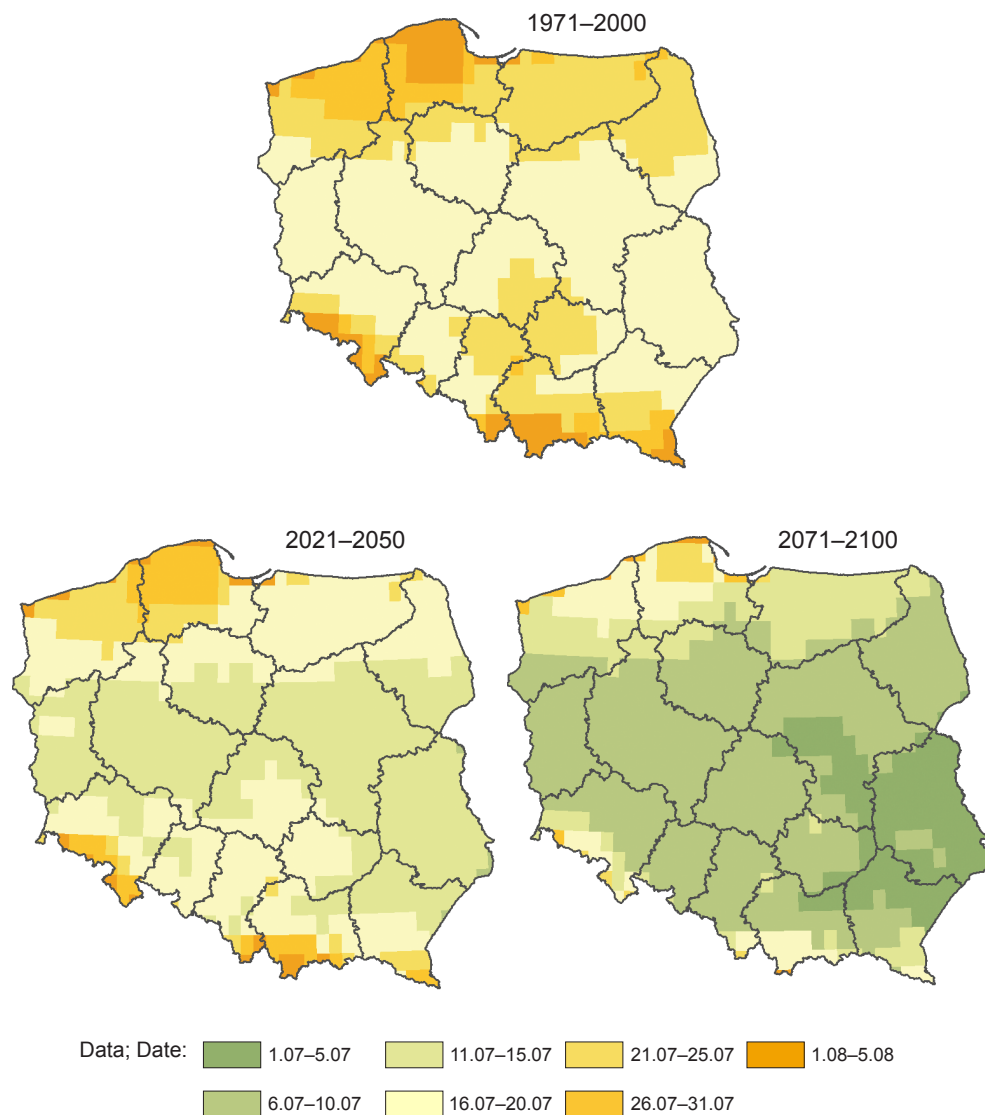


Rys. 21. Termin dojrzałości woskowej pszenicy ozimej w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM
The date of yellow ripeness for winter barley in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data



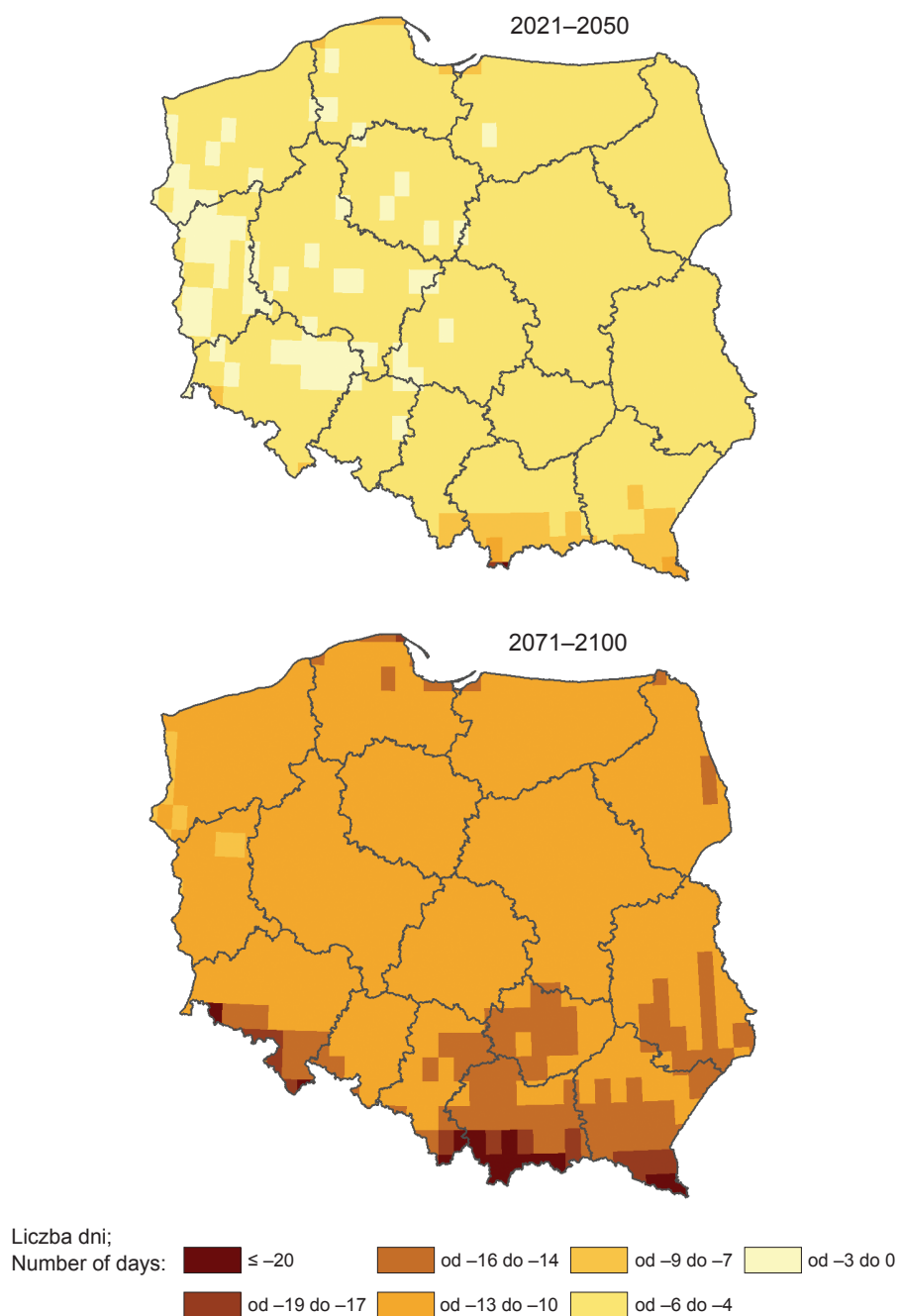
Rys. 22. Zmiana terminu dojrzności woskowej pszenicy ozimej w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM

Change in the date of yellow ripeness for winter wheat in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios

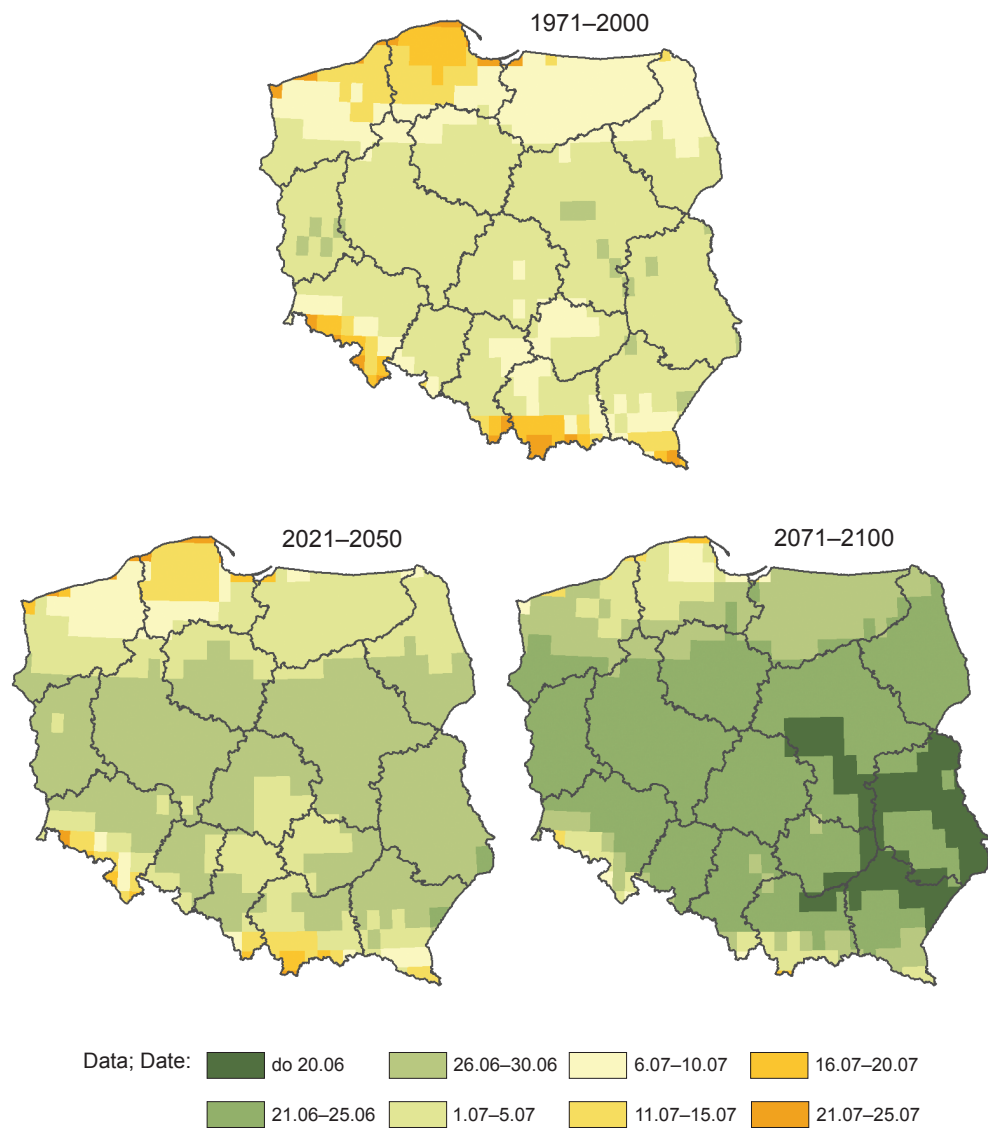


Rys. 23. Termin dojrzałości woskowej żyta ozimego w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM

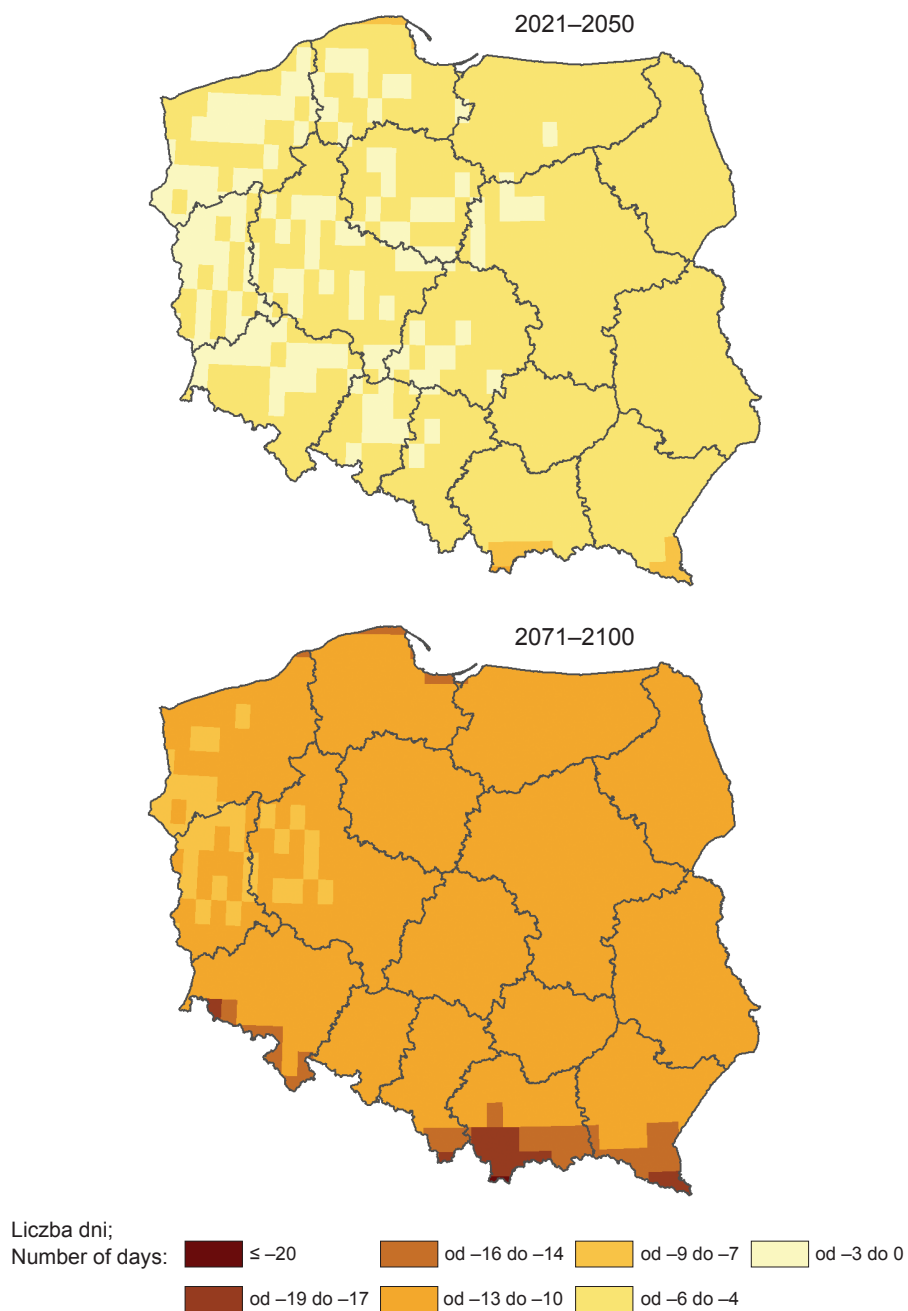
The date of yellow ripeness for winter rye in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data



Rys. 24. Zmiana terminu dojrzałości woskowej żyta ozimego w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM
Change in the date of yellow ripeness for winter rye in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios



Rys. 25. Termin dojrzałości woskowej jęczmienia ozimego w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100, wartość średnia dla analizowanych danych RCM
The date of yellow ripeness for winter barley in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, average for analyzed RCMs data



Rys. 26. Zmiana terminu dojrzałości woskowej jęczmienia ozimego w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000, wartość średnia dla analizowanych scenariuszy RCM
Change in the date of yellow ripeness for winter wheat in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to the period 1971–2000, average for evaluated RCMs scenarios

5. Dyskusja

5.1. Obserwowane zmiany w fenologii

Podstawowe pytanie dotyczące rolnictwa stawiane wobec globalnego ocieplenia atmosfery dotyczy zmian w fenologii roślin. Wskazuje się, że nastąpiło istotne przyspieszenie wiosennych faz fenologicznych roślin dzikorosnących oraz faz fenologicznych związanych z dojrzewaniem (Cleland i in. 2007). Dużo trudniejsza jest analiza zmian w fenologii roślin uprawnych, ponieważ w rolnictwie następuje szybka wymiana odmian, które mogą różnić się wymaganiami termicznymi (Menzel i in. 2006a). Tezę o potencjalnych zmianach wymagań termicznych nowych odmian zbóż ozimych w Polsce można zweryfikować poprzez porównanie sum temperatury efektywnej wyznaczonych we wcześniejszych modelach fenologicznych oraz określonych w tej pracy. W przypadku pszenicy i żyta porównanie wymagań termicznych odmian uprawianych w latach 1990–2011 odnosi się do okresu 1978–1984 (Deputat i Marcinkowska 1999a, 1999b i 1997), a jęczmienia do okresu 1970–1990 (Deputat i in. 1996). Zastosowano progi temperatury efektywnej wyznaczone w modelach dla odmian uprawianych przed 1990 r.

Przeprowadzona analiza nie wykazała znaczących różnic w sumach temperatury efektywnej potrzebnej do osiągnięcia poszczególnych fenofaz analizowanych zbóż ozimych (tab. 17). Dlatego można wnioskować, że stwierdzone zmiany w fenologii zbóż ozimych w Polsce w latach 1990–2011 są efektem zmienności temperatury, a nie wprowadzenia do uprawy nowych odmian zbóż ozimych. Porównanie długości okresów międzyfazowych wskazało natomiast, że okres wznowienie wegetacji – kłoszenie pszenicy i żyta był w latach 1991–2011 o 5 dni krótszy niż przed 1990 r. Okres wznowienie wegetacji – dojrzłość włoszowa w dwudziestoleciu 1991–2011 był w przypadku pszenicy o 9, żyta o 8, a jęczmienia o 3 dni krótszy niż przed 1990 r. Okres kłoszenie – dojrzłość włoszowa pszenicy w wieloleciu 1991–2011 był krótszy niż przed 1990 r. o 4 dni, natomiast żyta i jęczmienia – tylko o 1 dzień (tab. 17).

Minimalna długość serii pomiarowych przydatna do analiz zmian wieloletnich w fenologii zdaniem niektórych autorów nie powinna być krótsza niż 20 lat (Sparks i Tryjanowski 2005). Wykorzystanie w tym celu trendu liniowego nie zawsze jest przydatne z powodu znacznej zmienności serii czasowych terminów fenofaz (Sparks i Menzel 2002). Dlatego często odchodzi się od szacowania zmian czasowych z wykorzystaniem trendu liniowego na rzecz użycia średniej ruchomej (Górski 2006). Analizowana w tej pracy seria pomiarów fenologicznych spełnia minimalne kryterium długości ciągu. Do analizy tendencji zmian czasowych zastosowano trend liniowy stosowany zazwyczaj do analizy dłuższych szeregów czasowych, jednak analizę tę uzupełniono o zastosowanie nieklasycznych metod regresyjnych (Cleveland 1979, Primack i in. 2009). Wykorzystanie w pracy metody regresji lokalnej mocnej pozwoliło wykazać opóźnianie terminu wznowienia wegetacji zbóż ozimych w Polsce w latach 1991–1996. W tym czasie wykazano również tendencję

do skracania się okresu wznowienie wegetacji – kłoszenie, co wskazuje na działanie efektu fotoperiodycznego. Natomiast po 2003 r., gdy wykazano wcześniejsze wznowienie wegetacji, widoczny był efekt wydłużenia okresu od wznowienia wegetacji do kłoszenia zbóż ozimych. W przypadku zastosowania do oceny tylko trendu liniowego niemożliwe byłoby wykazanie zmian terminu wznowienia wegetacji pszenicy ozimej w latach 1991–2011 (rys. 27). Współczynnik kierunkowy regresji wskazuje na przyśpieszenie terminu wznowienia wegetacji o 0,8 dnia na 10 lat, jednak na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie jest to trend istotny. Natomiast analiza z wykorzystaniem metody regresji lokalnej mocnej wskazała od 1997 r. na wyraźny trend przyśpieszania tego terminu. Przykład ten pokazuje korzyści wynikające z uwzględnienia w pracy analiz z wykorzystaniem regresji lokalnej mocnej.

Tabela 17

Wymagania termiczne pszenicy ozimej (P), żyta ozimego (Z) i jęczmienia ozimego (J) w latach 1991–2010, wyznaczone dla progów termicznych określonych dla pszenicy ozimej przez Deputata i Marcinkowską (1999b), żyta ozimego przez Deputata i Marcinkowską (1997) i jęczmienia ozimego przez Deputata i in. (1996). Wartości pogrubione odnoszą się w przypadku pszenicy ozimej do okresu 1978–1984, żyta ozimego: 1978–1984, jęczmienia ozimego: 1970–1990

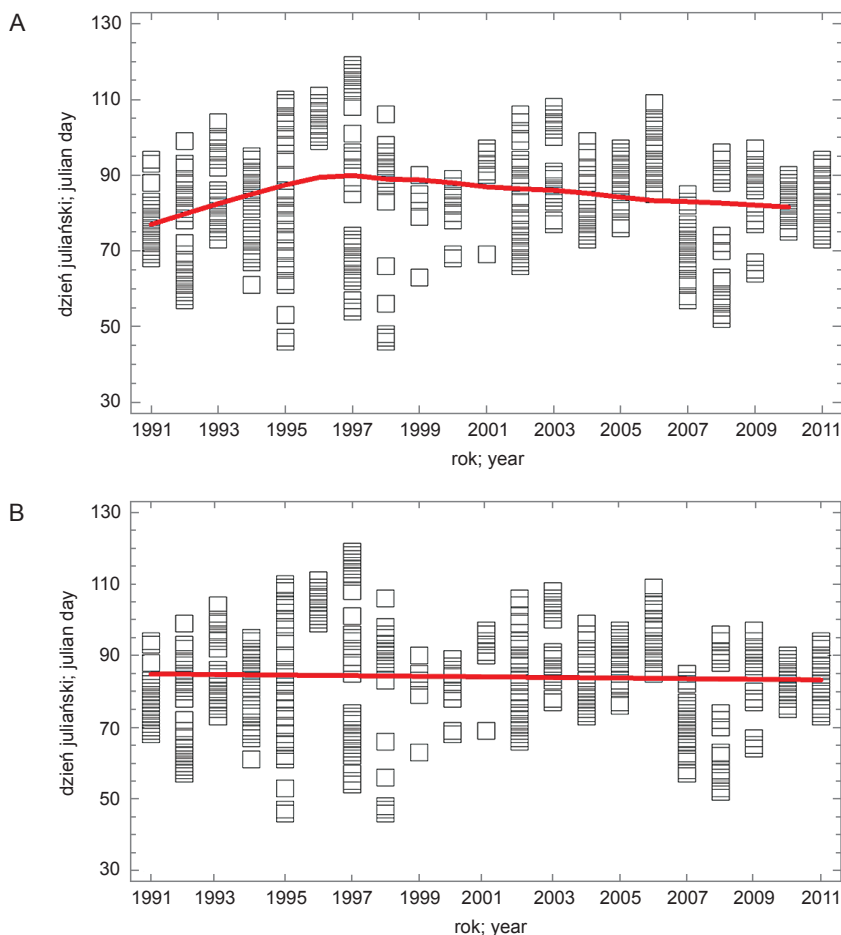
Temperature requirements of winter wheat (P), winter rye (Z) and winter barley (J) evaluated using temperature thresholds evaluated for winter wheat by Deputat and Marcinkowska (1999b), for winter rye by Deputat and Marcinkowska (1997), and winter barley evaluated by Deputat i in. (1999). In bold numbers were evaluated for experiments conducted for winter wheat in the period 1978–1984, for winter rye in the period 1978–1984, for winter barley for period 1970–1990

Okres rozwoju; Development period	U*	N	Data; Date	L	e	ΣT_e
Siew – wschody; Sowing – emergence	P	826 376	27.09–9.10 2.10–14.10	13 12	3	100 82
	Z	545 365	23.09–3.10 23.09–2.10	10 9	3	92 68
	J	618 459	18.09–29.09 b.d.	11 9	3	104 84
Wiosenne wznowienie wegetacji – kłoszenie; Spring vegetation renewal – heading	P	719 391	24.03–1.06 24.03–6.06	69 74	3	522 525
	Z	466 371	25.03–14.05 25.03–20.05	50 55	1	406 394
	J	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Wiosenne wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa; Spring vegetation renewal – yellow ripeness	P	708 389	24.03–19.07 24.03–28.07	117 126	4	1088 1088
	Z	461 354	25.03–17.07 25.03–25.07	114 122	4	1039 1021
	J	529 472	24.03–30.06 b.d.	98 101	3	908 905

cd. tab. 17

Okres rozwoju; Development period	U*	N	Data; Date	L	e	ΣT_e
Kłoszenie – dojrzałość woskowa; Heading – yellow ripeness	P	743 398	01.06–19.07 06.06–28.07	48 52	10	350 315
	Z	463 369	14.05–17.07 20.05–25.07	64 65	9	462 458
	J	496 369	18.05–30.06 b.d.	43 44	7	377 369

* U – roślina uprawna; crop, N – liczba doświadczeń; numer of experiments, L – średnia długość okresu (dni); mean length of the period (days), e – próg termiczny temperatury efektywnej (°C); temperature threshold for effective temperature (°C), ΣT_e – średnia suma temperatury efektywnej (°C); average sum of effective temperature (°C), b.d. – brak danych; no data

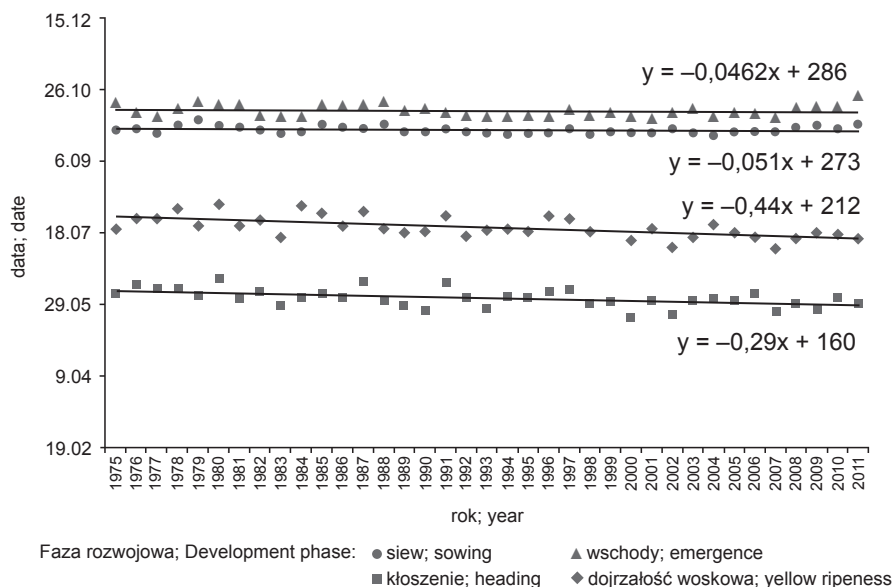


Rys. 27. Tendencje zmian terminu wznowienia wegetacji pszenicy ozimej w latach 1991–2011 wyznaczone metodą regresji lokalnej mocnej (A) i regresji liniowej (B)
Trends in spring vegetation renewal of winter wheat in the years 1991–2011 evaluated using robust locally regression (A), and linear regression (B)

Nieliniowość zależności terminów pojawów fenologicznych od temperatury utrudnia analizę wpływu ocieplenia na rozwój roślin na podstawie tylko analizy wartości średniej temperatury bez wykorzystania modeli (Sparks i Menzel 2006). Należy również oddzielnie analizować fazy fenologiczne bezpośrednio zależne od czynników klimatycznych (np. wznowienie wegetacji zbóż ozimych) od tych, na które bezpośredni wpływ ma decyzja rolnika, np. termin siewu (Menzel i in. 2006c). Wyznaczenie terminu siewu wymaga analizy warunków opadowych mających wpływ na plonowanie (Grabiński i in. 2007b), dlatego ocena potencjalnych zmian tego terminu w przyszłych warunkach klimatycznych nie może być wykonywana z wykorzystaniem tylko modeli fenologicznych. Uwzględniając ten warunek, analizę zmian terminu siewu i wschodów roślin ograniczono do danych obserwowanych. Analizy modelowe dla scenariuszy klimatycznych przeprowadzono natomiast dla faz fenologicznych po zimowej przerwie wegetacji, tj. wznowienie wegetacji, kłoszenie i dojrzałość woskowa. Jak udowodnili Mirschel i in. (2005), wyniki modelowania fenologii mogą być z dużą dokładnością ekstrapolowane w przestrzeni geograficznej.

Tendencje zmian w fenologii roślin uprawnych próbuje się oceniać na podstawie wieloletnich danych z doświadczeń odmianowych lub wyników obserwacji z sieci fenologicznych (Kalbarczyk i Kalbarczyk 2010, Siebert i Ewert 2012). Jako przykład takiej analizy, wydłużono ciąg obserwacyjny danych dla pszenicy ozimej z lat 1990–2011 o dane z okresu 1975–1989 (rys. 28). Obraz zmian w latach 1975–2011 wskazuje na nieistotne przesunięcie terminu siewu i wschodów pszenicy ozimej, natomiast znaczące przyśpieszanie terminu dojrzałości woskowej (4,4 dnia na 10 lat) i kłoszenia (2,9 dnia na 10 lat). Dłuższa seria czasowa nie potwierdziła więc istotnych trendów przyśpieszania terminu siewu i wschodów uzyskanych dla wielolecia 1991–2011. Oszacowane tendencje w fenologii dla lat 1975–2011 są zbliżone do wykazanych w innych pracach w Europie (Estrella i in. 2007, García-Mozo i in. 2010). Na przykład w latach 1959–2009 w Niemczech na podstawie analizy trendu liniowego dużej bazy danych obserwacyjnych wykazano, że faza dojrzałości woskowej owsa przypada obecnie o 17 dni wcześniej niż na początku lat 60. XX w., natomiast faza od siewu do dojrzałości woskowej jest obecnie o 14 dni krótsza. Przyśpieszenie kłoszenia owsa w Niemczech wynosi 1,8, dojrzałości woskowej – 3,2, natomiast terminu zbiorów – 2,1 dnia na dekadę (Siebert i Ewert 2012).

Mapy terminu kłoszenia i dojrzałości woskowej analizowanych zbóż opracowane z wykorzystaniem modeli fenologicznych dla danych RCM z wielolecia 1971–2000 nawiązują do zróżnicowania przestrzennego wykazanego na mapach dla materiałów obserwacyjnych (Korpalska-Chabior 2001, Koźmiński 2001, Michalska 2001). Porównanie terminów kłoszenia i dojrzałości woskowej na tych mapach wskazuje, że w latach 1971–2000 są one o 5 dni wcześniejsze niż na mapach dla okresu 1966–1985 w odniesieniu do pszenicy i dla okresu 1971–1990 odnośnie żyta i jęczmienia ozimego (tab. 18).



Rys. 28. Przebieg zmian terminów fenofaz pszenicy ozimej w Polsce w latach 1975–2011
The course of winter wheat phenophases in Poland in the period 1975–2011

Tabela 18

Terminy kłoszenia i dojrzałości woskowej pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego wykazane na mapach opracowanych z wykorzystaniem modeli fenologicznych dla danych RCM z lat 1971–2000 oraz odczytanych (wartości pogrubione) z map dla pszenicy ozimej z lat 1966–1985 (Koźmiński 2001), z lat 1971–1990 dla żyta ozimego (Korpalską-Chabior 2001) i jęczmienia ozimego (Michalska 2001)

The dates of heading and yellow ripeness of winter wheat, winter rye and winter barley based on the maps evaluated using developed phenological models, and RCM data for the years 1971–2000, and from the maps evaluated based on observed data (values in bold) for winter wheat in the period 1966–1985 (Koźmiński 2001), and winter rye (Korpalską-Chabior 2001), and winter barley (Michalska 2001) for the period 1971–1990

Roślina uprawna; Crop	Kłoszenie; Heading		Dojrzałość woskowa; Yellow ripeness	
	C*	N-E	C	N-E
Pszenica ozima; Winter wheat	01.06–05.06 06.06–10.06	06.06–10.06 11.06–16.06	20.07–25.07 26.07–30.07	26.07–31.07 31.07–5.08
Żyto ozime; Winter rye	11.05–15.05 16.05–20.05	16.05–20.05 21.05–25.05	16.07–20.07 21.07–25.07	21.07–25.07 31.07–5.08
Jęczmień ozimy; Winter barley	15.05–20.05 21.05–25.05	21.05–25.05 26.05–31.05	01.07–05.07 01.07–05.07	06.07–10.07 11.07–15.07

* C – Polska Centralna; Central Poland, N-E – Polska północno-wschodnia; the north-eastern Poland

5.2. PROGNOZOWANE ZMIANY W FENOLOGII

W pierwszych pracach dotyczących wpływu zmiany klimatu na rolnictwo w XXI w. w Polsce prognozowano, że zboża ozime w warunkach podwojenia zawartości dwutlenku węgla w atmosferze będą dojrzewać o ok. 2 tygodnie wcześniej niż w latach 90. XX w. (Bis i in. 1993). Wykorzystywane w tym czasie scenariusze klimatyczne wskazywały jednoznacznie na przyspieszenie terminu wznowienia wegetacji (Bis i in. 1993, Kędziora 1995, Deputat 1999), dlatego zmiany w fenologii miały być umiarkowane. Większość prac dotyczących wpływu zmian klimatu na fenologię roślin uprawnych w Polsce w tym czasie koncentrowała się głównie na problematyce roślin ciepłolubnych, dla których zmiany temperatury mają większe znaczenie niż dla zbóż ozimych (Deputat 1999, Kozyra 2004, Kozyra i Górski 2004, Dragońska i in. 2008).

Wykazane w niniejszej pracy różnice w prognozie wiosennego wznowienia wegetacji, wskazywane przez opracowane w RCM scenariusze klimatyczne, dodają do analiz fenologii zbóż ozimych kolejny element niepewności, co skłania do podjęcia bardziej wnikliwych analiz tego zagadnienia. Na przykład według analizy scenariusza DMI ARPEGE, przyspieszenie terminu wznowienia wegetacji w perspektywie lat 2021–2050 wyniesie 4 dni, natomiast według scenariusza RM ARPEGE – tylko 1 dzień. Należy pokreślić, że te dwa scenariusze RCM bazują na tym samym modelu GCM, należy więc wnioskować, że powstałe różnice są wynikiem konfiguracji modeli regionalnych. Podobne różnice w analizach agroklimatycznych z wykorzystaniem scenariuszy RCM zbudowanych na tym samym modelu globalnym sygnalizowali między innymi Oettli (2011) dla obszaru Afryki Północnej i Szwed i in. (2010) dla obszaru Polski. Rozwiązaniem tego problemu mają być scenariusze opracowywane z wykorzystaniem wielu modeli regionalnych klimatu (Vautard i in. 2013). Innym rozwiązaniem jest wybranie scenariusza opracowanego w jednym z RCM, który najwierniej opisuje okres odniesienia dla prowadzonych analiz (Szwed i in. 2010).

Uzyskane oceny zmian w fenologii zbóż ozimych mieszczą się w granicach zasygnalizowanych w innych opracowaniach dotyczących Europy (Olesen i in. 2012), które w perspektywie 2040 r. wskazują na zmiany terminów fenologicznych od 1 do 3 tygodni. Podobnie jak w innych pracach wskazano, że wybór modelu klimatycznego, z którego pochodzą dane do analiz znacząco wpływa na uzyskane wyniki modelowania (Szwed i in. 2010, Olesen i in. 2012). Analiza dla modelu RMI ARPEGE wykazała przyspieszenie terminu kłoszenia pszenicy w wieloleciu 2021–2050 o 7 dni, natomiast analiza przeprowadzona na danych modelu DMI ARPEGE wskazała na przyspieszenie tego terminu o 3 dni. Uśrednianie wyników analiz, szczególnie dla scenariuszy klimatycznych o przeciwnych tendencjach, zmniejsza skalę zmian i maskuje różnice regionalne, co zostało również wykazane w niniejszej pracy.

Istotnym elementem analizy zmian w fenologii zbóż ozimych w Polsce, w warunkach prognozowanych zmian termicznych w XXI w., jest określenie ilościowe

wpływu reakcji fotoperiodycznej na termin ich kłoszenia. Przedstawiona analiza pokazała, że w warunkach, kiedy następuje wcześniejsze wznowienie wegetacji, efekt fotoperiodyczny opóźnia termin kłoszenia. Obserwowany trend wzrostu temperatury powietrza w Polsce na przedwiośniu i wiosną w latach 1954–2005 (Michalska 2011), podobnie jak trend zmian długości okresu wegetacyjnego od końca XVIII w. wskazywały, że początek okresu wegetacyjnego staje się coraz wcześniejszy (Kozuchowski i in. 2000). Natomiast przeprowadzona w pracy analiza terminów wznowienia wegetacji zbóż ozimych w latach 1990–2011 wskazała na opóźnienie tego terminu pod koniec lat 90. XX w. (rys. 3), a dopiero później na przyspieszenie.

Wyniki analiz przedstawione w innych publikacjach sugerują, że na prędkość rozwoju mogą wpływać również warunki suszy, nawożenie czy podwyższona zawartość dwutlenku węgla w atmosferze, powodując w sposób pośredni wzrost temperatury powierzchni roślin i dodatkowe przyspieszenie ich rozwoju (Brisson i in. 2003, Mirschel i in. 2005, Springer i Ward 2007).

5.3. KONSTRUKCJA MODELI FENOLOGICZNYCH

Opracowywane w Polsce modele fenologiczne wykorzystujące metodę sum temperatur efektywnych tak dla roślin dzikorosnących, jak uprawnych należy zaliczyć do grupy modeli statystycznych (Górski i Jakubczak 1965). Modele te uwzględniają w swych założeniach modyfikujący wpływ fotoperiodu, usłonecznienia oraz suszy (Górski 1967, Kalbarczyk 2005). Modele statystyczne są mniej skomplikowane niż modele mechanistyczne, przez co proste w wykorzystywaniu i wyjaśnianiu mechanizmu działania wpływu zmian klimatycznych na fenologię. Głównym utrudnieniem stosowania modeli statystycznych jest potrzeba ich uaktualniania na podstawie obserwacji przeszłych, do których nie zawsze jest dostęp lub ich przetworzenie wymaga znacznych nakładów pracy. Mechanistyczne modele fenologiczne są zazwyczaj częścią modeli wzrostu i rozwoju roślin dostępnych w postaci pakietów komputerowych, co wiąże się z ich większą popularnością. Wielkość błędu oceny modeli fenologicznych zbudowanych z wykorzystaniem metod statystycznych i mechanistycznych jest zbliżona i wynosi ok. 3 dni (Mirschel i in. 2005). Błędy szacowania modeli opracowane w niniejszej pracy nie odbiegają od tych wartości.

Uzyskane istotne związki opisujące prędkość rozwoju analizowanych zbóż z długością 20. dnia po wznowieniu wegetacji wskazały na potrzebę analizy scenariuszy klimatycznych nie tylko pod względem zasobów ciepła, ale również terminu wznowienia wegetacji wiosną. Uwzględnienie w modelach opisu wpływu fotoperiodu na termin kłoszenia analizowanych zbóż znacząco polepszyło prognozy opracowanych modeli w stosunku do modeli, które nie uwzględniają tego efektu (tab. 19). W przypadku pszenicy średni błąd standardowy terminu kłoszenia bez uwzględnienia fotoperiodu wynosi 4,7 dnia, natomiast z uwzględnieniem tego czynnika – 2,6 dnia. Błąd standardowy szacowania terminu kłoszenia żyta bez uwzględnienia reakcji fotoperiodycznej wynosi 6,2 dnia, a po uwzględnieniu fotoperiodu – 2,8 dnia.

W przypadku jęczmienia jest to odpowiednio: 6,3 i 3,3 dnia. Różnica błędu prognozy terminu dojrzałości woskowej z uwzględnieniem efektu fotoperiodu jest mniejsza niż w przypadku fazy kłoszenia, co wiązać można z tym, że po osiągnięciu kłoszenia przestaje on być istotny dla rozwoju.

Empiryczne wyznaczenie terminu początku wegetacji polega zazwyczaj na zastosowaniu filtra średniej ruchomej lub funkcji aproksymującej szereg czasowy temperatury. W Modelu Agroklimatu Polski aproksymację temperatury wykonano, wykorzystując analizę harmoniczną (Górski 2005). Zastosowana w pracy metoda aproksymacji cyklu rocznego temperatury daje również duże możliwości w skalowaniu wyników analiz modelowania fenologii do dowolnej skali przestrzennej (Kozyra i in. 2005).

Tabela 19

Porównanie błędu prognozy z modelu uwzględniającego efekt fotoperiodyczny (e1)
i modelu, który nie uwzględnia efektu fotoperiodycznego (e2)
Comparison of errors between model considered effect of photoperiod (e1)
and without this effect (e2)

Okres rozwoju; Development period	Roślina; Crop	e1	e2
Wiosenne wznowienie wegetacji – kłoszenie Spring vegetation renewal – heading	pszenica ozima; winter wheat	2,6	4,7
	żyto ozime; winter rye	2,8	6,2
	jęczmień ozimy; winter barley	3,3	6,3
Wiosenne wznowienie wegetacji – dojrzałość woskowa; Spring vegetation renewal – yellow ripeness	pszenica ozima; winter wheat	3,5	3,5
	żyto ozime; winter rye	3,8	3,9
	jęczmień ozimy; winter barley	4,0	4,7

W opracowanych modelach fenologicznych do określenia prędkości rozwoju (odwrotności długości okresów międzyfazowych) w funkcji sumy temperatury efektywnej i długości dnia wykorzystano metodę regresji wielokrotnej prostej. W innych pracach proponuje się stosowanie obok funkcji liniowych również funkcje nieliniowe (Porter i Gawith 1999), co jest uzasadnione w sytuacji, gdy temperatura często przekracza temperaturę optymalną dla rozwoju roślin. Wskazuje się, że stosowanie funkcji innych niż liniowe do przedstawienia prędkości rozwoju roślin może być przydatne w warunkach ocieplenia, kiedy temperatura efektywna częściej będzie przekraczać wartości optymalne. W warunkach scenariuszy klimatycznych dla obszaru Europy występuje niewielka liczba dni z temperaturą średnią dobową

nieprzekraczającą 20°C, dlatego nie było podstaw do szukania funkcji innych niż liniowe, uwzględniających efekt temperatury suboptymalnej (Olesen i in. 2012). Ostatnio pojawiają się prace postulujące przegląd zaimplementowanych modeli fenologicznych i ponownej weryfikacji w obecnych warunkach klimatycznych (Rötter i in. 2011).

Wykorzystywanie w modelach fenologicznych różnych progów termicznych, jak również różnych metod sumowania stopniodni ($^{\circ}\text{C}_d$) powoduje, że porównywanie modeli musi być prowadzone z dużą rozważą (Bonhomme 2000). Wyznaczone w tej pracy wartości progów termicznych są przeważnie wyższe od określanych wcześniej (Deputat i in. 1996, Deputat i Marcinkowska 1999b i 1997). Różnice wynikają z przyjętej metody szacowania proggu temperatury efektywnej, która zakłada zminimalizowanie błędu prognozy (Yang i in. 1995, Górski i Jazurek 1996).

5.4. ZNACZENIE ZMIAN W FENOLOGII DLA ROLNICTWA

Prognozy terminów fenologicznych upraw w kontekście zmian klimatu są potrzebne przy planowaniu produkcji roślinnej i organizacji prac polowych w warunkach prognozowanych zmian klimatu (Reidsma i in. 2010) oraz przy planowaniu działań adaptacyjnych i mitygacyjnych, które w rolnictwie powinny nawzajem uzupełniać się (van Vuuren i in. 2011). Zmiany w fenologii prognozowane dla scenariuszy klimatycznych mogą być również wskaźnikiem zachodzących zmian w środowisku (Keatley i in. 2002).

W strategiach adaptacyjnych wobec prognozowanych zmian klimatycznych akcentowano dotychczas głównie potrzebę hodowli roślin odpornych na suszę (Kristensen i in. 2011). W odpowiedzi na te postulaty prace hodowlane ukierunkowano na identyfikację genów roślin, które pozwolą zmniejszyć reakcję upraw na niedobory wody w glebie (Cattivelli i in. 2008). Wysiłki te nie zostały uwieńczone sukcesem, ponieważ nie określono dotychczas genów roślinnych odpowiedzialnych za np. efektywną gospodarkę wodą lub składnikami mineralnymi (Arseniuk i Anioł 2009). Według najnowszych analiz scenariuszy klimatycznych, do 2050 r. problem obniżki plonu w Europie z powodu suszy może być mniej znaczący niż z powodu stresu wysokich temperatur (Semenov 2009). Problem częstszych fal upałów jest sygnalizowany również w analizach scenariuszy klimatycznych dla obszaru Polski (Szwed i in. 2010). Wskazuje się obecnie, że prace hodowlane powinny być ukierunkowane nie tylko na poszukiwanie odporności roślin na suszę, ale również na identyfikację odporności na wysoką temperaturę oraz wskazywanie odmian o zróżnicowanym tempie rozwoju (Semenov i in. 2009). Podkreśla się duże znaczenie odpowiedniego doboru odmian o dłuższym lub krótszym cyklu rozwojowym w celu zmniejszenia ryzyka strat powodowanych niekorzystnym przebiegiem pogody (Moriondo i in. 2010). W warunkach, gdy straty plonów są wynikiem suszy wczesnoletniej powinny być wskazywane do uprawy odmiany o wczesnym terminie kłoszenia. Natomiast w warunkach częstszych susz wczesnowiosennych do upra-

wy powinny być zalecane odmiany o wyższych wymaganiach cieplnych. Z kolei w przypadku dużego prawdopodobieństwa częstego opóźnienia początku wiosennej wegetacji powinny być uprawiane odmiany, w których uzyskano w drodze hodowli mniejszą reakcję na efekt fotoperiodyczny (Trnka i in. 2011). Wskazuje się również, że na poziomie gospodarstw ograniczenie strat plonu można osiągnąć przez uprawę kilku odmian o zróżnicowanym cyklu rozwoju (Reidsma i Ewert 2008).

Przyspieszenie tempa rozwoju zbóż ozimych i skrócenie okresu od wznowienia wegetacji do kwitnienia zdaniem wielu autorów ma skutkować ograniczeniem plonowania (Olesen i in. 2000, Iglesias i in. 2009, Kristensen i in. 2011). Zależności te nie są jednak proste i w szczególnych warunkach, np. zwiększonej ilości promieniowania przy optymalnym uwilgotnieniu nie są spełniane (Bonhomme 2000). Ponadto najnowsze osiągnięcia hodowli roślin wskazują, że jest możliwość uzyskania odmian o zwiększonych zdolnościach absorbowania promieniowania, co może zmniejszyć niekorzystny efekt przyspieszenia rozwoju i skrócenia fenofaz w wyniku ocieplenia (Biswas i in. 2013). Istnieją też prace, w których identyfikuje się geny odpowiedzialne za reakcję fotoperiodyczną i jarowizację, które mogą zwiększyć możliwości dostosowania odmian do prognozowanych zmian klimatu (Laurie i in. 2004). Prędkość rozwoju roślin decyduje o terminach i długości ich okresów krytycznych, przez co determinuje wielkość i jakość uzyskiwanych plonów (Porter i Semenov 2005).

W pracy wskazano, że opóźnienie terminu wznowienia wegetacji zmniejsza wymagania termiczne roślin. Wzrost zasobów ciepła przy wcześniejszym wznowieniu wegetacji w kontekście zbóż ozimych może być oceniany jako pozytywny efekt zmiany klimatu. Z kolei wzrost zasobów ciepła przy opóźnionym początku wiosennej wegetacji i wzroście temperatury może spowodować nadmierne skracanie okresów międzyfazowych i przynieść efekty negatywne dla plonowania roślin. Prognozy zmian w fenologii zbóż ozimych w Polsce do końca XXI w. wskazują na potrzebę dokonania znaczącego przesunięcia prac polowych. Zmiany w prędkości rozwoju spowodowane wzrostem temperatury w bliskiej perspektywie czasowej powinny być rekompensowane przez odpowiedni dobór odmian.

W Polsce istnieje wieloletnia tradycja obserwacji fenologicznych (Szafer 1922) i badań dotyczących fenologii (Romer 1949, Bac 1958 i 1970, Prawdzic 1963, Karliński i Kędziora 1967, Kołodziej 1976). W drugiej połowie XX w. funkcjonowała duża sieć monitoringu pojavów fenologicznych prowadzona przez IMGW w Warszawie (Panecka 1960, Sokołowska 1980, Tomaszewska i Rutkowski 1999), która została kilkanaście lat temu zlikwidowana. Istnieją tylko nieliczne prace uwzględniające obserwacje z ostatnich lat działania pojedynczych punktów obserwacyjnych tej sieci (Górski i Jazurek 1996, Demidowicz i in. 2001), natomiast materiały dotyczące tej tematyki zebrane w innych krajach są bardzo cenione i wnikliwie analizowane (Siebert i Ewert 2012). Obecnie czynione są starania odtworzenia sieci obserwacji fenologicznych w ramach programów europejskich (Jatczak 2005). Po-

zyskane z obserwacji dane fenologiczne powinny zostać zharmonizowane z danymi archiwalnymi, by zwiększyć możliwość wnioskowania o reakcji roślin na zachodzące zmiany w klimacie. W dalszym ciągu przywiązuje się dużą wagę do danych fenologicznych pochodzących z wieloletnich doświadczeń polowych (Semenov 2009), zwłaszcza tych z długoletnią serią obserwacyjną (np. Galant i Andruszczak 2004). Dużą możliwość wnioskowania o potencjalnych zmianach klimatu umożliwiają wykorzystywane w tej pracy materiały zbierane przez COBORU (Raszka 1999 i 2002, Kalbarczyk 2005, Kalbarczyk i Kalbarczyk 2010, Kalbarczyk i in. 2011) oraz omówione wcześniej opracowania dotyczące zbóż ozimych w Polsce (Deputat i in. 1996, Deputat i Marcinkowska 1999a, 1999b i 1997, Koźmiński 2001, Korpalska-Chabior 2001, Michalska 2001).

6. WNIOSKI

1. Odmiany pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego uprawiane w doświadczeniach COBORU w latach 1991–2011 nie różniły się pod względem wymagań termicznych od uprawianych przed 1990 r.
2. W pracy wykazano, że pominięcie efektu fotoperiodycznego w modelowaniu fenologii zbóż ozimych, determinowanego przez zmienność terminu wznowienia wegetacji na wiosnę, może prowadzić do znacznych błędów w prognozach rozwoju roślin w warunkach scenariuszy klimatycznych XXI w.
3. W latach 1990–2010 stwierdzono istotne tendencje zmian terminu siewu i wschodów jęczmienia ozimego (odpowiednio: 2,2 i 1,3 dnia na 10 lat) i pszenicy ozimej (odpowiednio: 1,5 i 3,5 dnia na 10 lat), natomiast brak zmian terminu siewu żyta przy zmianie terminu wschodów (1,1 dnia na 10 lat). W konsekwencji nastąpiło wydłużenie się okresu od siewu do wschodów pszenicy ozimej o 1,9 i żyta ozimego o 1,1 dnia na 10 lat, natomiast skrócenie w przypadku jęczmienia ozimego o 0,9 dnia na 10 lat.
4. W latach 1991–2011 stwierdzono tendencję do przyspieszania terminów kłoszenia i dojrzałości woskowej analizowanych zbóż (dni na 10 lat): pszenicy ozimej odpowiednio o 3,6 i 5,0, żyta ozimego – 2,8 i 5,0, jęczmienia ozimego – 2,6 i 4,3. Widoczna jest równocześnie tendencja do przyspieszania terminu wznowienia wegetacji, szczególnie dla żyta ozimego (1,5 dnia na 10 lat), jednak są to tendencje nieistotne na poziomie $\alpha = 0,05$.
5. Stwierdzono skracanie się analizowanych okresów międzyfazowych po wiosennym wznowieniu wegetacji, z wyjątkiem okresu od wznowienia wegetacji do kłoszenia dla żyta. Brak zmian długości tego okresu w przypadku żyta należy

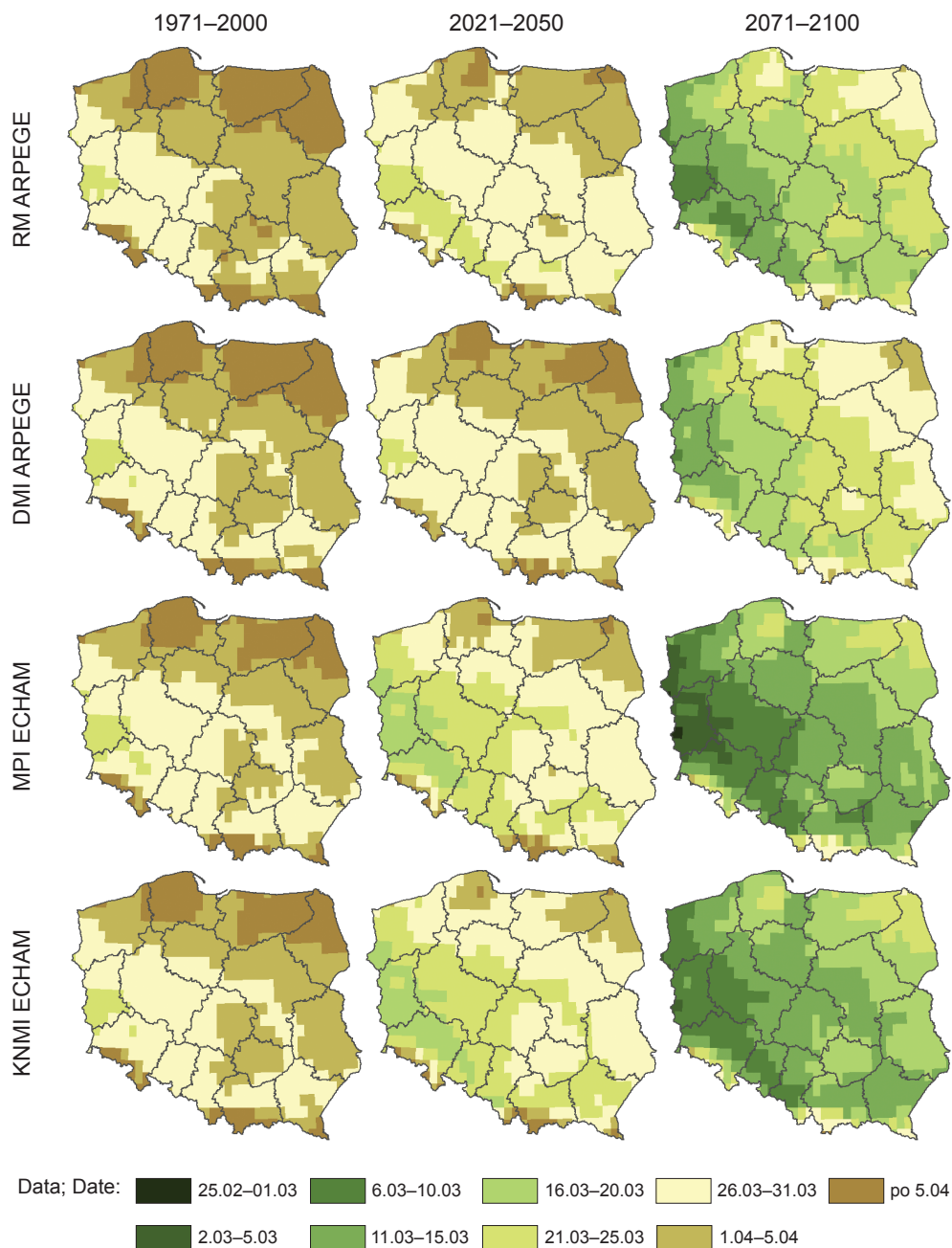
powiązać z reakcją na przyspieszenie terminu wiosennego wznowienia wegetacji.

6. Wykorzystane w pracy scenariusze klimatyczne podobnie prognozują zmiany średniej rocznej temperatury, różnią się natomiast w opisie cyklu rocznego temperatury. Wybór scenariusza klimatycznego w dużym stopniu determinuje uzyskane wyniki analiz.
7. Według analizowanych czterech scenariuszy RCM w latach 2021–2050 wiosenny termin wznowienia wegetacji w Polsce będzie wcześniejszy niż w latach 1971–2000 o 4 dni i przypadać ma na 27 marca. Natomiast w latach 2071–2100 termin wznowienia wegetacji ma być wcześniejszy o 16 dni niż w latach 1971–2000 i ma przypadać na 16 marca. Zmiana terminu wznowienia wegetacji w perspektywie lat 2071–2100 spowoduje wzrost wymagań cieplnych zbóż, wyrażonych w stopniodniach, co zmniejszy zmiany w fenologii, które mogłyby wynikać ze wzrostu temperatury.
8. W latach 2021–2050, według scenariuszy RCM, termin kłoszenia pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego będzie o 4 dni wcześniejszy niż w latach 1971–2000. Przyspieszenie terminu kłoszenia w latach 2071–2100 względem lat 1971–2000 w przypadku jęczmienia i żyta wyniesie 9, a pszenicy 10 dni.
9. W latach 2021–2050, według scenariuszy RCM, termin dojrzałości woskowej pszenicy ozimej i żyta ozimego będzie wcześniejszy o 5 dni, a jęczmienia ozimego o 4 dni. W perspektywie lat 2071–2100 przyspieszenie dojrzałości woskowej pszenicy ozimej, żyta ozimego, jęczmienia ozimego wyniesie odpowiednio: 14, 12, 11 dni.
10. Przedstawione w pracy modele fenologiczne mogą być wykorzystane w planowaniu produkcji roślinnej w warunkach zmienionego klimatu i w systemach wspomagania decyzji dotyczących określania terminów prac polowych. Mogą być także przydatne w innych interpretacjach scenariuszy klimatycznych.

Autor opracowania dziękuje wykonawcom projektu ENSEMBLES za udostępnienie wykorzystanych w tej pracy danych RCM, które opracowano w projekcie EU FP6: ENSEMBLES (Numer kontraktu 505539).

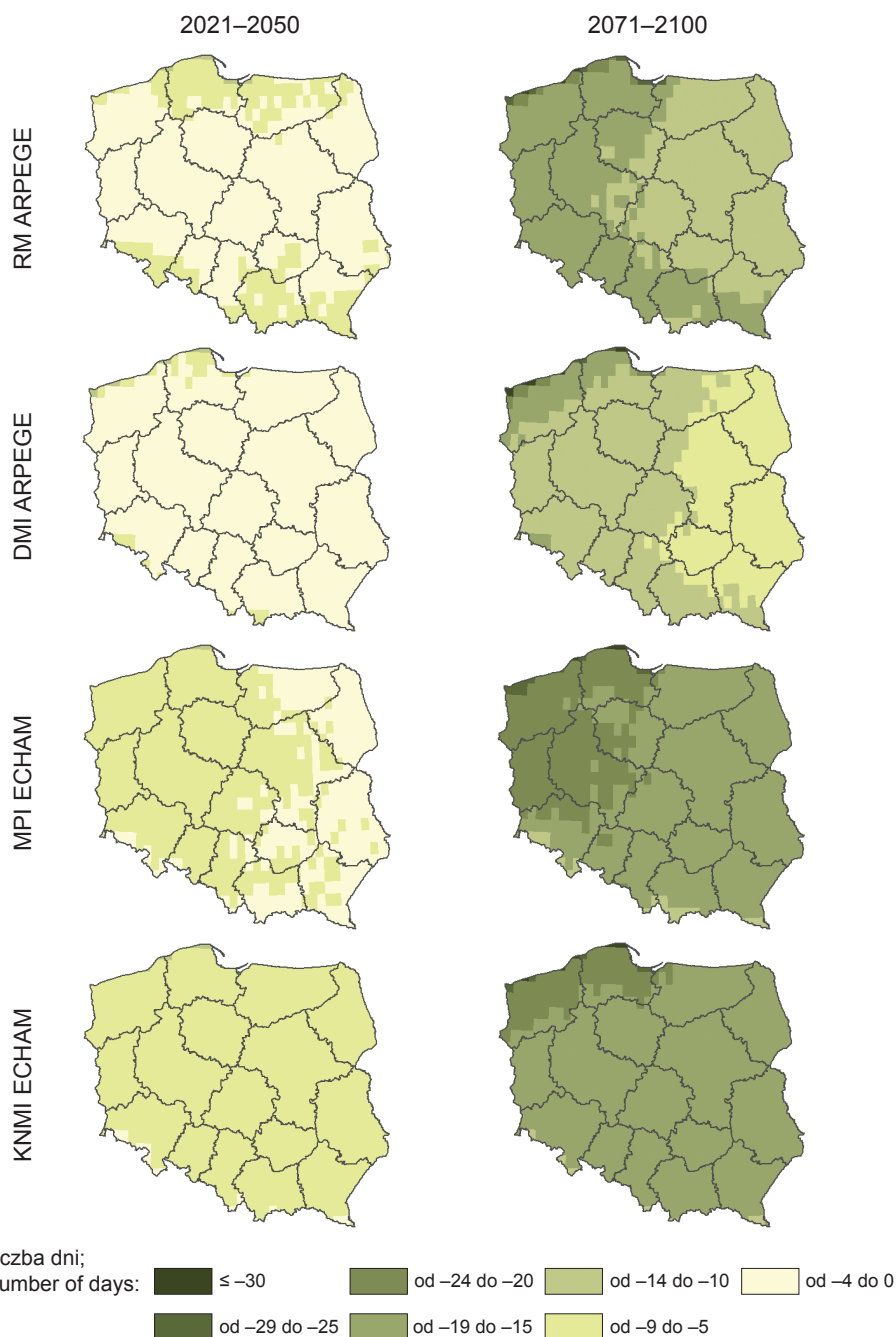
The ENSEMBLES data used in this work was funded by the EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539) whose support is gratefully acknowledged.

7. ANEKS



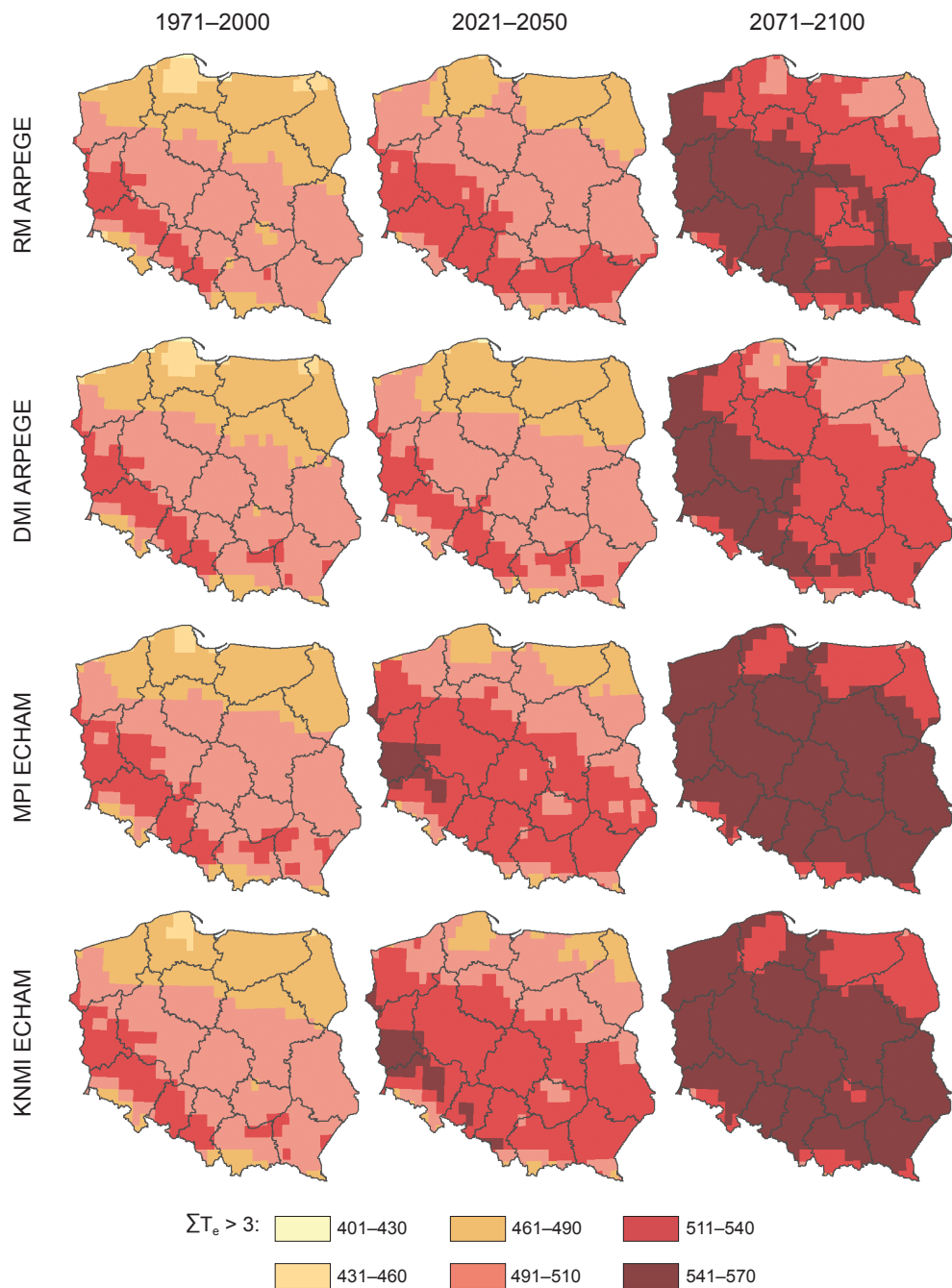
Rys. I. Termin przejścia temperatury powietrza przez próg termiczny 5°C w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowany na podstawie danych RCM

The date when mean air temperature exceeds threshold 5°C in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data

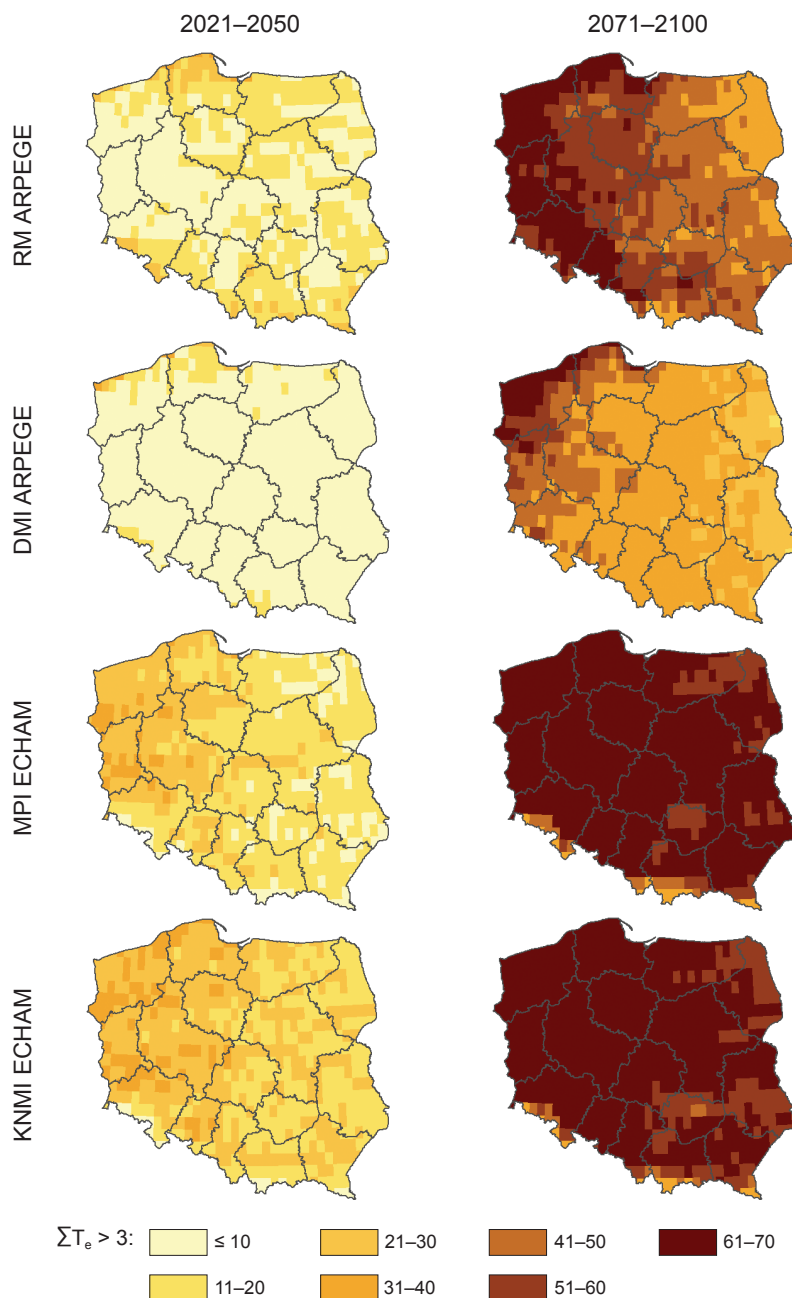


Rys. II. Zmiana terminu przejścia temperatury powietrza przez próg 5°C (liczba dni) w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM

Change in the date when daily mean air temperature exceeded a threshold 5°C (number of days) in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios

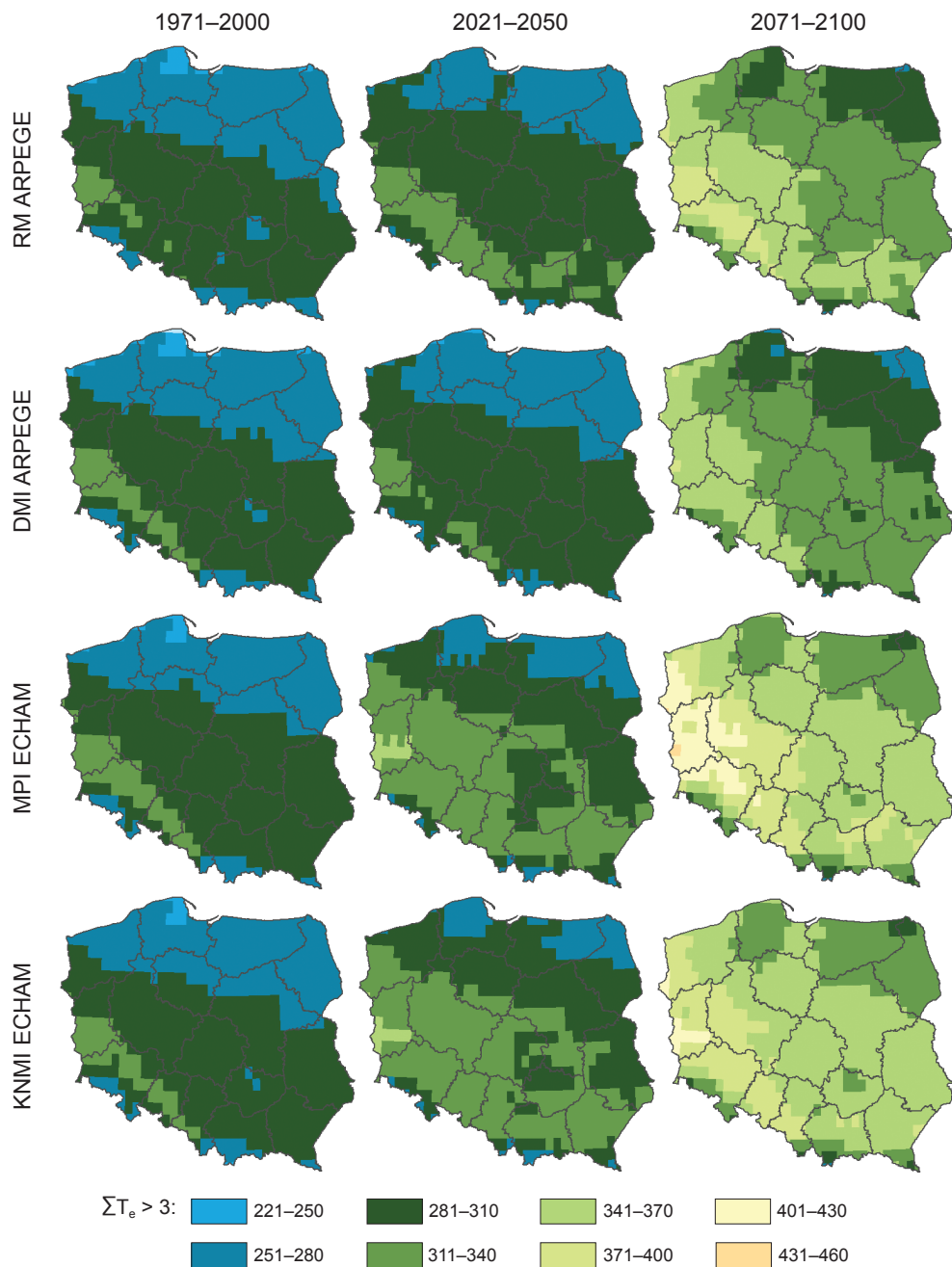


Rys. III. Wymagania cieplne pszenicy ozimej ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowane dla danych RCM
 Temperature requirements of winter wheat ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data

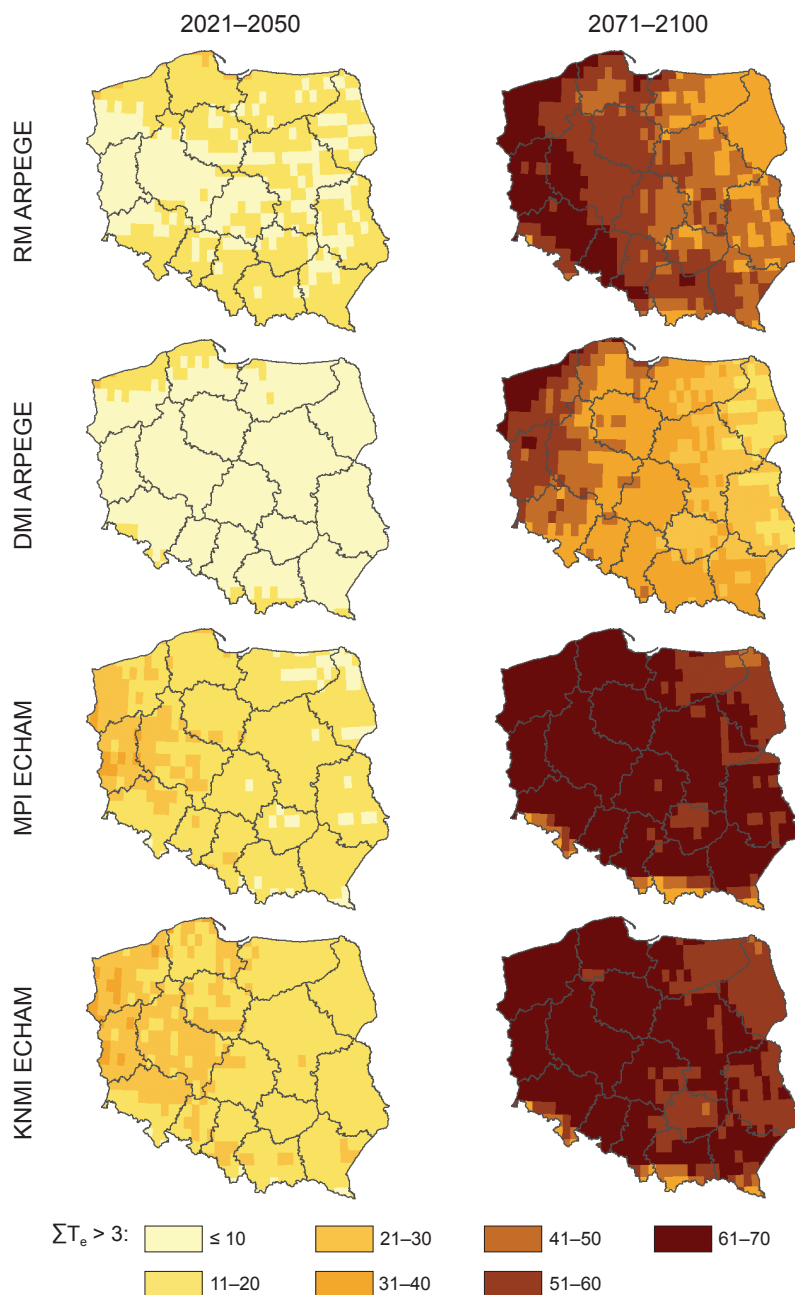


Rys. IV. Zmiana wymagań cieplnych pszenicy ozimej ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM

Change in the temperature sum requirements of winter barley ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 2021–2050 of winter wheat in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios

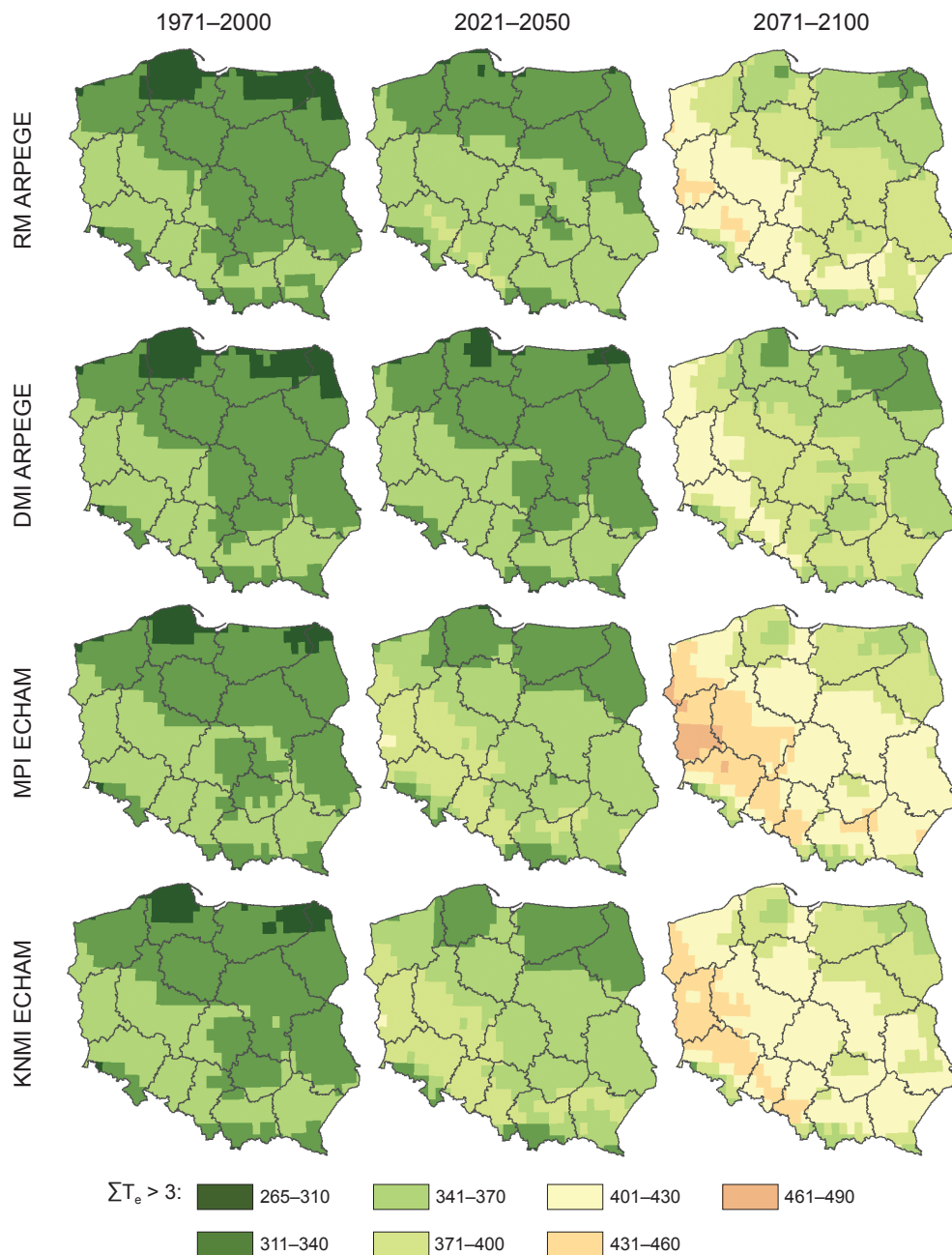


Rys. V. Wymagania cieplne żyta ozimego ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowane dla danych RCM
 Temperature requirements of winter barley ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 2021–2050 of winter rye in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data

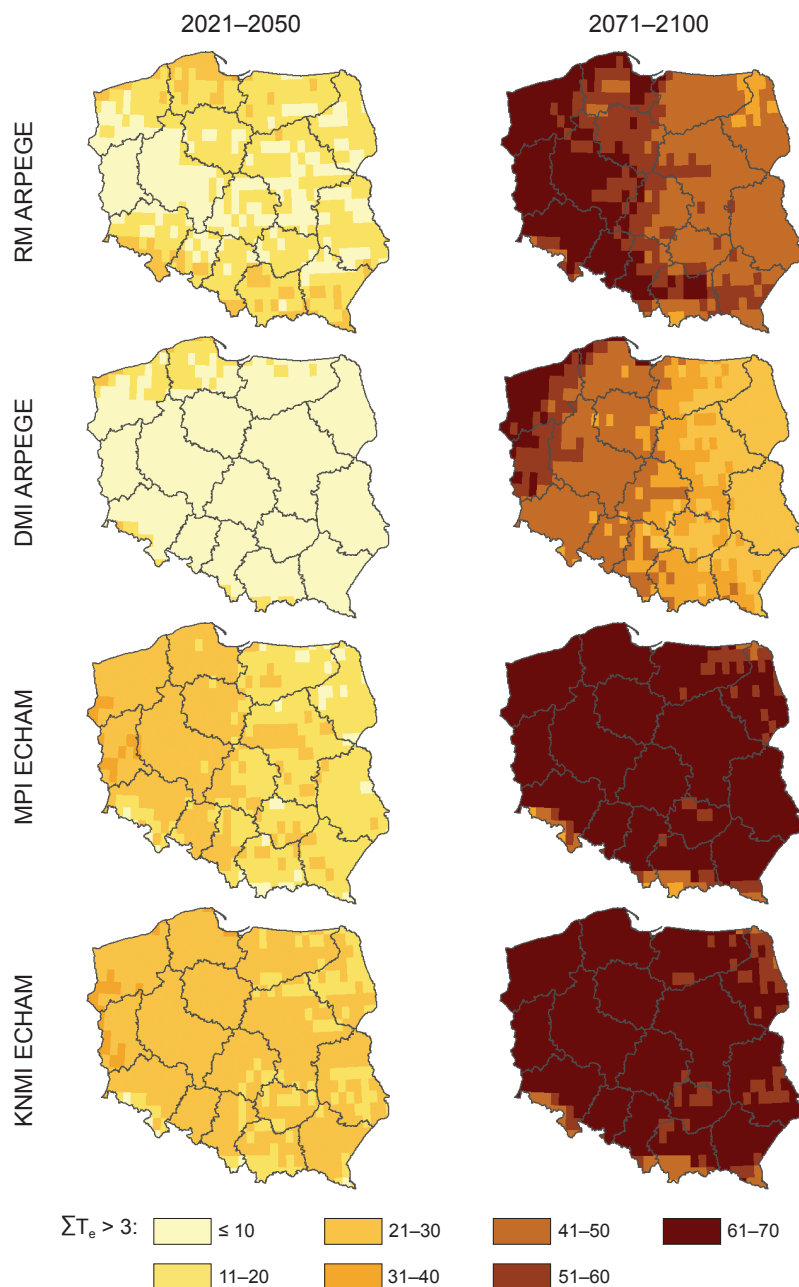


Rys. VI. Zmiana wymagań cieplnych żyta ozimego ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM

Change in the temperature sum requirements of winter barley ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 2021–2050 of winter rye in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios

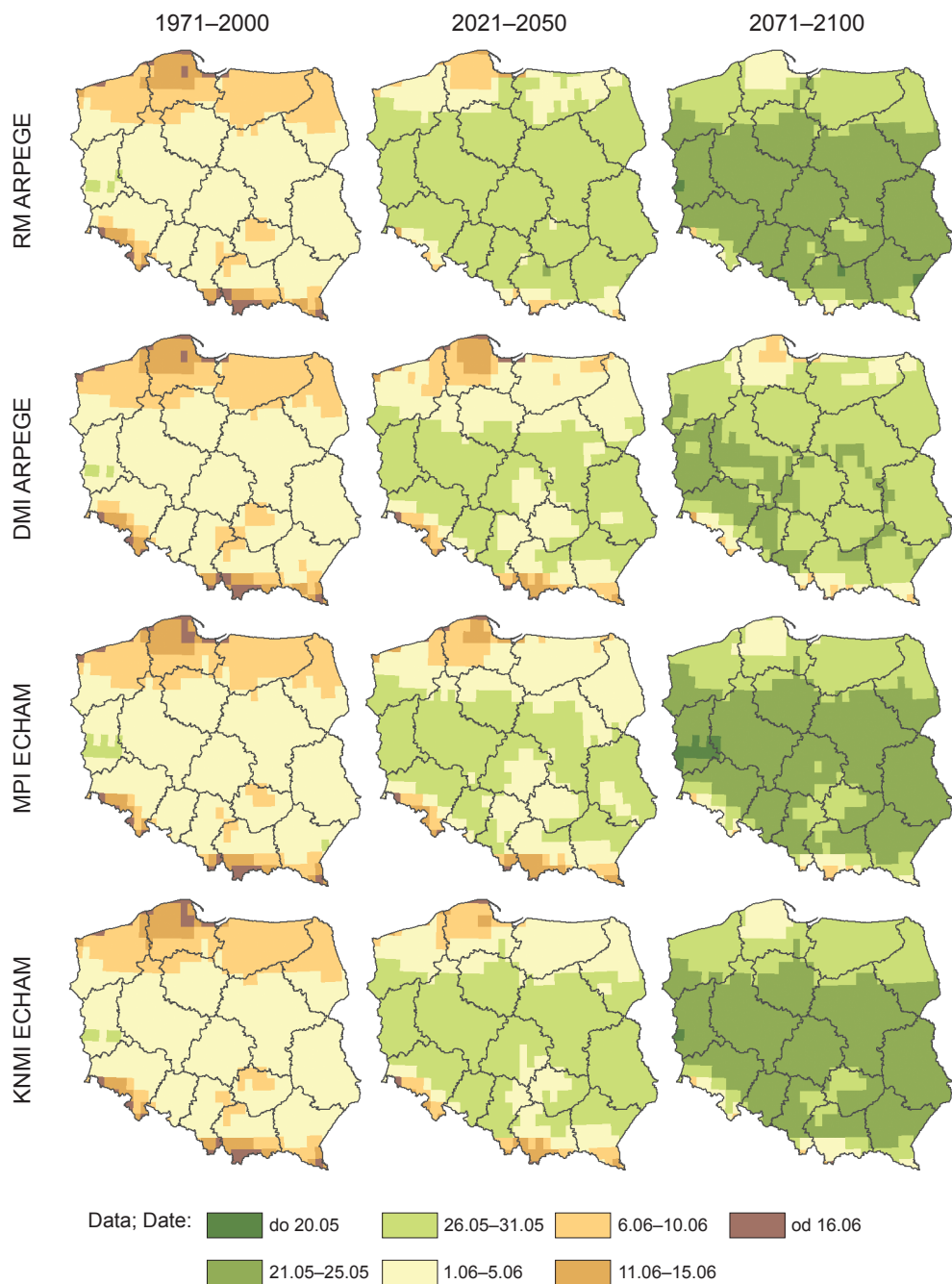


Rys. VII. Wymagania cieplne jęczmienia ozimego ($^{\circ}C_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowane dla danych RCM
 Temperature requirements of winter barley ($^{\circ}C_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 2021–2050 of winter barley in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data



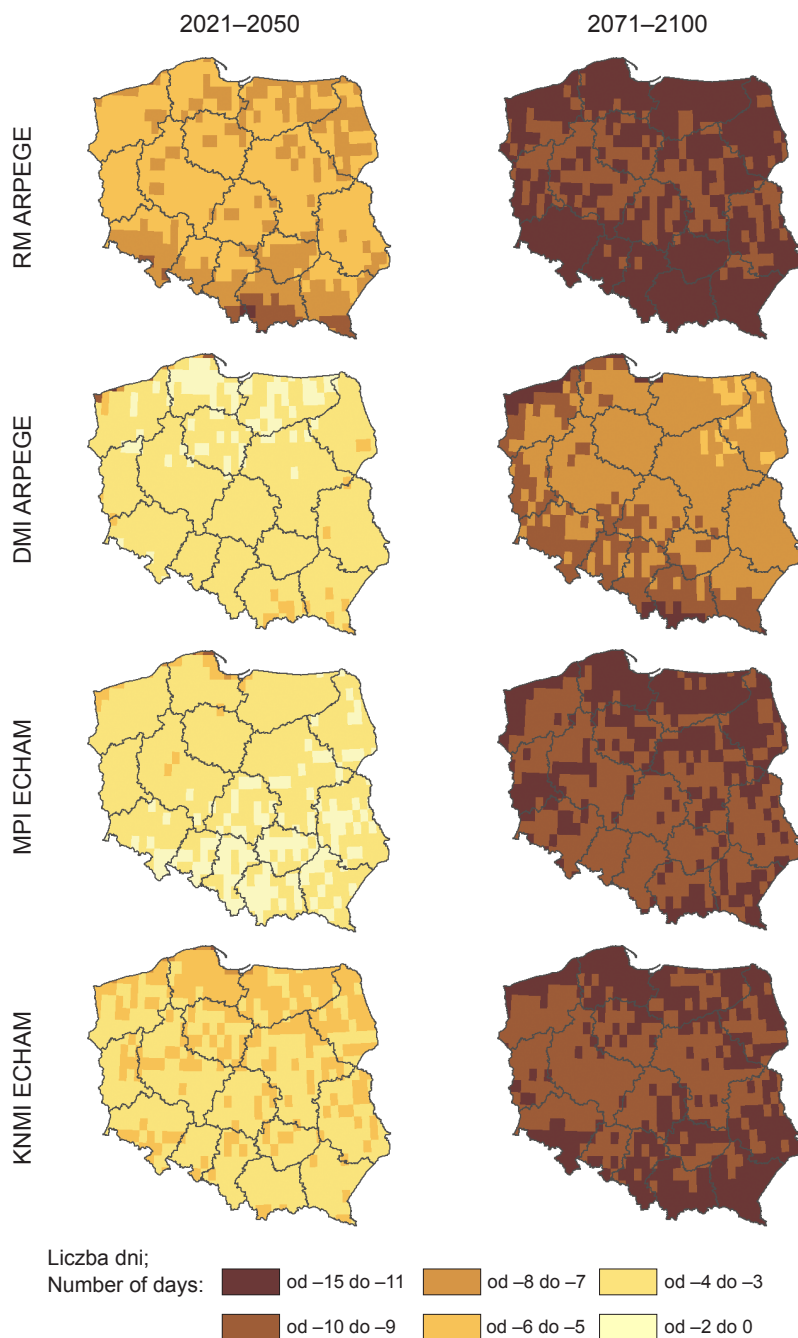
Rys. VIII. Zmiana wymagań ciepłych jęczmienia ozimego ($^{\circ}\text{C}_d$) w okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM

Change in the temperature sum requirements of winter barley ($^{\circ}\text{C}_d$) in the period from spring vegetation removal to heading in the years 2021–2050 of winter barley heading in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios

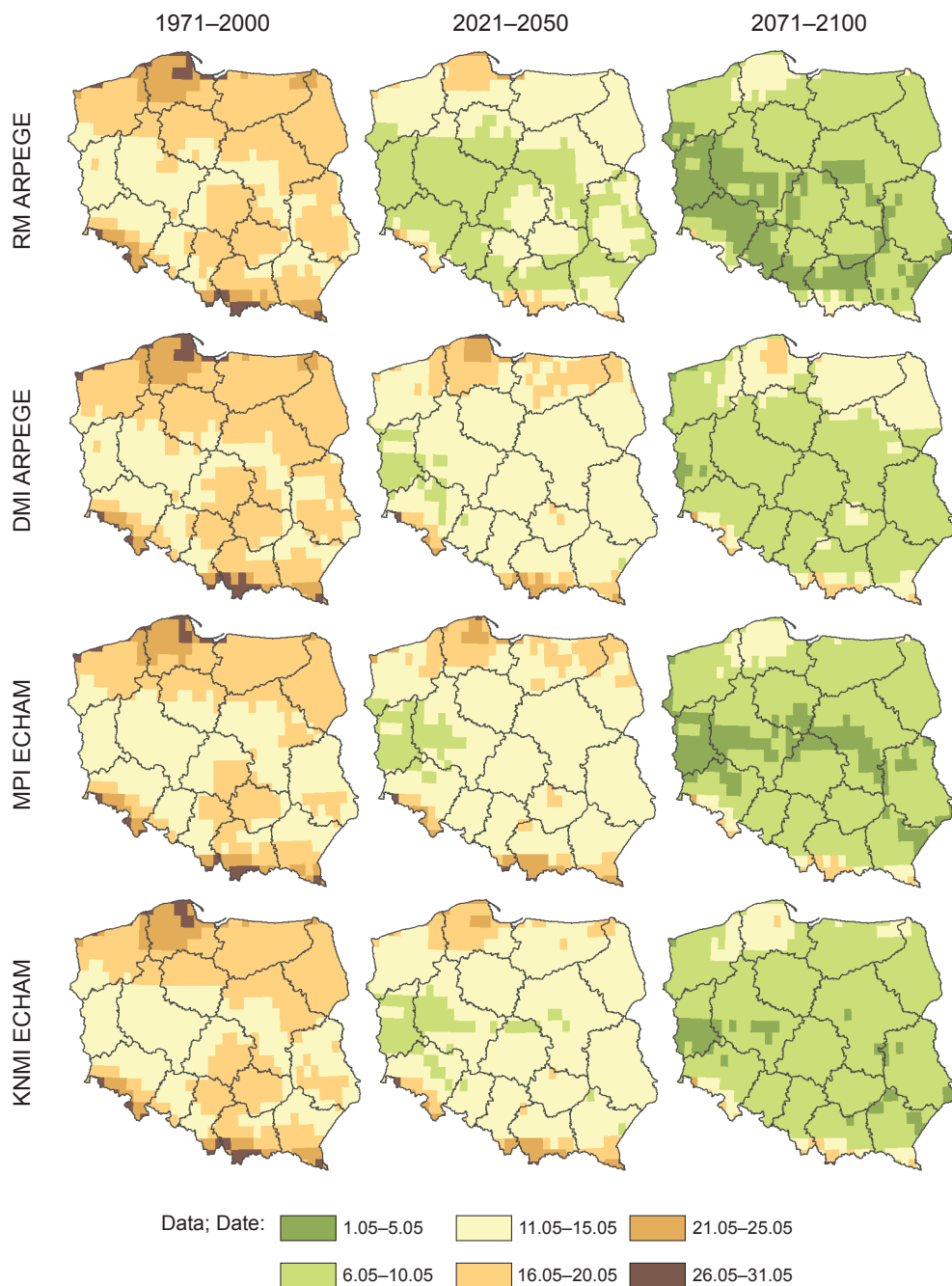


Rys. IX. Termin kłoszenia pszenicy ozimej w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowany dla scenariuszy RCM

The date of heading for winter wheat in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data

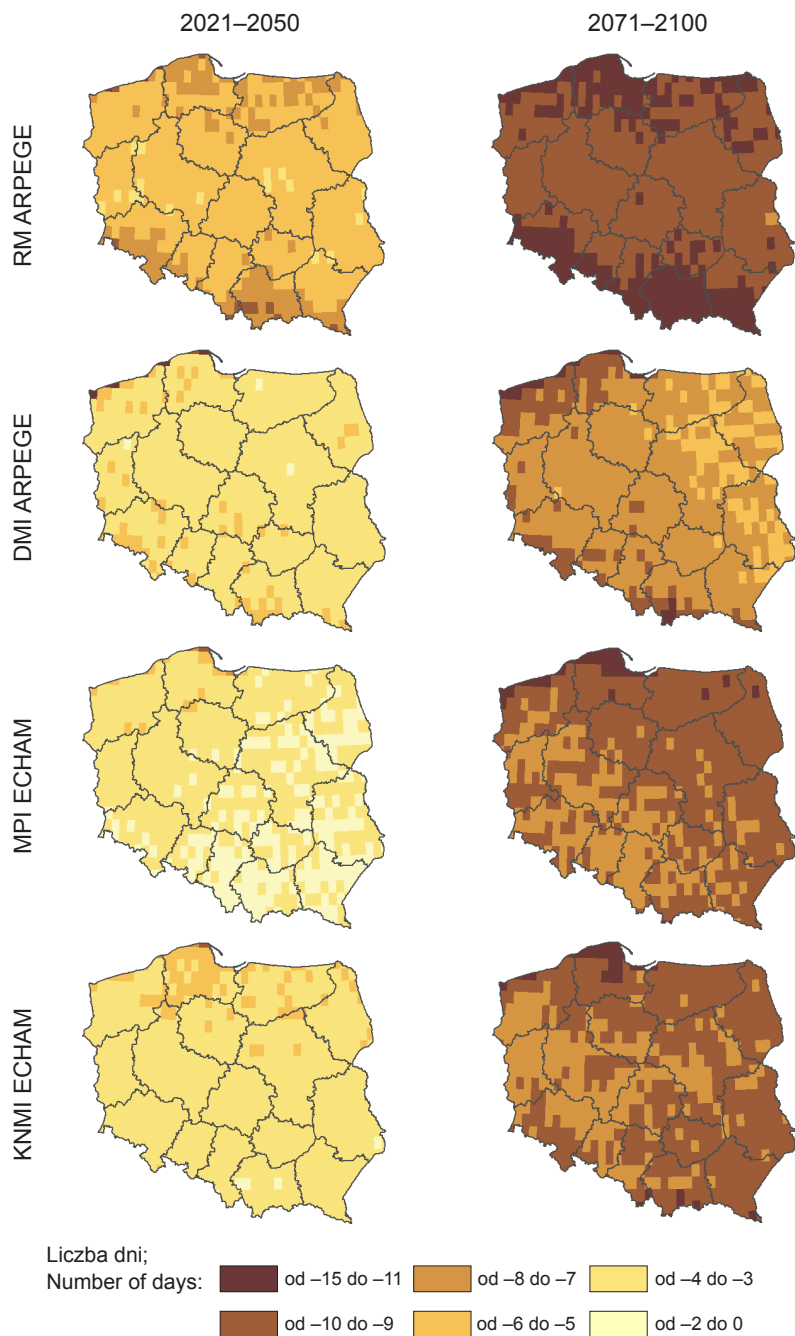


Rys. X. Zmiana terminu kłoszenia pszenicy ozimej w latach 2021–2050 i 2071–2100
względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM
Change in the date of heading for winter wheat in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared
to period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios



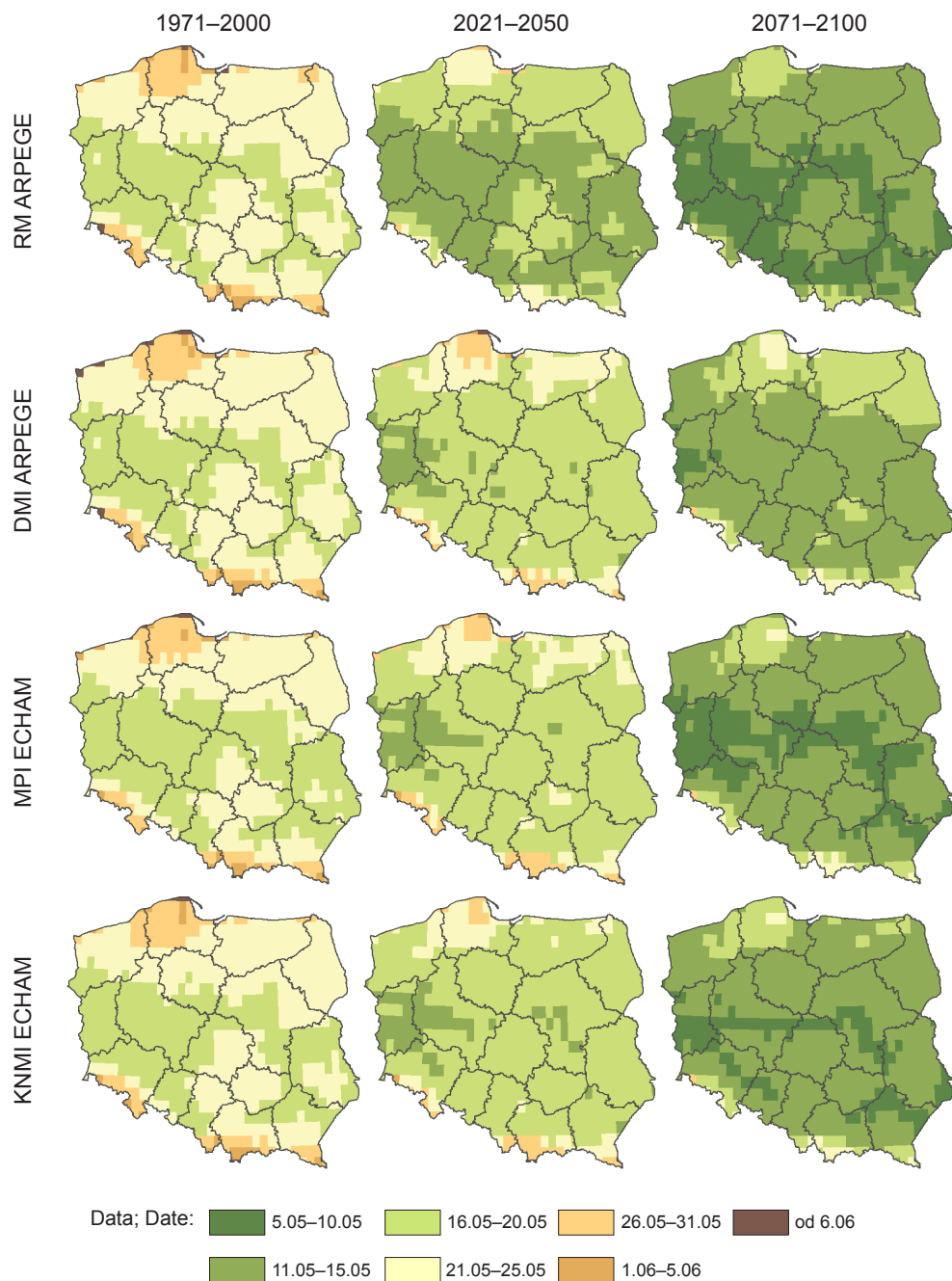
Rys. XI. Termin kłoszenia żyta ozimego w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowany dla danych RCM

The date of heading for winter rye in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data



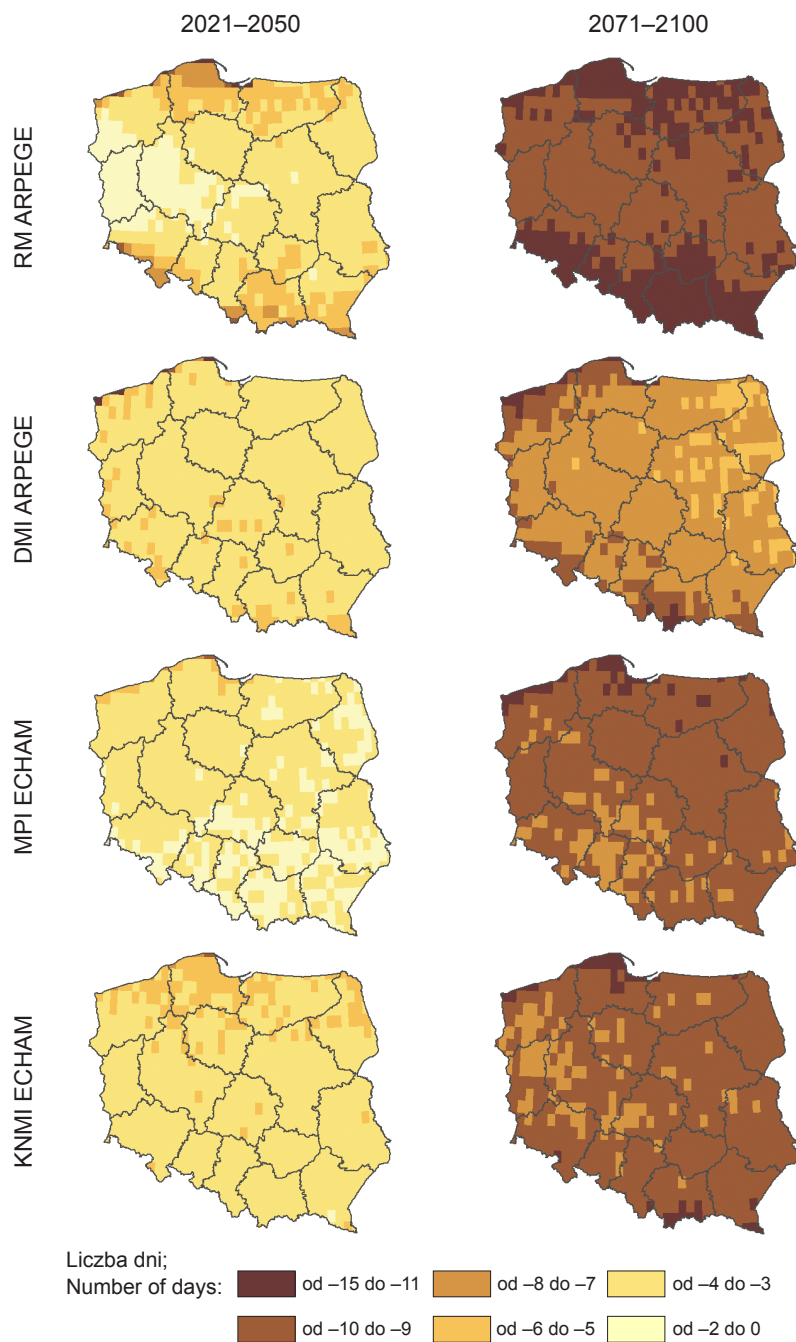
Rys. XII. Zmiana terminu kłoszenia żyta ozimego w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM

Change in the date of heading for winter rye in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to the period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios

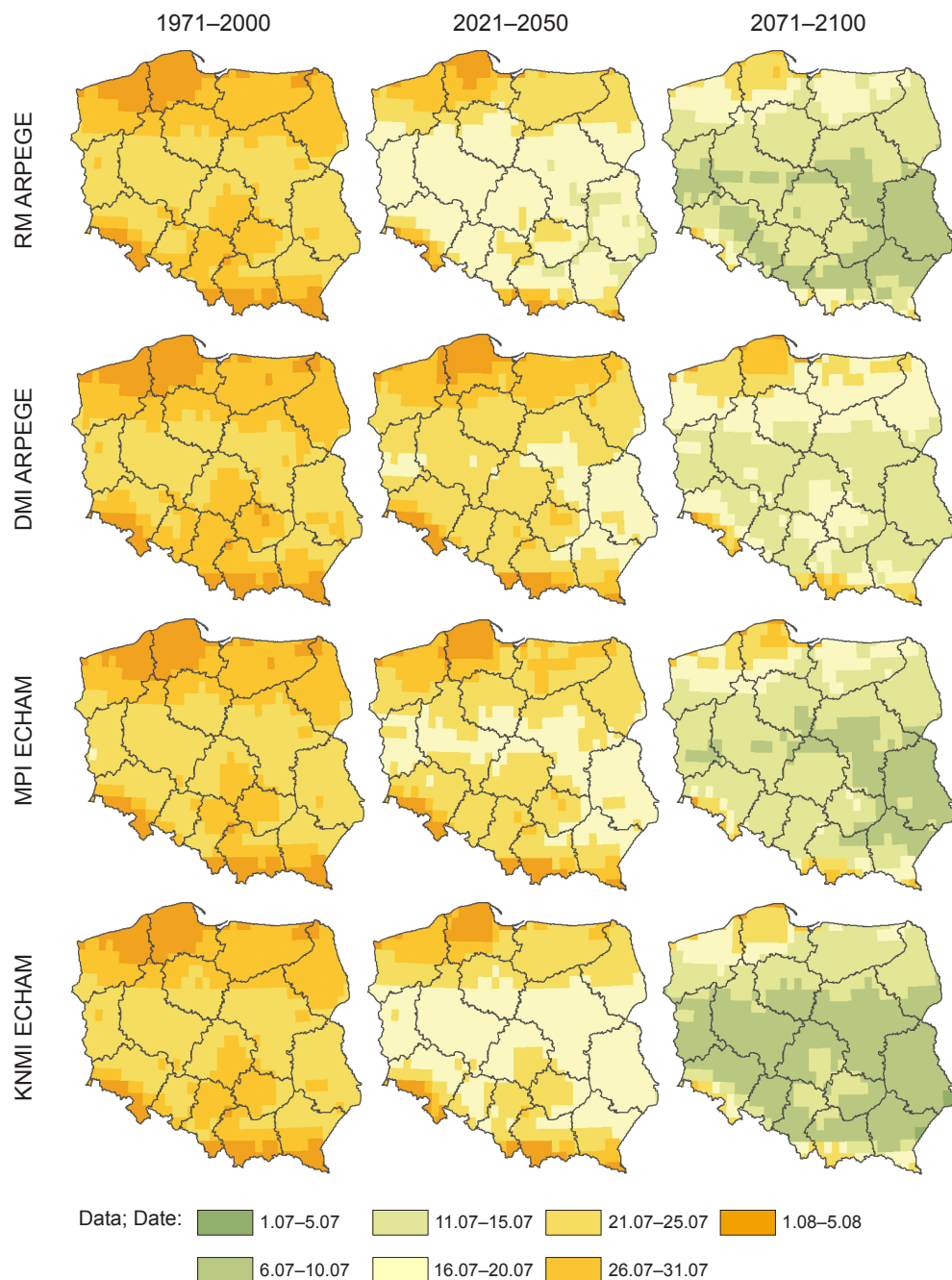


Rys. XIII. Termin kłoszenia jęczmienia ozimego w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowany dla danych RCM

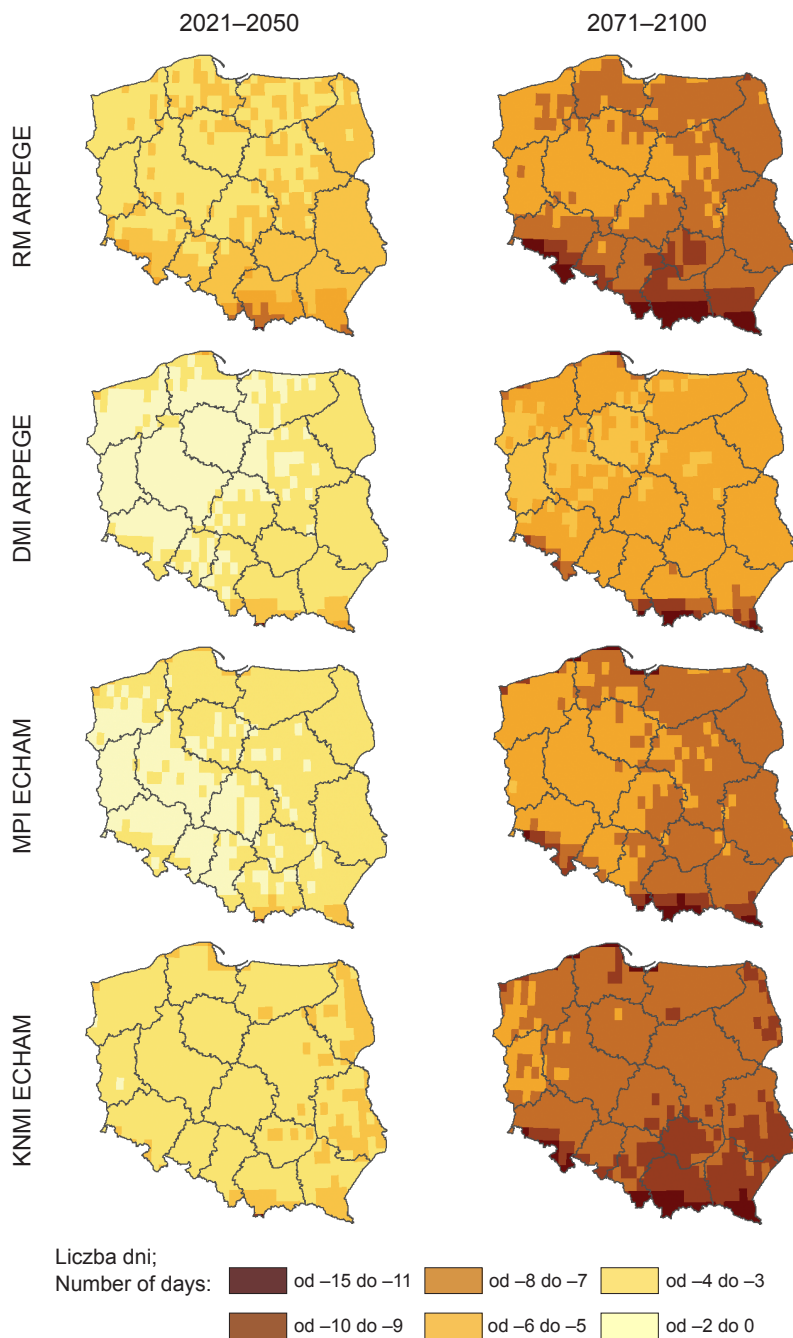
The date of heading for winter barley in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data



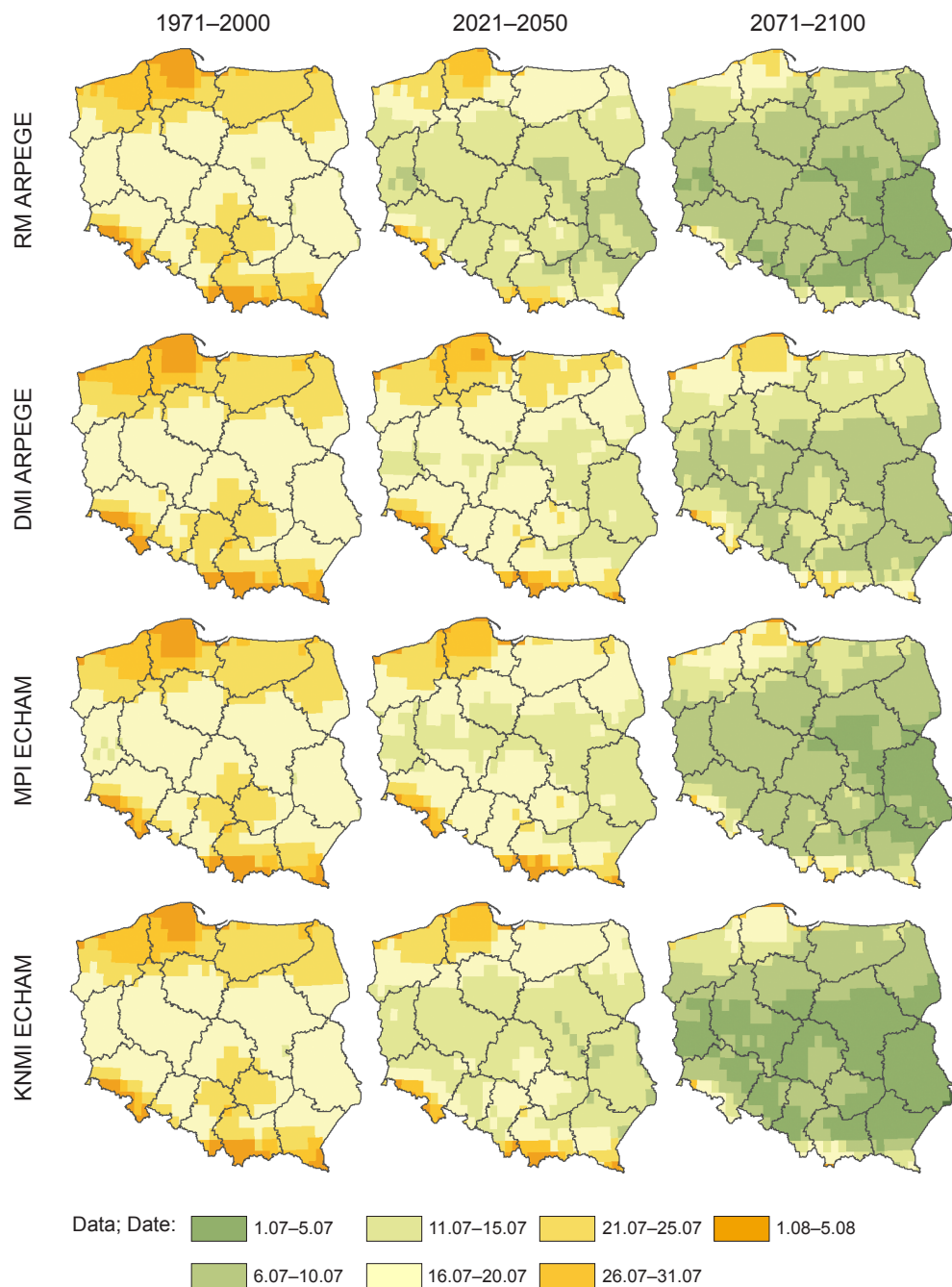
Rys. XIV. Zmiana terminu kłoszenia jęczmienia ozimego w latach 2021–2050 i 2071–2100
względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM
Change in the date of heading for winter barley in the years 2021–2050 and 2071–2100
compared to the period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios



Rys. XV. Termin dojrzałości woskowej pszenicy ozimej w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowany dla danych RCM
The date of yellow ripeness for winter barley in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data

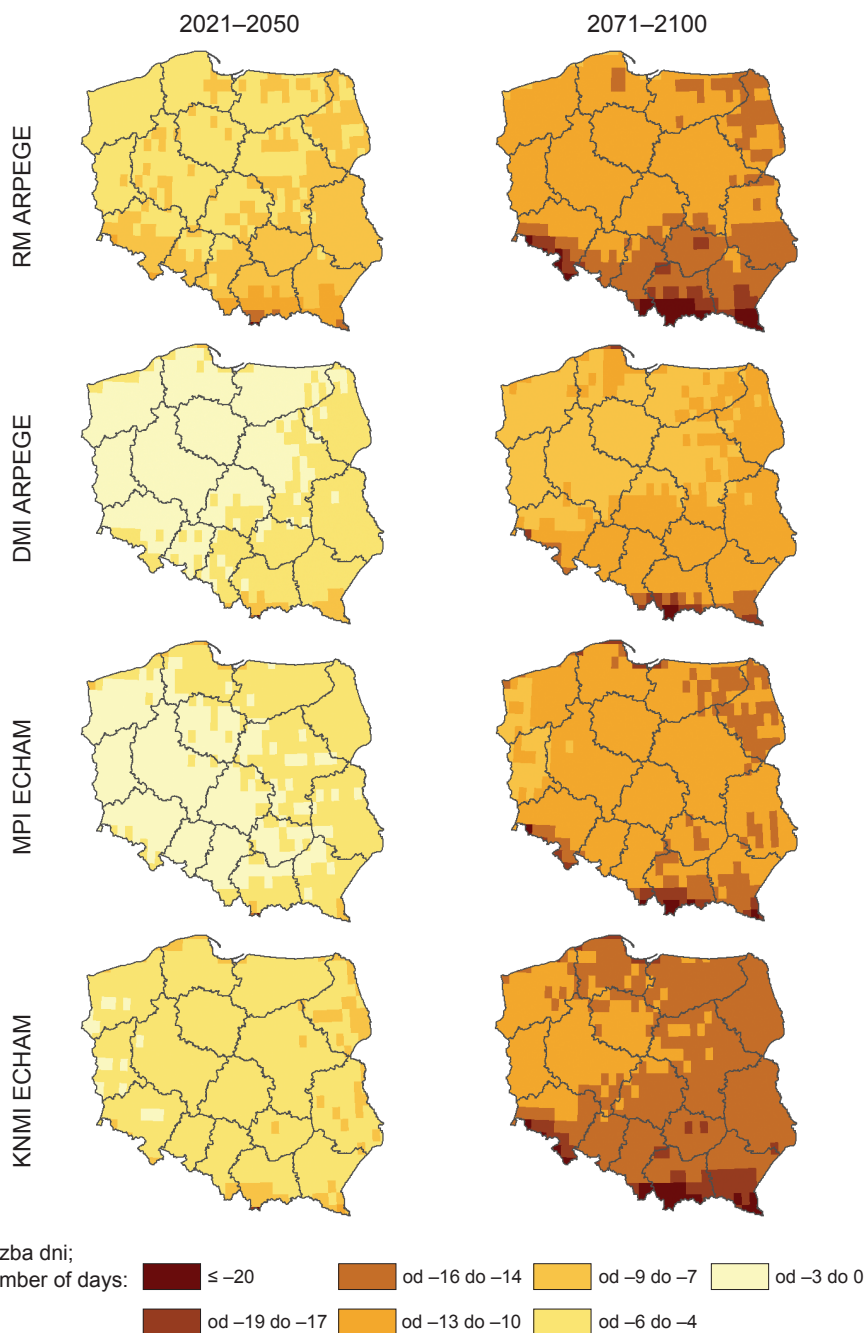


Rys. XVI. Zmiana terminu dojrzałości woskowej pszenicy ozimej w latach 2021–2050 i 2071–2100
względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM
Change in the date of yellow ripeness for winter wheat in the years 2021–2050 and 2071–2100
compared to period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios

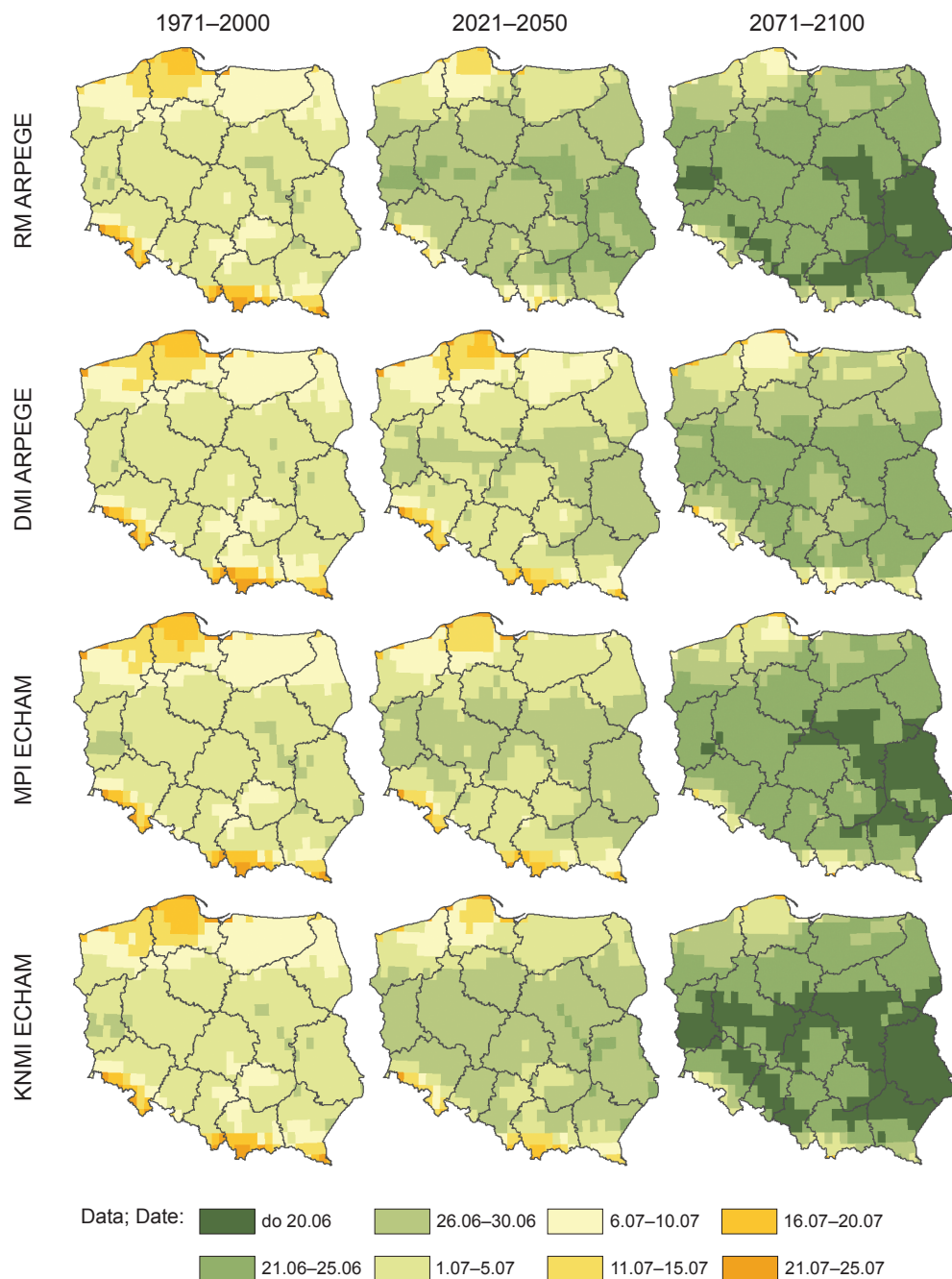


Rys. XVII. Termin dojrzalności woskowej żyta ozimego w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowany dla danych RCM

The date of yellow ripeness for winter rye in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data

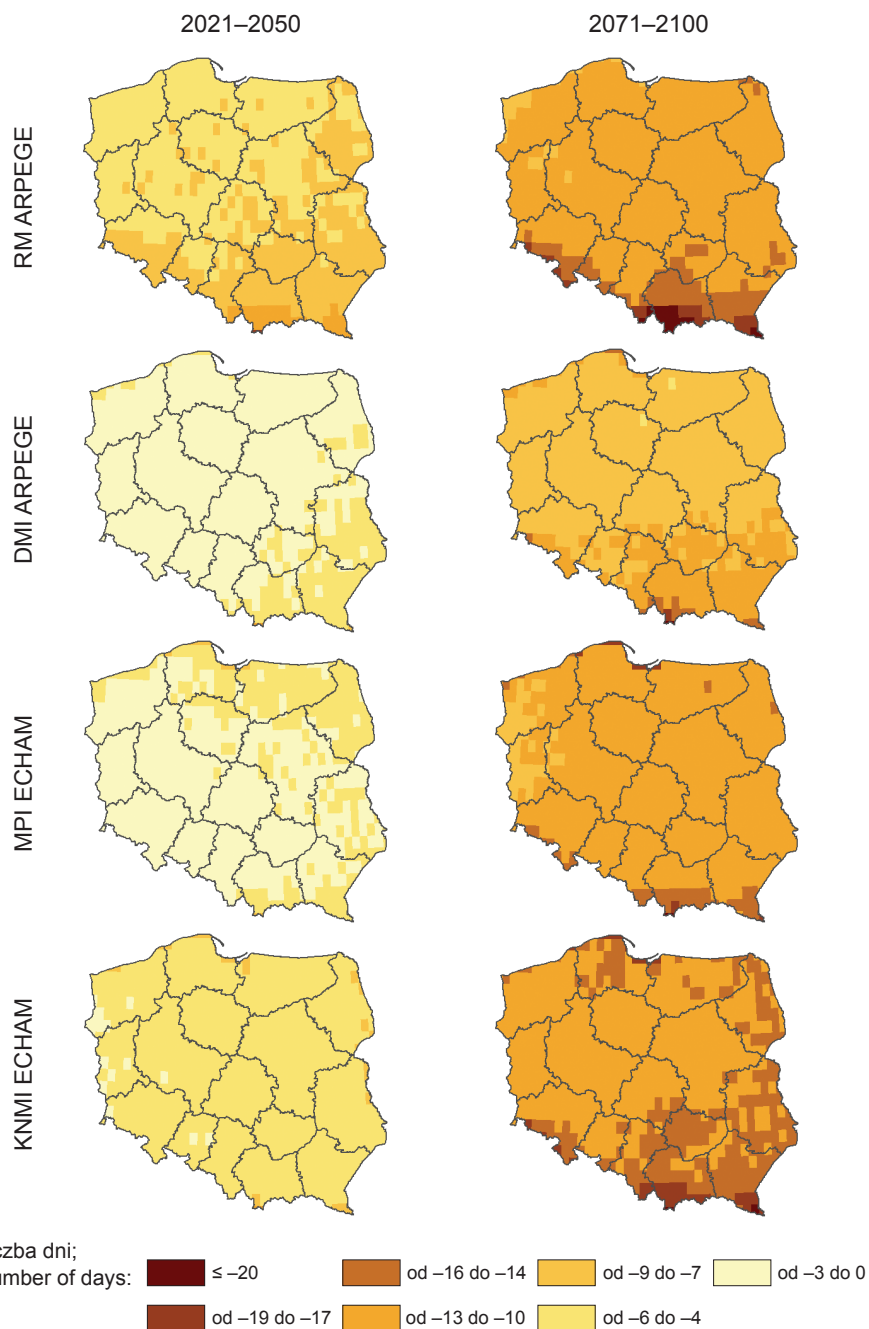


Rys. XVIII. Zmiana terminu dojrzałości woskowej żyta ozimego w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM
Change in the date of yellow ripeness for winter rye in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios



Rys. XIX. Termin dojrzałości woskowej jęczmienia ozimego w latach 1971–2000, 2021–2050 i 2071–2100 szacowany dla danych RCM

The date of yellow ripeness for winter barley in the years 1971–2000, 2021–2050 and 2071–2100, evaluated for RCMs data



Rys. XX. Zmiana terminu dojrzałości woskowej jęczmienia ozimego w latach 2021–2050 i 2071–2100 względem lat 1971–2000 szacowana dla scenariuszy RCM
Change in the date of yellow ripeness for winter wheat in the years 2021–2050 and 2071–2100 compared to the period 1971–2000, evaluated for RCMs scenarios

8. LITERATURA

1. Alcamo J., Moreno J.M., Novak B., Bindi M., Corobov R., Devoy R.J.N.: Europe. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007, pp. 580.
2. ARPEGE-Climat – Opis modelu. Protokół dostępu: <http://www.cnrm.meteo.fr/gmgec/arpege/arpege.html> [12.12.2012]
3. Arseniuk E., Anioł A.: Postęp biologiczny i technologie produkcji roślinnej w warunkach zmieniającego się klimatu. I Kongres Nauk Rolniczych, Nauka – Praktyce, Puławy, 14–15 maja, 2009, s. 53-59.
4. Bac S.: Wpływ mikroklimatu na fazy fenologiczne drzew owocowych. Zesz. Nauk. WSR Wrocław, 1958, 4: 3-49.
5. Bac S.: Pierwsze coroczne pojawy fenologiczne niektórych roślin na tle stosunków geofizycznych w Polsce. Roczn. Nauk. Rol., Seria A, 1970, 135: 1-116.
6. Badeck F.W., Bondeau A., Böttcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S.: Responses of spring phenology to climate change. New Phytologist, 2004, 162(2): 295-309.
7. Bis K., Demidowicz G., Deputat T., Górski T., Harasim A., Krasowicz S.: Ekonomiczne konsekwencje zmian klimatu w rolnictwie Polskim. Problemy Agrofizyki, Osolineum, Wrocław, 1993, 68: 1-39.
8. Biswas D.K., Xu H., Li Y.G., Ma B.L., Jiang G.M.: Modification of photosynthesis and growth responses to elevated CO₂ by ozone in two cultivars of winter wheat with different years of release. J. Exp. Bot., 2003, 64(6): 1485-1496.
9. Bonhomme R.: Bases and limits to using 'degree.day' units. Eur. J. Agron., 2000, 13: 1-10.
10. Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger F., Bussiere F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillere J.P., Henault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H.: An overview of the crop model stics. Eur. J. Agron., 2003, 18: 309-332.
11. Calanca P., Kaifez Bogataj L., Halenka T., Cloppet E., Mika J.: Use of climate scenarios in agrometeorological studies; paste expireince and future needs. In: Survey of agrometeorological practices and applications in Europe regarding climate change impacts COST Report, P. Niejedlik and S. Orlandini (eds). 2008. Protokół dostępu: <http://www.cost74.eu> [01.09.2013]
12. Cattivelli L., Rizza F., Badeck F.W., Mazzucotelli E., Mastrangelo A.M., Francia E., Mare C., Tondelli A., Stance A.M.: Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. Field Crop Res., 2008, 105: 1-14.
13. Cesaraccio C., Spano D., Duce P., Snyder R.L.: An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. Int. J. Biometeorol., 2001, 45: 161-169.
14. Challinor A.J., Ewert F., Arnold S., Simelton E., Fraser E.: Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. J. Exp. Bot., 2009, 60(10): 2775-2789.
15. Chmielewski F.M., Rotzer T.: Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. Clim. Res., 2002, 19(3): 257-264.
16. Chmielewski F.M., Rotzer T.: Response of tree phenology to climate change across Europe. Agr. Forest Meteorol., 2001, 108(2): 101-112.

17. Chmielewski F.M., Muller A., Bruns E.: Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agr. Forest Meteorol.*, 2004, **121**: 69-78.
18. Christensen J.H., Carter T.R., Rummukainen M., Amanatidis G.: Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, 2007, **81**: 1-6.
19. Christensen J.H., Kjellström E., Giorgi F., Lenderink G., Rummukainen M.: Weight assignment in regional climate models. *Clim. Res.*, 2010, **44**: 179-194.
20. Chuine I., Beaubien E.G.: Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecol. Lett.*, 2001, **4(5)**: 500-510.
21. Chuine I., Yiou P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Le Roy Laduire E.: Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 2004, **432(7015)**: 289-290.
22. Cleland E.E., Chuine I., Menzel A., Mooney H.A., Schwartz M.D.: Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.*, 2007, **22**: 357-365.
23. Cleveland W.S.: Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *J. Am. Stat. Assoc.*, 1979, **74(368)**: 829-836.
24. Cleveland W.S., Deviline S.J.: Locally weighted regression: An approach to regression analysis by local fitting. *J. Am. Stat. Assoc.*, 1988, **83(403)**: 596-610.
25. Craufurd P.Q., Wheeler T.R.: Climate change and the flowering time of annual crops. *J. Exp. Bot.*, 2009, **60(9)**: 2529-2539.
26. Czarnicka M.: Zimowanie roślin ozimych w Polsce a niekorzystne warunki klimatyczne. AR Szczecin, Rozprawy habilitacyjne, 1998, **182**: 1-108.
27. Demidowicz G., Kozyra J., Jazurek M.: Results of phenological observations carried out in Puławy in relation to climatic trends. *Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geograficzne*, 2001, **75**: 359-369.
28. Deputat T.: Wpływ temperatury na długość międzyfazowych okresów rozwojowych pszenicy jarej. *Pam. Puł.*, 1974, **60**: 129-145.
29. Deputat T.: Konsekwencja zmian klimatu w fenologii wybranych roślin uprawnych. W: *Zmiany i zmienność klimatu Polski*. Mat. Konf. Nauk. UŁ, 04–06 listopada, Łódź, 1999, s. 49-56.
30. Deputat T., Demidowicz G., Kaczyński L.L.: Klimatyczne uwarunkowania rozwoju jęczmienia ozimego. *Pam. Puł.*, 1996, **107**: 28-38.
31. Deputat T., Marcinkowska I.: Klimatyczne uwarunkowania rozwoju żyta. *Zesz. Nauk. AR Wrocław*, 1997, **15(313)**: 49-57.
32. Deputat T., Marcinkowska I.: Wymagania termiczne pszenicy ozimej. *Pam. Puł.*, 1999a, **118**: 87-98.
33. Deputat T., Marcinkowska I.: Wymagania termiczne rozwoju żyta. *Pam. Puł.*, 1999b, **188**: 87-98.
34. Dragońska E., Szwejkowski Z., Panfil M., Orzech K.: Wpływ spodziewanych zmian klimatu na fenologię kukurydzy uprawianej na ziarno w Wielkopolsce. *Acta Agroph.*, 2008, **12(2)**: 327-336.
35. Déqué M., Drevet C., Braun A., Cariolle D.: The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modeling. *Clim. Dynam.*, 1994, **10**: 249-266.
36. EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report. No. 12/2012.

37. ENSEMBLES data archive. Protokół dostępu: <http://ensemblesrt3.dmi.dk> [12.09.2013]
38. Estrella N., Sparks T.H., Menzel A.: Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Glob. Change Biol.*, 2007, **13**(8): 1737-1747.
39. Fisher J.I., Mustard J.F., Vadeboncoeur M.A.: Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite. *Remote Sens. Environ.*, 2006, **100**: 265-279.
40. Fronzek S., Carter T.R.: Assessing uncertainties in climate change impacts on resource potential for Europe based on projections from RCMs and GCMs. *Climatic Change*, 2007, **81**: 357-371.
41. García-Mozo H., Mestre A., Galán C.: Data contributors, Phenological trends in southern Spain: A response to climate change. *Agr. Forest Meteorol.*, 2010, **150**: 575-580.
42. Galant H., Andruszczak S.: Wpływ warunków meteorologicznych na długość międzyfaz żyta ozimego. *Ann. UMCS, Sect. E*, 2004, **59**(2): 833-838.
43. Godfray Ch.J., Beddington J.R., Crute I.R., Haddad L., Lawrence D., Muir J.F., Pretty J., Robinson S., Thomas S.M., Toulmin C.: Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 2010, **327**: 812.
44. Ghibelline A.L., Déqué M.: Anthropogenic climate change over the Mediterranean area simulated by a global variable resolution model. *Clim. Dynam.*, 2003, **20**: 327-339.
45. González F.G., Slafer G.A., Miralles D.J.: Vernalization and photoperiod responses in wheat pre-flowering reproductive phases. *Field Crop Res.*, 2002, **74**: 183-195.
46. Górski T.: Przestrzenny rozkład terminów dojrzewania prosa w Polsce wyznaczony na podstawie sum temperatur efektywnych. *Pam. Puł.*, 1967, **30**: 145-175.
47. Górski T.: Model średniej temperatury powietrza w Polsce. *Acta Agroph.*, 2005, **6**(1): 73-83.
48. Górski T.: Changes in Poland's agroclimatic conditions over the last century. *Papers on Global Change, IGBP PAS*, 2006, **14**: 55-67.
49. Górski T., Jakubczak Z.: W sprawie metody sum temperatur w agrometeorologii. *Rocz. Nauk Rol.*, 1965, **90**(A2): 215-231.
50. Górski T., Jazurek M.: Fifty-year records of flowering dates of *Prunus Padus* L. and *Robinia Pseudoacacia* L. in Pulawy, Poland. *Proc. 14th Inter. Congresses of Biometeorology*, 10-14 June, 1996, **2**: 195-200.
51. Górski T., Kozyra J.: Agroklimatyczna norma średniej temperatury powietrza w Polsce na lata 2011-2020. *Pol. J. Agron.*, 2011, **5**: 21-28.
52. Górski T., Krasowicz S., Kuś J.: Glebowo-klimatyczny potencjał Polski w produkcji zbóż. *Pam. Puł.*, 1999, **114**: 127-142.
53. Górski T., Zaliwski A.: Model Agroklimatu Polski. *Pam. Puł.*, 2002, **130**/1: 251-260.
54. Grabiński J., Hołubowicz-Kliża G., Brzóska F.: Uprawa i wykorzystanie żyta ozimego. Instrukcja upowszechnieniowa IUNG-PIB, 2007a, **138**: 1-80.
55. Grabiński J., Jaśkiewicz B., Podolska G., Sułek A.: Terminy siewu w uprawie zbóż. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2007b, **9**: 37-44.
56. GUS – Główny Urząd Statystyczny: Rocznik statystyczny rolnictwa 2011 r. Warszawa, 2012, ss. 393.
57. Harrington R., Clark S.J., Welham S.J., Verrier P.J., Denholm C.H., Hulle M., Maurice D., Rounsevell M.D., Cocu N.: Consortium European Union Examine: environmental change and the phenology of European aphids. *Glob. Change Biol.*, 2007, **13**(8): 1550-1564.

58. Halenka T., Mika J., Varga G., Pajtok-Tari I., Calanka P.: Availability, assessment and development of regional climate scenarios for Europe. In: *Climate change impacts on agriculture in Europe*, S. Orlandini and P. Nijedlik (eds). Final Report of COST Action 734 "Impact of climate change and variability on European agriculture", Firenze University Press, 2012, p. 147-170.
59. Iglesias A., Garrote L., Quiroga S., Moneo M.: Impacts of climate change in agriculture in Europe. PESETA-Agriculture study. JRC 55386, 2009, pp. 51.
60. Jacob D.: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2001, **77(1-4)**: 61-73.
61. Jacob D., Andrae U., Elgered G., Fortelius C., Graham L.P., Jackson S.D., Karstens U., Koepken Chr., Lindau R., Podzun R., Rockel B., Rubel F., Sass H.B., Smith R.N.D., Van den Hurk B.J.J.M., Yang X.: A Comprehensive Model Intercomparison Study Investigating the Water Budget during the BALTEX-PIDCAP Period. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2001, **77(1-4)**: 19-43.
62. Jatzak K.: COST 725. Tworzenie europejskiej sieci danych fenologicznych do zastosowań w klimatologii. *Gazeta Obserwatora IMGW*, 2005, **2**: 30-31.
63. Juszczak R., Leśny J., Olejnik J.: Sumy temperatur efektywnych jako element prognozy agrometeorologicznej Wielkopolskiego Internetowego Serwisu Informacji Agrometeorologicznej (WISIA). *Acta Agroph.*, 2008, **12(2)**: 409-426.
64. Karliński M., Kędziora A.: Statystyczna interpretacja zależności niektórych pojavów fenologicznych od temperatury powietrza. *Przegląd Geofizyczny*, 1967, **12(2)**: 121-130.
65. Kalbarczyk E.: Wymagania termiczne pszenżyta ozimego. *Acta Sci. Pol., Agricultura*, 2005, **4(1)**: 41-50.
66. Kalbarczyk E., Kalbarczyk R.: Przebieg faz fenologicznych ziemniaka i jego uwarunkowania wieloletnią zmiennością temperatury powietrza. *Ann. UMCS, Sect. EE*, 2010, **LXV(4)**: 1-11.
67. Kalbarczyk R., Raszka B., Kalbarczyk E.: Variability of the Course of Tomato Growth and Development in Poland as an Effect of Climate Change. In: *Climate Change – Socioeconomic Effects*, J. Blanco and H. Kheradmand (eds). In. Tech., 2011, p. 279-306.
68. Koźmiński Cz.: Agrofenologia pszenicy ozimej. W: *Atlas klimatycznego ryzyka uprawy roślin w Polsce*, Cz. Koźmiński i B. Michalska (red.), AR Szczecin, Uniwersytet Szczeciński, 2001, s. 30.
69. Kożuchowski K., Baliński W., Bartnik A., Buczyło K., Degirmendzie J., Fortuniak K., Jokiel P., Liszewska M., Minkiewicz T., Papiernik Ż., Podogrodzki J., Wagner A., Wibig J., Żmudzka E.: Pory roku w Polsce. Sezonowe zmiany w środowisku a wieloletnie tendencje klimatyczne. Łódź 2000, ss. 174.
70. Keatley M.R., Fletcher T.D., Hudson, I.L., Aides P.K.: Phenological studies in Australia: potential application in historical and future climate analysis. *Int. J. Climatol.*, 2002, **22(14)**: 1769-1780.
71. Kędziora A.: Prognoza zmian klimatycznych. W: *Prognoza ostrzegawcza zmian środowiskowych warunków życia człowieka w Polsce na początku XXI wieku*, S. Kozłowski (red.). Zeszyty Naukowe PAN „Człowiek i środowisko”, 1995, **10**: 97-132.
72. Kirby E., Spink J., Frost D., Sylvester-Bradley R., Scott R., Foulkes M., Clare R., Evans E.: A study of wheat development in the field: analysis by phases. *Eur. J. Agron.*, 1999, **11**: 63-82.
73. Kołodziej J.: Czasowe i przestrzenne zróżnicowanie pojavów fenologicznych jęczmienia jarego w warunkach klimatu Polski. *Ann. UMCS, Sect. E*, 1976, **31**: 129-146.

74. Korpalska-Chabior G.: Agrofologia żyta ozimego. W: Atlas klimatycznego ryzyka uprawy roślin w Polsce, Cz. Koźmiński i B. Michalska (red.). AR Szczecin, Uniwersytet Szczeciński, plansza 31, 2001.
75. Kozyra J.: Climatic conditions for millet cultivation in Poland. CagM Report No. **94**: 34-35, WMO, Genewa, Switzland, 2004.
76. Kozyra J., Górski T.: Wpływ zmian klimatu na uprawę roślin w Polsce. Klimat-Środowisko-Człowiek, 2004, s. 41-50.
77. Kozyra J., Nieróbca A., Mizak K., Pudełko R., Borzęcka-Walker M., Faber A., Doroszewski A.: Zmiana klimatu – nowe wyzwanie dla rolnictwa, *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2010, **19**: 133-144.
78. Kozyra J., Pudełko R., Mizak K.: Wykorzystanie Modelu Agroklimatu Polski do analiz agrotopoklimatycznych na przykładzie gminy Korczyna. *Acta Agroph.*, 2005, **6(1)**: 133-144.
79. Kożuchowski K., Żmudzka E.: Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury w drugiej połowie XX wieku. *Przegląd Geofizyczny*, 2001, **4(1-2)**: 81-90.
80. Kristensen K., Schelde K., Olesen J.E.: Winter wheat yield response to climate variability in Denmark. *J. Agr. Sci.*, 2011, **149(01)**: 33-47.
81. Kuchar L., Lipiec J., Rejman J., Kołodziej J., Kaszewski B.: Symulacje plonów potencjalnych jęczmienia jarego przy użyciu modelu CERES-Barley na obszarze Polski środkowo-wschodniej. *Acta Agroph.*, 2004, **3(3)**: 541-551.
82. Kuchar L.: Zmodyfikowany model WGENK generowania danych meteorologicznych na potrzeby modelowania agrometeorologicznego. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2005, **5(14)**: 185-196.
83. Kundzewicz Z.W., Kozyra J.: Ograniczanie wpływu zagrożeń klimatycznych w odniesieniu do rolnictwa i obszarów wiejskich. *Pol. J. Agron.*, 2011, **7**: 68-81.
84. Leśny J., Serba T., Juszcak R., Olejnik J.: Wyniki projektu ADAGIO – identyfikacja zagrożeń i rozpowszechnianie wiedzy w zakresie wpływu zmian klimatycznych na rolnictwo w Europie. W: *Klimatyczne zagrożenia rolnictwa w Polsce*, Cz. Koźmiński, B. Michalska i J. Leśny (red.). *Rozprawy i Studia, Acta Agroph.*, 2010, **DCCCXLVII(773)**: 161-174.
85. Laurie D.A., Griffiths S., Dunford R.P., Christodoulou V., Taylor S.A., Cockram J., Beales J., Turner A.: Comparative genetic approaches to the identification of flowering time genes in temperate cereals. *Field Crop Res.*, 2004, **90**: 87-99.
86. Listowski A.: O fotoperiodycznej reakcji roślin (poglądy i ich ewolucja). IV Sem. Fitoaktywności, IUNG Puławy, 8–10 września, 1977, s. 7-20.
87. Liszewska M., Koncka-Kędzierska K., Jakubiak B.: Opracowanie scenariuszy zmian klimatu dla Polski i wybranych regionów. Raport z wykonania projektu KLIMADA, ETAP I, Warszawa, Maszynopis w IOŚ, październik 2011.
88. Lobell D.B., Burke M.B., Tebaldi C., Mastrandrea M.D., Falcon W.P., Naylor R.L.: Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science*, 2008, **319(5863)**: 607-610.
89. Lobell D.B., Burke M.B.: On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agr. Forest Meteorol.*, 2010, **150**: 1443-1452.
90. Long S.P., Ainsworth E.A., Leakey A.D.B., Morgan P.B.: Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Phil. Trans. R. Soc.*, 2005, **B360**: 2011-2020.
91. Maslim M., Austin P.: Climate models at their limit? *Nature*, 2012, **486**: 183-184.

92. McMaster G.S., Wilhelm W.W.: Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agr. Forest Meteorol.*, 1997, **87**: 291-300.
93. Menzel A., Julia von V., Estrella N., Schleip C., Dose V.: Farmers annual activities are not tracking the speed of climate change. *Clim. Res.*, 2006a, **32(3)**: 201-207.
94. Menzel A., Sparks T.H., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R., Alm-Kübler K., Bissolli P., Braslavska O., Briede A., Chmielowski F.M., Crepinsek Z., Curnel Y., Dahl A., Defila C., Donnelly A., Fiella Y., Jatzak K., Mage F., Mestre A., Nordli O., Penuelas J., Prinen P., Remisova V., Scheifinger H., Striz M., Sisnik A., van Vliet A.J.H., Wielgolaski F.M., Zach S., Zust A.N.A.: European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Change Biol.*, 2006b, **12(10)**: 1969-1976.
95. Menzel A., Vopelius J.V., Estrella N., Schleip C., Dose V.: Farmers annual activities are not tracking the speed of climate change. *Clim. Res.*, 2006c, **32(3)**: 201-207.
96. Michalska B.: Agrofologia jęczmienia ozimego. W: Atlas klimatycznego ryzyka uprawy roślin w Polsce, Cz. Koźmiński i B. Michalska (red.). AR Szczecin, Uniwersytet Szczeciński, 2001, s. 30.
97. Michalska B.: Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce. *Prace i Studia Geograficzne*, 2011, **47**: 67-75.
98. Mirschel W., Wenkel K.O., Schultz A., Pommerening J., Verch G.: Dynamic phenological model for winter rye and winter barley. *Eur. J. Agron.*, 2005, **23**: 123-135.
99. Modelling European Agriculture with Climate Change for Food Security – a FACCE JPI knowledge hub. Protokół dostępu: www.macsur.eu [11.09.2013]
100. Moriondo M., Bindi M., Kundzewicz Z.W., Szwed M., Choryński A., Matczak P., Radziejewski M., McEvoy D., Wreford A.: Impact and adaptation opportunities for European agriculture in response to climatic change and variability. *Mitig. Adapt. Strategies for Global Change*, 2010, **15(7)**: 657-679.
101. Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R.: Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, **386(6626)**: 698-702.
102. Noworolnik K.: Jęczmień ozimy. Zalecenia Agrotechniczne, Technologie uprawy zbóż, IUNG Puławy, 1999, **39(3)**: 32.
103. Oettli P., Sultan B., Baron Ch., Vrac M.: Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? *Environ. Res. Lett.*, 2011, **6**: 1-8.
104. Olesen J.E., Bindi M.: Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agron.*, 2002, **16**: 239-262.
105. Olesen J.E., Borgeisen C.D., Elsgaard L., Palosuo T., Rötter R.P., Skjelvag A.O., Peltonen-Sainio P., Börjesson T., Trnka M., Ewert F., Siebert S., Brisson F., Eitzinger J., van Asselt E.D., Oberforster M., van der Fels-Klerx H.J.: Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2012, **29(10)**: 1527-1542.
106. Olesen J.E., Carter T.R., Diaz-Ambrona C.H., Fronzek S., Heidman T., Hickler T., Holt T., Minguuez M.I., Morales P., Palutikof J.P., Quemada M., Ruiz-Ramos M., Rubaek G.H., Sau F., Smith B., Sykes M.T.: Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change*, 2007, **81**: 123-143.
107. Olesen J.E., Jensen T., Petersen J.: Sensitivity of field-scale winter wheat production in Denmark to climate variability and climate change. *Clim. Res.*, 2000, **15(3)**: 221-238.

108. Olesen J.E., Petersen B.M., Bertsen J., Hansen S., Jamieson P.D., Thomsen A.G.: Comparison of methods for simulating effects of nitrogen on green area index and dry matter growth in winter wheat. *Field Crop Res.*, 2002, **74**: 131-149.
109. Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvag A.O., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rossi F., Kozyra J., Micale F.: Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *Eur. J. Agron.*, 2011, **34**(2): 96-112.
110. Panecka K.: Próba ustalenia czasu trwania okresu wegetacyjnego pszenicy ozimej w Polsce na podstawie danych fenologicznych za lata 1948-/9-1955/6. *Wiad. Sl. Hydro. Met.*, 1960, **8**(4): 17-36.
111. Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E.: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2007, pp. 976.
112. Parmesan C., Yohe G.: A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, **421**(6918): 37-42.
113. Podolska G., Hołubowicz-Kliza G.: Uprawa pszenicy ozimej na cele młynarskie. Instrukcja upowszechnieniowa IUNG-PIB, 2009, **155**: 1-74.
114. Porter J.R., Gawith M.: Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *Eur. J. Agron.*, 1999, **10**: 23-36.
115. Porter J.R., Semenov M.A.: Crop responses to climatic variation. *Phil. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.*, 2005, **360**(1463): 2021-2035.
116. Prawdzic K.: Różnice fenologiczne w rozwoju żyta ozimego w poszczególnych krainach klimatycznych woj. szczecińskiego. *Zeszt. Nauk. WSR, Szczecin*, 1963, **10**: 89-132.
117. Primack R.B., Ibanez I., Higuchi H., Don Lee S., Miller-Rushing A.J., Wilson A.M., Silander J.A.: Spatial and interspecific variability in phenological responses to warming temperatures. *Biol. Conserv.*, 2009, **142**: 2569-2577.
118. Projekt KLIMAT: Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo (zmiany, skutki i sposoby ich ograniczania, wnioski dla nauki, praktyki inżynierskiej i planowania gospodarczego. Protokół dostępu: <http://klimat.imgw.pl/http://klimat.imgw.pl/> [11.09.2013]
119. Radu R., Déqué M., Somot S.: Spectral nudging in a spectral regional climate model. *Tellus*. 2008, **60A**(5): 885-897.
120. Raszka E.: Wpływ wybranych czynników meteorologicznych na przebieg rozwoju pszenżyta ozimego w Stacji Doświadczalnej Oceny Odmian Sulejów. *Fol. Unow. Agric. Stetin.*, 1999, **78**: 259-268.
121. Raszka E.: Agrofologia pszenżyta jarego w Polsce. *Ann. UMCS, Sect. E*, 2002, **57**: 9-16.
122. Reidsma P., Ewert F.: Regional Farm Diversity Can Reduce Vulnerability of Food Production to Climate Change. *Ecol. Soc.*, 2008, **13**(1). Protokół dostępu: www.ecologyonsociety.org/vol13/iss1/art38 [12.09.2013]
123. Reidsma P., Ewert F., Lansink A.O., Leemans R.: Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. *Eur. J. Agron.*, 2010, **32**: 91-102.
124. Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblueh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A.: The atmospheric general circulation model ECHAM5 – description. Max Planck Institute for Meteorology Report No. 349, 2003, pp. 127. Protokół dostępu: <http://www.mpimet.mpg.de/> [01.09.2013]

125. Rosenzweig C., Jones J.W., Hatfield J.L., Ruane A.C., Boote K.J., Thorburn P., Antle J.M., Nelson G.C., Porter C., Janssen S., Asseng S., Basso B., Ewert F., Wallach D., Baigorria G., Winter J.M.: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agr. Forest Meteorol.*, 2013, **170**: 166-182.
126. Romer R.: Okresy gospodarcze w Polsce. *Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego*, 1949, **B(20)**: 132.
127. Rötter R.P., Carter T.R., Olesen J.E., Porter J.R.: Crop-climate models need an overhaul. *Nature Clim. Change*, 2011, **1**: 175-177.
128. Rötter R.P., Palosuo T., Kersebaum K.C., Angulo C.M., Bindi C., Ewert F., Ferrise R., Hlavinka P., Moriondo M., Nendel C., Olesen J.E., Patil R.H., Ruget F., Takác J., Trnka M.: Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. *Field Crops Res.*, 2012, **133**: 23-36.
129. Rybarczyk J.: Analiza zmienności warunków termicznych i opadów atmosferycznych w Stacjach i Zakładach Doświadczalnych Oceny Odmian w latach 1967–2010. *Wiadomości Odmianoznawcze. Centralny Ośrodek Badania Odmian i Roślin Uprawnych, Słupia Wielka*, 2011, **86**: 64.
130. Sadowski M., Wszyński Z., Górski T., Liszewska M., Olecka A., Łoboda T., Pietkiewicz S.: Adaptacja produkcji rolnej w województwie podlaskim do oczekiwanych zmian klimatu. *IOŚ, Warszawa*, 2009, ss. 92.
131. Sokołowska J.: Pojawy fenologiczne świata roślinnego w Polsce. *Atlasy i monografie, Wyd. Komunikacji i Łączności Warszawa*, 1980, ss. 92.
132. Scheffinger H., Menzel A., Koch E., Peter C.: Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, 2003, **74**: 41-51.
133. Schwartz M.D., Ahas R., Aasa A.: Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Glob. Change Biol.*, 2006, **12(2)**: 343-351.
134. Semenov M.A.: Impacts of climate change on wheat in England and Wales. *J. R. Soc. Interface*, 2009, **6(33)**: 343-350.
135. Semenov M.A., Martre P., Jamieson P.D.: Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach. *Agr. Forest Meteorol.*, 2009, **149**: 1095-1104.
136. Siebert S., Ewert F.: Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. *Agr. Forest Meteorol.*, 2012, **152(0)**: 44-57.
137. Sparks T.H., Menzel A.: Observed changes in seasons: an overview. *Int. J. Climatol.*, 2002, **22(14)**: 1715-1725.
138. Sparks T.H., Tryjanowski P.: The detection of climate impacts: some methodological considerations. *Int. J. Climatol.*, 2005, **25(2)**: 271-277.
139. Springer C.J., Ward J.K.: Flowering time and elevated atmospheric CO₂. *New Phytol.*, 2007, **176(2)**: 243-255.
140. Stuczyński T., Demidowicz G., Deputat T., Górski T., Krasowicz S., Kuś J.: Adaptation scenarios of agriculture in Poland to future climate changes. *Environ. Monit. Assess.*, 2000, **61**: 133-144.
141. Szafer W.: O fenologicznych porach roku w Polsce. *Kosmos*, 1922, **47(1-3)**: 371-408.
142. Szwed M., Karg G., Pińskwar I., Radziejowski M., Raczyk D., Kędziora A., Kundzewicz Z.W.: Climate change and its effect on agriculture, water resources and human health sectors in Poland. *Nat. Hazard Earth Sys.*, 2010, **10**: 1725-1737.

143. Tao F., Zhang S., Zhang Z.: Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics. *Eur. J. Agron.*, 2012, **43(0)**: 201-212.
144. The R Project for Statistical Computing. Protokół dostępu: <http://www.r-project.org> [11.12.2009]
145. Tomaszewska T., Rutkowski Z.: Fenologiczne pory roku i ich zmienność w wieloleciu 1951–1990. *Mat. Bad. IMGW, Meteorologia*, 1999, **28**: 1-39
146. Trnka M., Olesen J.E., Kersebaum K.C., Skjelvag A.O., Eitzinger J., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rötter R., Iglesias A.N.A., Orlandini S., Dubrovsky M., Hlavinka P., Balek J., Eckersten H., Cloppet E., Calanca P., Gobin A., Vucetic V., Nejedlik P., Kumar S., Lalic B., Mestre A., Rossi F., Kozyra J., Alexandrov V., Semerádová D., Zalud Z.: Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Glob. Change Biol.*, 2011, **17(7)**: 2298-2318.
147. Tryjanowski P., Panek M., Sparks T.: Phenological response of plants to temperature varies at the same latitude: case study of dog violet and horse chestnut in England and Poland. *Clim. Res.*, 2006, **32(1)**: 89-93.
148. van der Linden P., Mitchell J.F.B.: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 2009, ss. 160.
149. van Ittersum M.K., Leffelaar P.A., van Keulen M.J., Bastiaans L., Goudriaan J.: On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.*, 2003, **18**: 201-234.
150. van Meijgaard E., van Uft L.H., van de Berg W.J., Bosveld F.C., van den Hurk B.J.J.M., Lenderink G., Siebesma A.P.: The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1. KNMI Technical Report 302, 2008, pp. 43, Available from KNMI, Postbus 201, 3730 AE, De Bilt, The Netherlands. Protokół dostępu: <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubTR/TR302.pdf> [12.12.2012]
151. van Oort P.A.J., Timmermans B.G.H., van Swaaij A.C.P.M.: Why farmers' sowing dates hardly change when temperature rises. *Eur. J. Agron.*, 2012, **40**: 102-111.
152. van Vuuren D.P., Isaac M., Kundzewicz Z.W., Arnell N., Barker T., Criqui P., Berkhout F., Hilderink H., Hinkel J., Hof A., Kitous A., Kram T., Mechler R., Srieiciu S.: The use of scenarios as the basis for combined assessment of climate change mitigation and adaptation. *Glob. Environ. Chang.*, 2011, **21(2)**: 575-591.
153. Vautard R., Gobiet A., Jacob D., Belda M., Colette A., Déqué M., Fernández J., García-Díez M., Goergen K., Güttler I., Halenka T., Karacostas T., Katragkou E., Keuler K., Kotlarski S., Mayer S., Meijgaard E., Nikulin G., Patarčić M., Scinocca J., Sobolowski S., Suklitsch M., Teichmann C., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V., Yiou P.: The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim. Dynam.*, 2013, p. 1-21.
154. Wolkovich E.M., Cook B.I., Allen J.M., Crimmins T.M., Betancourt J.L., Travers S.E., Pau S., Regetz J., Davies T.J., Kraft N.J.B., Ault T.R., Bolmgren K., Mazer S.J., McCabe G.J., McGill B.J., Parmesan C., Salamin N., Schwartz M.D., Cleland E.E.: Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*, 2012, **485(7399)**: 494-497.
155. World Data Center (WDC) for Meteorology – NOAA – National Climatic Data Center. Protokół dostępu: <http://www.ncdc.noaa.gov/> [11.12.2009]

156. Yang S., Logan J., Coffey D.L.: Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agr. Forest Meteorol.*, 1995, **74**(1-2): 61-74.
157. Zhang, X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., Reed B.C.: Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sens. Environ.*, 2003, **84**: 471-475.
158. Żmudzka E.: Wieloletnie zmiany zasobów termicznych w okresie wegetacyjnym i aktywnego wzrostu roślin w Polsce. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2012, **12**(2): 377-389.
159. Żmudzka E., Dobrowolska M.: Termiczny okres wegetacyjny w Polsce – zróżnicowanie przestrzenne i zmienność czasowa. *Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW*, 2001, **21**: 75-80.

WPŁYW PROGNOZOWANYCH ZMIAN TEMPERATURY NA FENOLOGIĘ ZBÓŻ OZIMYCH W POLSCE

Streszczenie

Słowa kluczowe: zmiany klimatu, zboża ozime, fenologia roślin, regionalne modele klimatu, modele sum temperatur efektywnych

Ocena zmian w fenologii roślin stanowi bardzo ważny element analiz wpływu zmian klimatu na rolnictwo. Dotychczasowe prace związane z fenologią roślin w Polsce w warunkach zmian klimatu koncentrowały się głównie na roślinach ciepłolubnych, dla których prognozowany w XXI w. wzrost temperatury ma bardzo duże znaczenie. Jednak w odpowiedzi na potrzeby przygotowania działań adaptacyjnych wobec zmian klimatu należy zwrócić uwagę głównie na uprawy decydujące o potencjale produkcyjnym rolnictwa, którymi są w Polsce analizowane w tej pracy zboża ozime. Potrzebna jest również dyskusja o obserwowanych w ostatnich latach zmianach w fenologii roślin w wyniku udokumentowanego już wzrostu temperatury. Z punktu widzenia nauki o zmianach klimatu istnieje natomiast konieczność prowadzenia analiz najnowszych scenariuszy klimatycznych w różnych zastosowaniach praktycznych.

Celem niniejszej pracy jest ocena tendencji zmian w fenologii pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego w Polsce w latach 1990–2011, budowa modeli fenologicznych na podstawie danych obserwacyjnych z wielolecia 1990–2011 i analiza zmian w fenologii dla najnowszych scenariuszy klimatycznych w XXI w. opracowanych w Regionalnych Modelach Klimatu.

Dane dotyczące terminów siewu, wschodów, wiosennego wznowienia wegetacji, kłoszenia i dojrzałości woskowej analizowanych zbóż ozimych zostały zebrane w doświadczeniach polowych prowadzonych przez Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych (COBORU) w latach 1990–2011, w 36 stacjach doświadczalnych. Liczba obserwacji (kombinacja: rok – punkt obserwacyjny) różniła się dla poszczególnych faz fenologicznych i maksymalnie osiągnęła dla pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego odpowiednio: 826, 545 i 618. Dane do opisu warunków termicznych pochodziły z najbliższej położonej od stacji doświadczalnej COBORU stacji synoptycznej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego w Warszawie. Analizę zmian w fenologii

przeprowadzono z wykorzystaniem danych pochodzących z czterech modeli regionalnej cyrkulacji udostępnionych w ramach projektu ENSEMBLES.

Dane obserwacyjne dotyczące fenologii zostały wykorzystane do opracowania prostych statystycznych modeli opisujących rozwój roślin, z wykorzystaniem metody sum temperatury efektywnej. W okresie od wiosennego wznowienia wegetacji do kłoszenia w konstrukcji modeli fenologicznych uwzględniono wpływ fotoperiodu. Opracowane modele fenologiczne zostały wykorzystane w ocenie zmian wymagań cieplnych i terminów pojawów fenologicznych analizowanych zbóż w warunkach prognozowanych na lata 2021–2050 i 2071–2100 w stosunku do lat 1971–2000. Oceniono również tendencje zmian terminów fenologicznych analizowanych zbóż w latach 1990–2011.

W pracy wykazano, że odmiany pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego uprawiane w doświadczeniach COBORU w latach 1991–2011 nie różniły się pod względem wymagań termicznych od uprawianych przed 1990 r. Można więc wnioskować, że obserwowane tendencje terminów fenologicznych w ostatnich latach są wynikiem wzrostu temperatury w Polsce. W latach 1990–2010 stwierdzono istotne tendencje zmian terminu siewu i wschodów jęczmienia ozimego (odpowiednio: 2,2 i 1,3 dnia na 10 lat) i pszenicy ozimej (odpowiednio: 1,5 i 3,5 dnia na 10 lat), natomiast brak zmian terminu siewu żyta przy zmianie terminu wschodów (1,1 dnia na 10 lat). W konsekwencji nastąpiło wydłużenie się okresu od siewu do wschodów pszenicy ozimej o 1,9 i żyta ozimego o 1,1 dnia na 10 lat, natomiast skrócenie w przypadku jęczmienia ozimego o 0,9 dnia na 10 lat. Stwierdzono tendencję do przyspieszania terminów kłoszenia i dojrzałości woskowej analizowanych zbóż (dni na 10 lat): pszenicy ozimej odpowiednio o 3,6 i 5,0, żyta ozimego – 2,8 i 5,0, jęczmienia ozimego 2,6 i 4,3. Widoczna jest równocześnie tendencja do przyspieszania terminu wznowienia wegetacji, szczególnie dla żyta ozimego (1,5 dnia na 10 lat), jednak są to tendencje nieistotne na poziomie $\alpha = 0,05$.

Według analizowanych czterech scenariuszy RCM w latach 2021–2050 wiosenny termin wznowienia wegetacji w Polsce będzie wcześniejszy niż w latach 1971–2000 o 4 dni i przypadać ma na 27 marca. Natomiast w latach 2071–2100 termin wznowienia wegetacji ma być wcześniejszy o 16 dni niż w latach 1971–2000 i ma przypadać na 16 marca. Zmiana terminu wznowienia wegetacji w perspektywie lat 2071–2100 spowoduje wzrost wymagań cieplnych zbóż, wyrażonych w stopniodniach, co zmniejszy zmiany w fenologii, które mogłyby wynikać ze wzrostu temperatury.

W latach 2021–2050, według scenariuszy RCM, termin kłoszenia pszenicy ozimej, żyta ozimego i jęczmienia ozimego będzie o 4 dni wcześniejszy niż w latach 1971–2000. Przyspieszenie terminu kłoszenia w latach 2071–2100 względem lat 1971–2000 w przypadku jęczmienia i żyta wyniesie 9 dni, a pszenicy – 10 dni. W latach 2021–2050, według scenariuszy RCM, termin dojrzałości woskowej pszenicy ozimej i żyta ozimego będzie wcześniejszy o 5 dni, a jęczmienia ozimego – 4 dni. W perspektywie lat 2071–2100 przyspieszenie dojrzałości woskowej pszenicy ozimej, żyta ozimego, jęczmienia ozimego wyniesie odpowiednio: 14, 12, 11 dni.

IMPACT OF PROJECTED AIR TEMPERATURE CHANGE ON WINTER CEREALS PHENOLOGY IN POLAND

Summary

Key words: climate change, winter cereals, crop phenology trend, regional climate models, effective degree-days models

The evaluation of changes in crop phenology is a very important element in studies of the impact of climate change on agriculture. Previous works on the phenology in Poland in terms of climate change were focused mainly on thermophilic plants, for which the impact of projected temperature rise in the twenty-first century is very significant. However, the wider needs to prepare the adaptation of agriculture to climate change should pay attention to the crops determining the production potential of agriculture, which in Poland are winter cereals, analysed in this work. There is also a need to discuss observed changes in crop phenology in recent years, arose due to already documented change in annual temperature cycle. Whilst, from the climate change science perspective there is a need to evaluate the recently evaluated climate scenarios in impacts assessment study.

The aim of this study is to assess trends in of the phenology of winter wheat, winter rye and winter barley in Poland in the years 1990–2011, the construction of phenological models based on observational data in the years 1990–2011 and the analysis of changes in phenology for the recently evaluated climate scenarios developed for the XXI century in regional climate models.

The phenological observation data were used to create simple statistical crop development models for analysed cereals, based on the concept of sum of effective temperature and impact of photoperiod during the period from spring vegetation renewal to heading. Then using evaluated models and climate scenarios from four regional climate models (RCM), developed by the ENSEMBLES project for 2021–2051 and 2071–2100, the changes in thermal requirements and phenology were analysed compared to period 1971–2000. Trends in the terms of analysed phenological stages during the period 1990–2011, were also analysed.

Records on dates of sowing, emergence, spring vegetation renewal, heading and yellow ripeness of analysed cereals were collected from field experiments managed by Research Centre for Cultivar Testing (COBORU) conducted during the period 1990–2011 in 36 experimental stations. The number of observations (site–year–combinations) varied with phenological phase, but reached maxima of 826, 545, 618 for winter wheat, winter rye and winter barley respectively. Data, describing the thermal conditions came from synoptic stations of the Institute of Meteorology and Water Management - National Research Institute located in the nearest distance to COBORU experimental station.

The study showed that the varieties of winter wheat, winter rye and winter barley grown in COBORU experiments in the years 1991–2011, did not differ in terms of the thermal requirements of same varieties cultivated before 1990. It can be concluded that the observed changes in terms of phenology in recent years are the result of the temperature rise in Poland. In the years 1990–2010 there were significant trends (days for 10 years) in advance of the sowing and emergence dates of winter barley (2,2 and 1,3) and winter wheat (1,5 and 3,5),

but no change in the date of sowing rye however with a change of date of rye emergence (1,1). Consequently, there was an increase in the period from sowing to emergence of winter wheat (1,9) and rye (1,1), while in the case of winter barley (0,9). The results show also a trend for the advance in heading and yellow ripeness dates for the analysed cereals (days in 10 years), respectively, of winter wheat by 3,6 and 5,0, winter rye – 2,8 and 5,0, barley 2,6 and 4,3 days. There were also visible tendencies in advancing the time to spring vegetation renewal, especially for winter rye (1,5), but the trends were not significant at $\alpha = 0,05$.

According to the four RCM scenarios analysed in the study, in the years 2021–2050, spring vegetation renewal in Poland will be earlier than in the years 1971–2000 by four days, whilst in the years 2071–2100 by about 16 days. The change of the beginning of vegetation in the years 2071–2100 will significantly increase the thermal requirements of winter cereals, expressed in degree-days, reducing changes in phenology, which could result from an increase in temperature. In the years 2021–2050, RCM scenarios project that, the heading of winter wheat, winter rye and winter barley will be about four days earlier than in the years 1971–2000. The advance in heading in the years 2071–2100, in case of winter barley and rye will be 9 days while 10 days for winter wheat. In the years 2021–2050 the date of yellow ripeness of winter wheat and rye will advance by five days while four days in case of winter barley. Over the years 2071–2100 advances in yellow ripeness for winter wheat, rye, barley, will reach respectively 14, 12, 11 days.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

W serii wydawniczej IUNG „**Monografie i Rozprawy Naukowe**” publikowane są recenzowane prace o charakterze monografii i oryginalne rozprawy naukowe (w tym prace habilitacyjne) z zakresu agronomii oraz ochrony i kształtowania środowiska rolniczego.

Wydruk tekstu do recenzji czcionką 11 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: spis treści, wstęp, metodyka, omówienie wyników i dyskusja, wnioski lub podsumowanie, literatura, streszczenie
- objaśnienia tabel, podpisy i opisy do rysunków oraz streszczenie pracy wraz ze słowami kluczowymi w językach polskim i angielskim

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
- umieszczone w oddzielnych plikach

rysunki

- czarno-białe
- wykresy w programie Word lub Excel
- wymiary w zakresie 13 cm × 19 cm
- dołączony wydruk w odpowiednich wymiarach, bardzo dobrej jakości, na białym papierze lub na folii
- w podpisach czcionka 9 p.
- na dyskietce w oddzielnych plikach

jednostki miary

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

literatura

- spis literatury 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 nazwisko autora (autorów) i rok wydania (w nawiasach okrągłych).

Pracę do recenzji należy składać w 2 egzemplarzach. Po recenzji oryginalny egzemplarz recenzowany i ostateczną wersję pracy, uwzględniającą uwagi recenzenta i redaktora, należy dostarczyć do Redakcji w 1 egzemplarzu oraz na dyskietce (lub przesłać e-mailem) na adres:

Dział Upowszechniania i Wydawnictw
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
e-mail: kmikulska@iung.pulawy.pl

W serii wydawniczej IUNG „**Monografie i Rozprawy Naukowe**” ukazały się następujące pozycje:

1. Adam Harasim – *Kompleksowa ocena płodozmianów z różnym udziałem roślin zbożowych i okopowych*. Puławy, 2002.
2. Stanisław Wróbel – *Określenie potrzeb nawożenia buraka cukrowego mikroelementami*. Puławy, 2002.
3. Janusz Podleśny – *Studia nad oddziaływaniem światła laserowego na nasiona, wzrost i rozwój roślin oraz plonowanie lubinu białego (*Lupinus albus* L.)*. Puławy, 2002.
4. Czesław Józefaciuk, Anna Józefaciuk, Eugeniusz Nowocień, Rafał Wawer – *Przeciwerozyjne zagospodarowanie zlewni wyżynnej potoku Grodarz z uwzględnieniem ograniczania występowania powodzi*. Puławy, 2002.
5. Jerzy Książak – *Dynamika gromadzenia składników pokarmowych w organach roślin tradycyjnych i samokńczących odmian bobiku w okresie od kwitnienia do dojrzałości pełnej*. Puławy, 2002.
6. Franciszek Pistelok – *Analiza zależności pomiędzy zanieczyszczeniem ze źródeł komunalnych a jakością powierzchniowych wód płynących na obszarach silnie zurbanizowanych na przykładzie zlewni Górnej Wisły*. Puławy, 2002.
7. Ewa Stanisławska-Głubiak – *Analiza wybranych czynników determinujących efekty dolistnego nawożenia molibdenem w uprawie rzepaku ozimego*. Puławy, 2003.
8. Kazimierz Noworolnik – *Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na plonowanie jęczmienia jarego w różnych warunkach siedliska*. Puławy, 2003.
9. Teresa Doroszevska – *Krzyżowanie oddalone i transformacja genetyczna w uzyskiwaniu odporności tytoniu (*Nicotiana tabacum* L.) na wirusa Y ziemniaka (PVY)*. Puławy, 2004.
10. Eugeniusz K. Chylek – *Uwarunkowania procesu modernizacji rolnictwa i obszarów wiejskich w Polsce*. Puławy, 2004.
11. Zbigniew Samoń – *Studia nad metodami energooszczędnego suszenia chmielu*. Puławy, 2004.
12. Ryszard Weber – *Zmienność plonowania odmian pszenicy ozimej w zależności od przedplonu i sposobu uprawy roli*. Puławy, 2004.
13. Janusz Igras – *Zawartość składników mineralnych w wodach drenarskich z użytków rolnych w Polsce*. Puławy, 2004.
14. Mariusz Kucharski – *Odporność chwastów na herbicydy z grupy inhibitorów fotosyntezy PSII na polach uprawnych południowo-zachodniej Polski*. Puławy, 2005.
15. Maria J. Król – *Azospirillum – asocjacyjne bakterie wiążące wolny azot*. Puławy, 2006.
16. Jerzy Grabiński – *Studia nad potencjałem allelopatycznym żyta ozimego*. Puławy, 2006.
17. Krzysztof Domaradzki – *Efektywność regulacji zachwaszczenia zbóż w aspekcie ograniczenia dawek herbicydów oraz wybranych czynników agroekologicznych*. Puławy, 2006.

18. Anna Stochmal – *Flawonoidy lucerny siewnej (Medicago sativa L.) – budowa chemiczna, właściwości spektralne, zawartość w zależności od odmiany i terminu zbioru*. Puławy, 2007.
19. Tomasz Stuczyński – *Assessment and modelling of land use change in Europe in the context of soil protection*. Puławy, 2007.
20. Jolanta Korzeniowska – *Potrzeby nawożenia pszenicy cynkiem, miedzią i borem w warunkach glebowo-klimatycznych Polski*. Puławy, 2008.
21. Maria J. Król, Janusz Smagacz – *Rozkład resztek pozbiorowych w glebie*. Puławy, 2008.
22. Agnieszka Klimkowicz-Pawlas – *Oddziaływanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych na siedliskową funkcję gleby*. Puławy, 2009.
23. Janusz Czaban – *Fitogeniczne dodatki do paszy świń ze szczególnym uwzględnieniem ich roli jako zamienników antybiotykowych stymulatorów wzrostu*. Puławy, 2009.
24. Maria J. Król – *Bakterie endofityczne*. Puławy, 2009.
25. Ryszard Weber – *Przydatność uprawy konserwującej w rolnictwie zrównoważonym*. Puławy, 2010.
26. Józefa Harasim, Adam Harasim – *Produkcyjność mieszanek pastwiskowych z udziałem koniczyny białej (Trifolium repens L.) w różnych warunkach siedliskowych*. Puławy, 2010.
27. Maria J. Król – *Bakterie utleniające siarkę elementarną i redukujące siarczany*. Puławy, 2010.
28. Andrzej Doroszewski – *Skład spektralny promieniowania jako czynnik kształtujący pokrój i plon pszenicy*. Puławy, 2011.
29. Jerzy Bieńkowski – *Wielokryterialna analiza możliwości zrównoważonego rozwoju gospodarstw rolniczych z uwzględnieniem czynników środowiskowych i ekonomicznych*. Puławy, 2011.
30. Hanna Gołębiowska – *Dynamika występowania flory segetalnej w uprawie kukurydzy na Dolnym Śląsku w latach 1972–2008 i obecne możliwości jej regulacji*. Puławy, 2011.
31. Maria J. Król – *Przemiany mikrobiologiczne żelaza w glebie*. Puławy, 2011.
32. Franciszek Woch, Krzysztof Wierzbicki, Andrzej Eymontt, Anna Dziadkiewicz-Ilkowska, Alina Syp, Jerzy Kopiński, Czesław Pietruch, Mirosław Nierubca, Antoni Miklewski, Piotr Maśloch – *Efektywność gospodarcza i ekonomiczna scalania gruntów w Polsce*. Puławy, 2011.
33. Maria J. Król – *Przemiany mikrobiologiczne fosforu w glebie*. Puławy, 2012.
34. Adam Harasim – *Ocena produkcji roślinnej na gruntach ornych w gospodarstwie rolniczym w ujęciu długookresowym*. Puławy, 2012.
35. Mariusz Matyka – *Produkcyjne i ekonomiczne aspekty uprawy roślin wieloletnich na cele energetyczne*. Puławy, 2013.
36. Beata Feledyn-Szewczyk – *Wpływ użytkowania gruntów na różnorodność gatunkową flory segetalnej*. Puławy, 2013.

37. Anna Podleśna – *Studia nad rolą siarki w kształtowaniu gospodarki mineralnej oraz wielkości i jakości plonu wybranych roślin uprawnych*. Puławy, 2013.
38. Mariola Staniak – *Reakcja wybranych gatunków i odmian traw pastewnych na niedobory wody w glebie*. Puławy, 2013.
39. Rafał Pudelko – *Ocena potencjałów biomasy ubocznej i odpadowej w UE-27 i Szwajcarii oraz ich regionalizacja*. Puławy, 2013.