

PROGNOZOWANIE PLONÓW ŁUBINU WĄSKOLISTNEGO W OPARCIU O WYBRANE SCENARIUSZE ZMIAN KLIMATU*

Krystyna Grabowska, Aneta Dymerska, Katarzyna Pożarska, Jan Grabowski

Katedra Gospodarki Wodnej, Klimatologii i Kształtowania Środowiska
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, plac Łódzki 1, 10-727 Olsztyn
e-mail: grabkrys@uwm.edu.pl

Streszczenie. W pracy zbadano wpływ czynników pogodowych na plonowanie odmiany Mirela łubinu wąskolistnego w latach 1990-2008 oraz dokonano prognozy plonów na lata 2050-2060, z wykorzystaniem modeli pogoda-plon, przy założeniu trzech scenariuszy zmian klimatu przeznaczonych dla Europy Środkowej: GISS model E, HadCM3 i GFDL. Materiał źródłowy stanowiły wyniki doświadczeń odmianowych oraz obserwacje meteorologiczne pochodzące ze stacji doświadczalnych COBORU, zlokalizowanych w północno-wschodniej Polsce. W analizach zastosowano metodę korelacji i regresji wielokrotnej krokowej postępującej. Dopasowanie modeli oceniono na podstawie współczynnika determinacji R^2 , poprawionego współczynnika determinacji R^2_{adj} , błędu standardowego estymacji oraz współczynnika determinacji R^2_{pred} wyznaczonego przy użyciu procedury Cross Validation. Istotność równań regresji określono za pomocą testu F-Snedecora. Jedno z równań posłużyło do prognozy plonowania łubinu w warunkach podwojenia zawartości CO_2 w atmosferze. Stwierdzono, że wpływ czynników meteorologicznych na plonowanie łubinu wąskolistnego był zróżnicowany w zależności od lokalizacji stacji. Na wysokość plonu najczęściej istotnie wpływała temperatura (maksymalna, średnia i minimalna) początkowych okresów wegetacji oraz opady w okresie koniec kwitnienia–dojrzałość techniczna. Badania wykazały, że przewidywane zmiany klimatu wpłyną korzystnie na plonowanie łubinu. Plony symulowane były wyższe od uzyskiwanych w latach 1990-2008, a najbardziej korzystny okazał się scenariusz HadCM3.

Słowa kluczowe: łubin, plon, czynniki meteorologiczne, scenariusze zmian klimatu

WSTĘP

Ocena zmian klimatycznych i opracowanie sposobów reakcji na to zjawisko to wyzwanie naukowe, polityczne i praktyczne dla obecnych i przyszłych pokoleń (Wilkin 2008). Istnieje potrzeba szybszego utworzenia programu adaptacyjnego do

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy.

zmian klimatu dla całego kraju. Programy takie są już w trakcie opracowywania lub wdrażania w innych państwach członkowskich Unii Europejskiej (Kozyra i in. 2009).

Matematyczne modelowanie plonowania w zależności od czynników pogodowych opracowano już dla szeregu roślin strączkowych (Michalska 1993, Łykowski 1984, Grabowska 2004, Dymerska i Grabowska 2014). Mało jest jednak kompleksowych prac dotyczących wymagań pogodowych łąbinu wąskolistnego (Dymerska i in. 2012, Grabowska i in. 2010, Jansen 2008). O warunkach meteorologicznych uprawy tej rośliny wzmiankowano przy okazji badań o innej tematyce, dotyczącej na przykład wpływu agrotechniki na rozwój, plonowanie oraz skład i jakość nasion łąbinu (Christiansen i in. 1997, Podleśny i Podleśna 2010a,b, Podleśny i Strobel 2006, Strobel i Pszczółkowski 2007, Faligowska i Szukała 2009, Kurasiak-Popowska i in. 2003, Podsiadło i Kaczmarczyk 2003).

Łubin wąskolistny ma cenne właściwości, podobnie jak inne rośliny strączkowe, lecz ich udział w strukturze zasiewów jest w Polsce ciągle mniejszy niż w wielu krajach Unii Europejskiej. Wzrost areалу uprawy tej grupy roślin uzyskano przez wprowadzenie w 2010 roku systemu dopłat do uprawy roślin motylkowatych.

W związku z zachodzącymi zmianami klimatycznymi wynikającymi z globalnego ocieplenia pojawia się pytanie o ryzyko i opłacalność uprawy łąbinu w przyszłości. Łubin może być zagrożony ze względu na wysokie temperatury (słaby rozwój, opadnie strąków), zbyt małe ilości opadów w okresie letnim i przesunięcie rozpoczęcia okresu wegetacji. Należy zatem podejmować badania, których efektem będzie ocena wpływu przewidywanych nowych warunków pogodowych na plonowanie gatunków i konkretnych odmian łąbinu uprawianych w Polsce, gdyż konieczna jest adaptacja polskiego rolnictwa do zmian klimatu.

Celem pracy było zbadanie wpływu czynników meteorologicznych północno-wschodniej Polski na wzrost, rozwój i plonowanie łąbinu wąskolistnego odmiany Mirela oraz opracowanie prognozy plonów dla nowych warunków pogodowych przewidywanych według wybranych scenariuszy zmian klimatu.

Cel ten zrealizowano w następujących etapach: oszacowano dobowe wartości promieniowania całkowitego według metody Hunta i in. (Hunt i in. 1998), opracowano statystyczną charakterystykę warunków meteorologicznych i plonowania łąbinu wąskolistnego w analizowanych miejscowościach, zbudowano modele regresji (regresja wielokrotna) pogoda-plon dla kolejnych etapów wzrostu i rozwoju rośliny, które zweryfikowano za pomocą testu Cross Validation. Opracowano również prognozę plonów łąbinu przy założeniu trzech najbardziej prawdopodobnych scenariuszy (GISS, HadCM3, GFDL) zmian klimatu dla Europy Środkowej.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Praca powstała na podstawie wyników ścisłych doświadczeń odmianowych COBORU uzyskanych ze stacji: Głódowo, Wróćkowo, Marianowo i Seroczyn, położonych w północno-wschodniej Polsce. Dane źródłowe najczęściej obejmowały kilkanaście lat z przedziału 1990-2008 i zawierały:

– coroczne plony łubinu wąskolistnego odmiany Mirela, terminy siewu (BBCH 0), daty wystąpienia podstawowych faz fenologicznych: wschodów (BBCH 15), początku kwitnienia (BBCH 60), końca kwitnienia (BBCH 69) i dojrzałości technicznej (BBCH 89) oraz informacje o warunkach glebowych i poziomie stosowanej agrotechniki,

– notowania dobowych wartości elementów meteorologicznych, tj. średniej, maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza oraz sum opadów atmosferycznych pochodzące z miejsc doświadczeń.

Ze względu na znaczenie promieniowania słonecznego w okresie wegetacji niektórych roślin strączkowych (Grabowska 2004, Dymerska i in. 2012, Dymerska i Grabowska 2014) zdecydowano się na użycie tego czynnika w dalszych analizach, lecz z powodu braku pomiarów w stacjach doświadczalnych oszacowano jego dobowe wartości według wzoru Hunta i in. (1998).

Do zbadania zależności pogoda-plon nasion łubinu wąskolistnego odmiany Mirela wykorzystano pakiet STATISTICA. Zastosowano metodę korelacji i regresji wielokrotnej krokowej postępującej z użyciem funkcji liniowej i kwadratowej, a zbiór zmiennych niezależnych służących do budowy modeli regresji stanowiły:

- sumy promieniowania całkowitego (SR),
- sumy i średnia temperatura maksymalna ($\sum T_{max}, T_{max}$),
- sumy i średnia temperatura minimalna ($\sum T_{min}, T_{min}$),
- sumy i średnia temperatura ($\sum T_{sr}, T_{sr}$),
- sumy opadów atmosferycznych (P),

obliczone dla okresów rozwojowych łubinu (1-4).

Równań regresji poszukiwano, oddzielnie dla każdej stacji, najpierw dla okresu siew-wschody (1), a następnie dołączano zmienne z kolejnych międzyfaz rozwojowych, tj. wschody-początek kwitnienia (2), początek kwitnienia-koniec kwitnienia (3), koniec kwitnienia-dojrzałość techniczna (4). Dopasowanie modeli oceniono na podstawie współczynnika determinacji R^2 , poprawionego współczynnika determinacji R^2_{adj} , błędu standardowego estymacji – $RMSE$ (ang. *Root Mean Square Error*) oraz współczynnika determinacji R^2_{pred} wyznaczonego przy użyciu procedury Cross Validation (CV). Istotność równań określono za pomocą testu F-Snedecora. Metoda Cross Validation (Michaelson 1987, Kuchar 1994, 2001) stosowana jest w celu uniknięcia przeparametryzowania modelu, czyli niepoprawnego opisu zależności,

do którego może dojść zwłaszcza w przypadku małej liczby obserwacji (np. 9 lat w stacji doświadczalnej w Seroczynie).

Równanie wybrane spośród tych, które pozytywnie przeszły procedurę weryfikacyjną, wykorzystano do prognozowania plonów łąbinu wąskolistnego w warunkach podwojenia zawartości CO₂ w atmosferze.

W celu uzyskania prognoz plonów konieczne było wygenerowanie za pomocą modelu WGENK (Kuchar 2004, 2005, 2009b) danych meteorologicznych dla Wróćkowa w postaci 100-letnich ciągów dobowych wartości promieniowania całkowitego (SR), temperatury maksymalnej (T_{max}), minimalnej (T_{min}) oraz opadów (P). Natomiast wartości średniej temperatury dobowej (T_{sr}), których model nie generuje, wyliczono jako średnią arytmetyczną z temperatury maksymalnej i minimalnej.

Tabela 1. Charakterystyka zmian klimatycznych w Europie Środkowej według scenariuszy GISS (Model E), HadCM3 i GFDL

Table 1. Characteristics of climate change in Central Europe according to GISS (Model E), HadCM3 and GFDL scenarios

Zmienna Variable	Parametr Parameter	Okres Period	Zmiana według modelu Change according to the model		
			GISS	HadCM3	GFDL
Temperatura Temperature	średnia / mean	zima / winter	+2,6°C	+3,4°C	+2,4°C
		lato / summer	+1,8°C	+3,4°C	+2,0°C
	odchylenie standardowe standard deviation	rok / year	+12%	+1,1°C	+10%
Opady Precipitation	średnia / mean	zima / winter	+15%	+10%	+20%
		lato / summer	0%	-9%	-20%
	odchylenie standardowe standard deviation	rok / year	+15%	+7%	+20%

Źródło: opracowanie własne na podstawie Kuchar 2009a, MacDonald i Sertorio 1991, Mearns i in. 1997 / Source: own elaboration based on data acc. to Kuchar 2009a, MacDonald and Sertorio 1991, Mearns *et al.* 1997

Dane wygenerowano przy wykorzystaniu aktualnej charakterystyki klimatycznej (dane źródłowe) i charakterystyki klimatycznej zmodyfikowanej o informacje pochodzące z powszechnie używanych scenariuszy zmian klimatu dla Centralnej Europy: GISS, HadCM3 i GFDL. Założenia poszczególnych scenariuszy (tab. 1), które przyjęto dla warunków podwojenia koncentracji CO₂ w atmosferze, mogą być modyfikowane w zależności od przyjętego okresu referencyjnego (Macdonald i Sertorio 1991, Mearns i in. 1997, Kuchar 2009a, Rosenzweig 1989).

Dla wygenerowanych ciągów danych meteorologicznych wyznaczono terminy siewu i daty wystąpienia poszczególnych pojavów fenologicznych (wschody, początek kwitnienia, koniec kwitnienia, dojrzałość techniczna) badanej odmiany.

Daty siewu wyznaczono, analizując średnie temperatury w ciągu dekady poprzedzającej termin siewu, ale przede wszystkim sugerowano się jednak średnią z siedmiu dni przed siewem. Wartości te najczęściej zawierały się w przedziale 5-7°C. W przypadku wątpliwości analizowano także historyczne wartości ekstremalne temperatury oraz okresy bezopadowe, umożliwiające rozpoczęcie prac polowych. O przejściu rośliny do kolejnej fazy rozwojowej decydowało uzyskanie sumy temperatury średniej odpowiadającej uśrednionej sumie wyliczonej dla danego okresu w latach prowadzenia doświadczeń.

Dalej, dla każdego wygenerowanego roku obliczono wartości zmiennych niezależnych występujących w równaniu regresji utworzonym dla odmiany Mirela we Wróćikowie. Na jego podstawie oszacowano wartość plonu w przyszłości (lata 2050-2060). Plony obserwowane i prognozowane porównano, przedstawiając ich parametry statystyczne oraz rozkłady Weibulla. Wyliczono także kwantyle rozkładów, wartości krytyczne oraz granice i prawdopodobieństwa tolerancji.

Warunki uprawy łubinu

Tabela 2. Warunki glebowe i przedplon doświadczeń z odmianą Mirela łubinu wąskolistnego
Table 2. Soil conditions and forecrop in experiments with Mirela cultivar of narrow-leaf lupine

Stacje doświadczalne Experimental stations	Lata doświadczeń Years of experiments	pH	Klasa gleby Soil quality class	Kompleks rolniczej przydatności gleb Soil complex	Przedplon Forecrop
Głodowo	1991-2008	5,1-7,1	IVa, IIIb	4, 5	jęczmień jary, (pszenica jara, owies, mieszanka zbożowa) spring barley, (spring wheat, oat, cereal mixture)
Marianowo	1990-2000 2005-2008	4,5-6,7	IVa, (IIIb, IVb, V)	4, 5, (6)	pszenica jara, jęczmień jary, pszenżyto ozime, (pszenica ozima, ziemniak) spring wheat, spring barley, winter triticale, (winter wheat, potato)
Wróćikowo	1994-2008	5,3-6,8	IVa, (IIIa, V)	5, (6)	jęczmień jary, pszenica jara, (owies) spring barley, spring wheat, (oat)
Seroczyn	1995-1996 1998-2004	5,4-6,6	IIIb, IVa	4, 5, (6)	pszenica jara, jęczmień jary, pszenica ozima spring wheat, spring barley, winter wheat

() – występowanie w jednym roku / occurrence in one year

Doświadczenia z łubinem wąskolistnym odmiany Mirela prowadzono zgodnie z metodykami COBORU (Metodyka... 1983, 1998), najczęściej na glebach klasy IIIb i IVa kompleksu żytniego bardzo dobrego (4) i żytniego dobrego (5). Odczyn gleb wahał się od kwaśnego do obojętnego (pH 4,5-7,1). Przedplonem łubinu były zboża, najczęściej jęczmień jary i pszenica jara, rzadko owies, pszenica ozima, pszenżyto i żyto ozime (tab. 2). Nawożenie mineralne stosowano w zależności od zawartości składników w glebie: azot – rzadko, przedsewnie w ilości 8-31 kg·ha⁻¹ w formie saletry amonowej, nawozy fosforowo-potasowe wysiewano jesienią w dawce: P – od 10 do 95 kg·ha⁻¹, K – w dawce 10-160 kg·ha⁻¹, w niektórych latach i stacjach dodatkowo stosowano nawożenie magnezem w dawce 12-50 kg·ha⁻¹ w postaci MgO.

WYNIKI I DYSKUSJA

Statystyczna charakterystyka plonowania i warunków meteorologicznych

Wysokość plonów odmiany i ich parametry statystyczne w poszczególnych stacjach doświadczalnych COBORU przedstawiono w tabeli 3.

Średni plon łubinu wąskolistnego odmiany Mirela wyniósł 2,82 t·ha⁻¹, wahał się od 2,42 w Głodowie do 3,20 t·ha⁻¹ we Wróćkowie. Rozpiętość plonów w każdej miejscowości była duża, najwyższe plony sięgały do 5,81 t·ha⁻¹ (we Wróćkowie w 2003 r.), ale w poszczególnych latach odmiana plonowała słabiej, nawet poniżej 1,00 t·ha⁻¹ (0,84 t·ha⁻¹ w Głodowie w 1994 r.). Wysokość plonowania odmiany potwierdza opinię, że w sprzyjających warunkach i przy optymalnej agrotechnice, jaka jest stosowana w stacjach doświadczalnych oceny odmian COBORU, w Polsce można uzyskać plony dużo wyższe od otrzymywanych w gospodarstwach rolnych (Grabowska 2004, Dymerska, Grabowska 2014).

Tabela 3. Statystyczna charakterystyka plonu łubinu wąskolistnego (t·ha⁻¹)

Table 3. Statistical characteristics of blue lupine yield (t ha⁻¹)

Statystyki / Statistics	Głodowo	Marianowo	Wróćkowo	Seroczyn
\bar{y}	2,42	2,87	3,20	2,80
<i>max</i>	4,02	4,25	5,81	5,35
<i>min</i>	0,84	1,21	1,30	1,38
<i>s</i>	0,89	1,07	1,45	1,16
<i>V</i>	36,94	37,41	45,51	41,35

Objaśnienia / Explanations: \bar{y} – średni / mean; *max* – maksymalny / maximal; *min* – minimalny / minimal; *s* – odchylenie standardowe / standard deviation; *V* – współczynnik zmienności (%) / coefficient of variation (%)

W tabeli 4 przedstawiono charakterystykę statystyczną sum promieniowania całkowitego i opadów atmosferycznych oraz temperatury średniej powietrza w wydzielonych okresach rozwojowych odmiany Mirela.

Tabela 4. Statystyka opisowa wybranych zmiennych niezależnych – łubin wąskolistny odmiana Mirela
Table 4. Descriptive statistics of selected independent variables – blue lupine Mirela cultivar

Odmiana Cultivar	Statystyki Statistics	SR1	$T_{sr,1}$	P1	SR2	$T_{sr,2}$	P2	SR3	$T_{sr,3}$	P3	SR4	$T_{sr,4}$	P4
Głodowo	\bar{x}	242,3	8,2	23,5	760,7	13,2	56,6	408,6	17,2	47,1	610,8	18,4	80,3
	max	334,7	13,0	56,8	874,0	16,8	143,9	691,9	19,6	153,6	931,3	22,0	146,0
	min	151,0	4,5	0,0	607,7	11,0	10,0	210,0	15,3	9,7	438,0	15,8	2,5
	s	53,4	1,8	16,1	75,2	1,5	34,1	131,2	1,3	41,2	124,8	1,8	41,0
	V	22,1	22,1	68,6	9,9	11,5	60,2	32,1	7,8	87,4	20,4	9,6	51,0
Marianowo	\bar{x}	230,5	9,7	9,9	808,2	13,7	62,4	396,9	17,2	42,6	652,3	18,4	83,6
	max	303,1	14,7	24,9	935,4	16,5	120,4	743,2	20,4	118,5	871,2	21,8	160,5
	min	132,8	6,2	0,5	670,3	11,5	8,1	259,9	14,8	8,7	410,4	15,3	10,9
	s	48,1	2,6	8,9	79,0	1,5	32,6	138,2	1,4	34,2	124,6	1,8	48,0
	V	20,9	26,5	90,1	9,8	11,2	52,3	34,8	8,0	80,2	19,1	9,9	57,4
Wróćkowo	\bar{x}	239,6	7,9	31,9	803,1	12,8	69,6	608,0	16,4	79,9	520,8	18,4	55,5
	max	341,0	11,9	92,0	946,7	15,7	174,1	849,3	18,1	171,2	697,2	21,7	121,8
	min	149,2	4,1	0,5	657,0	10,7	29,4	473,0	14,7	16,0	302,6	15,3	0,0
	s	57,7	2,2	22,1	84,9	1,5	37,6	114,4	1,0	48,0	127,4	1,8	36,6
	V	24,1	28,2	69,2	10,6	11,6	54,1	18,8	6,1	60,1	24,5	9,8	65,9
Seroczyn	\bar{x}	210,6	9,7	30,9	705,1	14,5	56,0	456,4	17,4	80,3	406,6	18,5	52,5
	max	309,0	13,8	87,3	817,2	16,0	102,7	624,5	19,1	143,0	662,3	21,2	168,8
	min	161,7	6,9	0,0	614,6	12,4	23,3	149,2	15,7	13,7	168,7	16,1	2,6
	s	44,7	1,9	26,9	66,5	1,4	28,9	139,7	1,2	47,4	136,6	2,0	50,8
	V	21,2	20,1	87,0	9,4	9,5	51,6	30,6	7,2	59,0	33,6	11,0	96,9

Objaśnienia / Explanation: – max, min, s, V jak w tabeli 3 / of max, min, s and V as in Table 3; \bar{x} – średnia / mean value; SR – promieniowanie całkowite / total radiation ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$); T_{sr} – temperatura średnia / mean temperature ($^{\circ}\text{C}$); P – opad atmosferyczny / precipitation (mm); Okresy / Periods: 1 – siew-wschody / sowing-germination; 2 – wschody-początek kwitnienia / germination-beginning of flowering; 3 – początek kwitnienia-koniec kwitnienia / beginning of flowering-end of flowering; 4 – koniec kwitnienia-dojrzałość techniczna / end of flowering-complete maturity

W okresie siew-wschody średnie wartości omawianych czynników były najniższe. Promieniowanie słoneczne zawierało się w przedziale od 210,6 (Seroczyn) do 242,3 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (Głodowo). Temperatura średnia dla badanego wielolecia wahała się w granicach od 7,9 $^{\circ}\text{C}$ we Wróćkowie do 9,7 $^{\circ}\text{C}$ w Marianowie i Seroczynie, a sumy opadów od 9,9 (Marianowo) do 31,9 mm (Wróćkowo).

W najdłuższym okresie wschody-początek kwitnienia sumy promieniowania całkowitego zawierały się w przedziale od 705,1 (Seroczyn) do 808,2 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (Marianowo), średnia temperatura powietrza od 12,8 (Wróćkowo) do 14,5 $^{\circ}\text{C}$ (Seroczyn), a sumy opadów od 56 mm w Seroczynie do 69,6 mm we Wróćkowie.

W czasie kwitnienia sumy promieniowania całkowitego wahały się od 396,9 (Marianowo) do 608,0 MJ·m⁻² (Wróćkowo), temperatura średnia od 16,4 (Wróćkowo) do 17,4°C (Seroczyn), a sumy opadów mieściły się w zakresie od 42,6 (Marianowo) do 80,3 mm (Seroczyn).

W międzyfazie od końca kwitnienia do dojrzałości technicznej promieniowanie słoneczne wynosiło od 406,6 w Seroczynie do 652,3 MJ·m⁻² w Marianowie, temperatura średnia od 18,4 do 18,5°C, a sumy opadów od 52,5 do 83,6 mm.

Z danych liczbowych zawartych w tabeli 4 wynika, że lata przyjęte do opracowania były zróżnicowane pod względem przebiegu pogody w poszczególnych okresach wegetacji łubinu, który często odbiegał od optymalnych. Ta zmienność elementów meteorologicznych była przyczyną wahań wysokości plonów.

Modele pogoda-plon w kolejnych okresach rozwojowych łubinu wąskolistnego

Zależność plonowania odmiany Mirela od czynników meteorologicznych wyliczonych dla poszczególnych okresów fenologicznych i stacji badano za pomocą regresji krokowej postępującej, tworząc dla każdej międzyfazy rośliny wiele modeli, których dopasowanie wzrastało wraz z zaawansowaniem wegetacji (tab. 5). W opisie skupiono się tylko na modelach zawierających zmienne istotne na poziomie co najmniej 0,05, a przede wszystkim na tych, które pozytywnie przeszły procedurę Cross Validation.

W Głodowie utworzono tylko 1 równanie; współczynnik determinacji R^2 utworzonego modelu wyniósł 0,45, poprawiony współczynnik R^2_{adj} – 0,38, a R^2_{pred} predykcyjny współczynnik determinacji – 0,28. Na plon badanej odmiany łubinu dodatnio wpływała suma temperatury średniej w okresie siew-wschody ($\sum T_{sr1}$), a ujemnie – temperatura maksymalna w czasie koniec kwitnienia-dojrzałość techniczna (T_{max4}).

Dla Marianowa zbudowano wiele równań regresji. Do końca kwitnienia największy wpływ na plon miały: temperatura maksymalna w okresie od wschodów do początku kwitnienia (T_{max2}) – wpływ pozytywny, w postaci kwadratowej. Gdy dodano czynniki meteorologiczne z ostatniego okresu rozwojowego, od końca kwitnienia do dojrzałości technicznej, w równaniach na pierwszym miejscu ze znakiem dodatnim znalazła się suma opadów tego okresu ($P4$), a następnie, ze znakiem ujemnym suma temperatury maksymalnej okresu siew-wschody ($\sum T_{max1}$)² oraz temperatura maksymalna w czasie od wschodów do początku kwitnienia w postaci kwadratowej (T_{max2})² ze znakiem dodatnim.

Łubin w znacznej mierze zaspokaja swoje potrzeby wodne dzięki głębokiemu systemowi korzeniowemu. Jednak w jego rozwoju, podobnie jak u innych roślin strączkowych, można wyróżnić okresy szczególnej wrażliwości na niedobory wody. Krytycznymi pod względem potrzeb wodnych łubinu są okresy: kiełkowanie,

zawijanie pąków, kwitnienie i formowanie pierwszych strąków (Dymerska i Grabowska 2014, Januszewicz i Suchowilska 2003a,b).

W niniejszej pracy zanotowano, że, istotne zależności wystąpiły głównie w Marianowie, gdzie plon odmiany Mirela kształtował się pod wyraźnym wpływem opadów. Wyższe opady w końcowym okresie wegetacji (koniec kwitnienia-dojrzałość techniczna) wpływały dodatnio na plon. Jest to zgodne z wynikami Strobla i Pszczółkowskiego (2007), którzy wykazali, że odpowiednia ilość opadów w czasie od końca kwitnienia do dojrzałości technicznej sprawia, że łubin zawija więcej strąków, zwłaszcza na pędach bocznych, a wytworzone strąki w mniejszym stopniu ulegają zasychaniu i opadaniu. Natomiast niedobór opadów w końcowej fazie dojrzwania, gdy średnia temperatura powietrza sięga 20°C, jest przyczyną nadmiernego pękania strąków i osypywania nasion łubinu wąskolistnego odmian Mirela i Wersal. Takie warunki pogodowe wystąpiły w Marianowie w 1994, 1999 i 2006 roku. Plon odmiany Mirela był wtedy wyraźnie niższy i stanowił odpowiednio 57, 42 i 66% średniej wieloletniej.

Współczynniki determinacji R^2 równań istotnych po zastosowaniu procedury Cross Validation wzrastały od 0,39 do 0,84, R^2_{adj} – od 0,34 do 0,80, a R^2_{pred} – od 0,22 do 0,72 w ostatnim modelu (okresy 1-4).

We Wróciakowie, spośród utworzonych równań dla odmiany Mirela, test CV przeszły pozytywnie cztery – dwa do początku kwitnienia i dwa do końca wegetacji (tab. 6). Współczynniki determinacji wyselekcjonowanych równań wzrastały: R^2 – od 0,39 do 0,73, R^2_{adj} – od 0,34 do 0,66 i R^2_{pred} – od 0,22 do 0,53. Decydujący, dodatni wpływ na plonowanie odmiany miały: temperatura maksymalna okresu wschody-początek kwitnienia (zależność kwadratowa) – $T_{max}2^2$, $(\sum T_{max}2)^2$ i średnia temperatura minimalna okresu koniec kwitnienia-dojrzałość techniczna ($T_{min}4$).

W stacji doświadczalnej Seroczyn test CV przeszło pozytywnie tylko jedno równanie. Zmienne wchodzące w skład tego równania to: temperatura średnia drugiej międzyfazy ($T_{sr}2$), suma opadów pierwszego okresu ($P1^2$ – funkcja kwadratowa) oraz temperatura średnia ostatniego okresu rozwojowego ($T_{sr}4$). Wpływ dwóch pierwszych czynników był ujemny, natomiast $T_{sr}4$ dodatni. Współczynniki determinacji osiągnęły bardzo wysokie wartości (R^2 – 0,98, R^2_{adj} – 0,97 i R^2_{pred} – 0,92).

Plon badanej odmiany łubinu w większym stopniu niż od opadów atmosferycznych uzależniony był od temperatury powietrza. Zwłaszcza dominował wpływ temperatury maksymalnej lub średniej w początkowych okresach wegetacji, co znalazło częściowe potwierdzenie w badaniach prowadzonych przez autorki (Dymerska i Grabowska 2014, Grabowska 2004, Dymerska i in. 2012) z innymi gatunkami lub odmianami roślin strączkowych. Ciekawe wyniki otrzymał Jansen (2008), który podaje, że wyższe temperatury od początku kwitnienia do zbioru (30°C/16°C – dzień/noc, średnia 25,3°C oraz 20°C/16°C, średnia 18,7°C) wpływają na obniżenie plonu łubinu wąskolistnego.

Tabela 5. Współczynniki determinacji, istotność i błędy standardowe równań regresji określających zależność między plonem lubinu wąskolistnego odmiany Mirela a zmiennymi meteorologicznymi oraz wyselekcjonowane modele po zastosowaniu procedury Cross Validation

Table 5. Coefficients of determination, significance and standard errors of regression equations defining the relationship between the yield of blue lupine Mirela cultivar and meteorological variables and selected models after the Cross Validation procedure

Okres Period	Zmienne Variables	<i>n</i>	R^2	R^2_{adj}	R^2_{pred}	RMSE	Równanie regresji Regression equation
1	$\sum T_{sr,1}$		0,22*	0,17*	0,05	0,81	—
1-2	$\sum T_{sr,1}, T_{min,1}^2$		0,33**	0,24	0,15	0,78	—
	$\sum T_{sr,1}, T_{min,2}^2$		0,39**	0,31*	0,20	0,74	—
	$\sum T_{sr,1}, T_{min,2}^2, P1^2$	18	0,51**	0,41*	0,32	0,69	—
1-3	brak lepszych / lack of better		—	—	—	—	—
1-4	$\sum T_{sr,1}, T_{max,4}$		0,45**	0,38**	0,28*	0,71	$y = 4,7063** + 0,0165** \sum T_{sr,1} - 0,1907** T_{max,4}$
	$\sum T_{sr,1}, T_{max,4}, T_{min,1}$		0,52**	0,42**	0,33	0,68	—
Marianowo							
1	$(\sum T_{max,1})^2$		0,27**	0,21*	0,09	0,95	—
1-2	$T_{max,2}^2$		0,39**	0,34**	0,25*	0,87	$y = -0,5053 + 0,009** T_{max,2}^2$
	$T_{max,2}^2, (\sum T_{max,1})^2$		0,57***	0,50**	0,36*	0,76	$y = 1,5106 + 0,008** T_{max,2}^2 - 0,00004** (\sum T_{max,1})^2$
1-3	$T_{max,2}^2, (\sum T_{max,1})^2, SR3^2$	15	0,61**	0,51**	0,20	0,75	—
1-4	$P4$		0,41**	0,36**	0,22*	0,86	$y = 1,6771*** + 0,0142** P4$
	$P4, \sum T_{max,1}$		0,70***	0,65***	0,52**	0,64	$y = 5,4768*** + 0,0149*** P4 - 0,0183*** \sum T_{max,1}$
	$P4, \sum T_{max,1}, T_{max,2}^2$		0,84***	0,80***	0,72***	0,48	$y = 2,9527** + 0,0125*** P4 - 0,0157*** \sum T_{max,1} + 0,0058*** T_{max,2}^2$
Wróclikowo							
1	$\sum T_{sr,1}$		0,11	0,05	0	1,42	—
1-2	$T_{max,2}^2$		0,39**	0,34**	0,22*	1,18	$y = -1,1315 + 0,0123** T_{max,2}^2$
	$T_{max,2}^2, (\sum T_{max,2})^2$		0,53**	0,46**	0,32*	1,07	$y = -10,4308* + 0,015*** T_{max,2}^2 + 0,0107* (\sum T_{max,2})^2$
	$T_{max,2}^2, (\sum T_{max,2})^2, T_{sr,1}^2$	15	0,64***	0,54**	0,37	0,98	—
1-3	brak lepszych / lack of better		—	—	—	—	—
1-4	$T_{max,2}^2, T_{min,4}$		0,64***	0,58***	0,45**	0,94	$y = -8,6915** + 0,015*** T_{max,2}^2 + 0,5284** T_{min,4}$
	$T_{max,2}^2, T_{min,4}, T_{max,2}$		0,73***	0,66***	0,53**	0,85	$y = 42,2405 + 0,155* T_{max,2}^2 + 0,5633*** T_{min,4} - 5,3895* T_{max,2}$

Tabela 5. cd. Współczynniki determinacji, istotność i błędy standardowe równań regresji określających zależność między plonem łubinu wąskolistnego odmiany Mirela a zmiennymi meteorologicznymi oraz wyselekcjonowane modele po zastosowaniu procedury Cross Validation
Table 5. Cont. Coefficients of determination, significance and standard errors of regression equations defining the relationship between the yield of blue lupine Mirela cultivar and meteorological variables and selected models after the Cross Validation procedure

Okres Period	Zmienne / Variables	n	R ²	R ² _{adj}	R ² _{pred}	RMSE	Równanie regresji / Regression equation
Seroczyzn							
1	–	–	–	–	–	–	–
1-2	T _{sr,2}	0,30	0,20	0	1,04	–	–
	T _{sr,2} , P1 ²	0,67**	0,57*	0,07	0,76	–	–
	T _{sr,2} , P1 ² , SR1	9	0,77**	0,64	0,33	0,70	–
1-3	brak lepszych / lack of better	–	–	–	–	–	–
1-4	T _{sr,2} , P1 ² , T _{sr,4}	0,98*****	0,97*****	0,92*****	0,18	–	$y = 10,6566*****T_{sr,2} - 0,0006*****P1^2 + 0,4136*****T_{sr,4}$

Objaśnienia / Explanations: n – liczba obserwacji / number of observations; R² – współczynnik determinacji / coefficient of determination; R²_{adj} – poprawiony współczynnik determinacji / adjusted coefficient of determination; R²_{pred} – predykcyjny współczynnik determinacji / predicted coefficient of determination; RMSE – błąd standardowy estymacji (Root Mean Square Error – pierwiastek z błędu średniokwadratowego); *, **, ***, ****, ***** – poziomy istotności / significance levels α = 0,1; 0,05; 0,01; 0,001; 0,0001; Zmienne – Variable: SR – promieniowanie całkowite / global radiation (MJ·m⁻²); T_{sr, max, min} – temperatura średnia, maksymalna, minimalna / mean, maximal, minimal temperature (°C); P – opad atmosferyczny – precipitation (mm); Okresy / Periods: 1 – siew-wschody / sowing-germination; 2 – wschody-początek kwitnienia / germination-beginning of flowering; 3 – początek kwitnienia-koniec kwitnienia / beginning of flowering-end of flowering; 4 – koniec kwitnienia-dojrzałość techniczna / end of flowering-complete maturity

Oszacowane na potrzeby analiz sumy promieniowania całkowitego nie odegrały istotnej roli w kształtowaniu plonów łubinu wąskolistnego odmiany Mirela, podczas gdy wyraźnie determinowały plonowanie innej odmiany łubinu wąskolistnego – Emir (Grabowska i in. 2010) oraz innych roślin strączkowych, np. grochu siewnego (Grabowska 2004). Trzeba dodać, że SR częściej wchodziło do równań regresji, gdy w zestawie zmiennych nie uwzględniano temperatury maksymalnej i minimalnej.

Przykład wykorzystania modeli do prognozy plonu łubinu wąskolistnego (odm. Mirela)

Jedno z najlepszych równań, wybrane spośród tych, które pozytywnie przeszły weryfikację testem Cross Validation, wykorzystano do prognozy plonów łubinu w przyszłych warunkach klimatycznych, scharakteryzowanych według założeń trzech scenariuszy zmian klimatu: GISS (model E), HadCM3, GFDL.

Symulacji plonów odmiany Mirela dokonano na podstawie równania opracowanego na podstawie danych uzyskanych ze stacji Wróćkowo, zlokalizowanej blisko Olsztyna, dla której uzyskano najwyższe plony:

$$y = -8,6915 + 0,015 T_{max}2^2 + 0,5284 T_{min}4 \quad (1)$$

Równanie to (tab. 5) zawiera dwa parametry termiczne: temperaturę maksymalną okresu wschody-początek kwitnienia (funkcja kwadratowa) ze współczynnikiem regresji istotnym na poziomie 0,01 oraz temperaturę minimalną okresu koniec kwitnienia-dojrzałość techniczna, której współczynnik regresji istotny był na poziomie 0,05.

W tabeli 6 przedstawiono statystyczną charakterystykę zmiennych modelowych obserwowanych i generowanych, z której wynika, że generowane średnie wartości zmiennych niezależnych były wyższe niż rzeczywiste, przy czym różnice w przypadku $T_{max}2$ były niewielkie (0,2-0,5°C), a w przypadku $T_{min}4$ wyraźne (1,4-2,9°C). Wariancja i odchylenie standardowe zmiennej $T_{max}2$ uzyskane na podstawie danych rzeczywistych były takie same, jak przy założeniu scenariusza GFDL i wyniosły odpowiednio 3,7 i 1,9°C. Wartości te były wyższe, gdy przyjęto scenariusz GISS, a najwyższe w przypadku scenariusza HadCM3 – 4,8 i 2,2°C. Współczynnik zmienności $T_{max}2$ kształtował się na poziomie 10,0 (GFDL) i 11,4% (HadCM3). Najniższe wartości wariancji i odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności zmiennej $T_{min}4$ uzyskano przy założeniu scenariusza GISS, a najwyższe według HadCM3.

Prognozowane plony odmiany Mirela we Wróćkowie okazały się wyższe od rzeczywistych (tab. 7).

Tabela 6. Charakterystyka zmiennych modelowych obserwowanych i generowanych – łubin wąskolistny odmiany Mirela (Wróćikowo)

Table 6. Characteristics of observed and generated model variables – blue lupine Mirela cultivar (Wróćikowo)

Parametr Parameter	Zmienne observed variables		Zmienne generowane / Generated variables					
			GISS		HadCM3		GFDL	
	T_{max2}	T_{min4}	T_{max2}	T_{min4}	T_{max2}	T_{min4}	T_{max2}	T_{min4}
n	15	15	100	100	100	100	100	100
\bar{x}	18,7	12,4	18,9	13,8	19,2	15,3	19,1	14,6
s^2	3,7	2,1	3,9	1,2	4,8	2,8	3,7	1,6
s	1,9	1,4	2,0	1,1	2,2	1,7	1,9	1,3
max	22,1	15,3	24,3	16,7	23,7	18,8	24,1	17,9
min	16,4	10,6	12,4	11,7	14,6	11,8	14,6	11,9
$max-min$	5,8	4,7	11,9	4,9	9,0	7,0	9,5	6,0
V	10,3	11,5	10,4	7,8	11,4	10,9	10,0	8,7

Objaśnienia / Explanation: n – liczba obserwacji / number of observations; \bar{x} – średnia / mean value (°C); s^2 – wariancja / variance (°C); s – odchylenie standardowe / standard deviation (°C); max – maksymalna / maximal (°C); min – minimalna / minimal (°C); $max-min$ – rozstęp / range (°C); V – współczynnik zmienności / coefficient of variation (%)

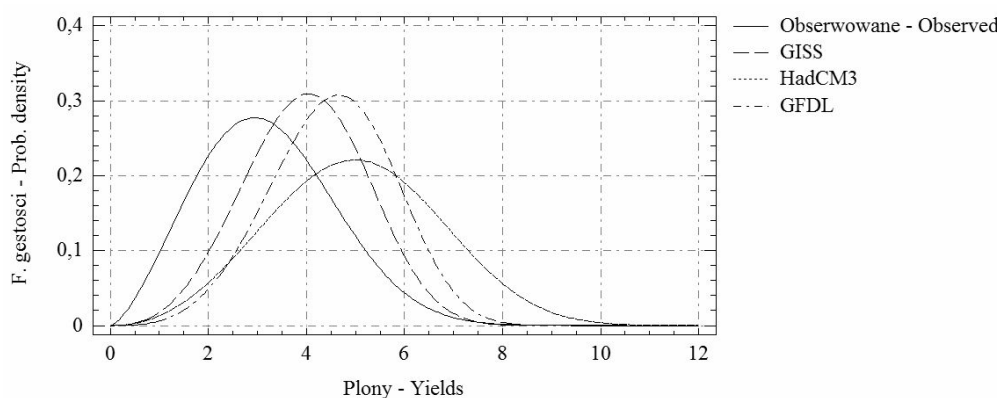
Tabela 7. Statystyka opisowa plonów obserwowanych i symulowanych ($t \cdot ha^{-1}$) – łubin wąskolistny odmiana Mirela (Wróćikowo)

Table 7. Descriptive statistics of observed and simulated yields ($t \cdot ha^{-1}$) – blue lupine Mirela cultivar (Wróćikowo)

Parametr Parameter	Plony observed yields	Plony symulowane / Simulated yields		
		GISS	HadCM3	GFDL
n	15	100	100	100
\bar{y}	3,20	4,00	5,03	4,53
s^2	2,12	1,61	3,08	1,58
s	1,45	1,27	1,75	1,26
max	5,81	7,05	8,89	7,71
min	1,30	1,00	0,83	1,80
$max-min$	4,51	6,05	8,06	5,91
V	45,51	31,76	34,90	27,73

Objaśnienia / Explanation: n – liczba obserwacji / number of observations; \bar{y} – średni / mean; s^2 – wariancja / variance; s – odchylenie standardowe / standard deviation; max – maksymalny / maximal; min – minimalny / minimal; $max-min$ – rozstęp / range; V – współczynnik zmienności / coefficient of variation (%)

Najwyższe średnie wartości uzyskano przy założeniu scenariusza HadCM3 – $5,03 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, następnie GFDL – $4,53 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ i GISS – $4,00 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, podczas gdy średni plon w latach 1994-2008 wyniósł $3,20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Różnica między średnim plonem rzeczywistym a symulowanym według scenariusza HadCM3 była istotna statystycznie według testu Tukeya. Istotna była też różnica między średnim plonem symulowanym zgodnie z GISS, a tymi według HadCM3 i GFDL. Wariancja i odchylenie standardowe plonów najwyższe były przy założeniu scenariusza HadCM3, niższe w przypadku plonów obserwowanych, a najniższe (jednocześnie bardzo zbliżone) według scenariuszy GISS i GFDL (tab. 7, rys. 1). Rozstęp kształtował się od $4,51$ (plony rzeczywiste) do $8,06 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (HadCM3). Współczynnik zmienności plonów rzeczywistych był najwyższy – $45,5\%$, niższy plonów symulowanych według HadCM3 – $34,9\%$ i GISS – $31,8\%$, a najniższy według GFDL – $27,7\%$.



Rys. 1. Rozkłady prawdopodobieństwa plonów obserwowanych i symulowanych łubinu wąskolistnego odmiany Mirela (Wróćikowo)

Fig. 1. Probability distributions of observed and simulated yields of blue lupine Mirela cultivar (Wróćikowo)

Do wyznaczenia rozkładu prawdopodobieństwa plonów wykorzystano rozkład prawdopodobieństwa Weibulla (tab. 8). Stwierdzono, że w przyszłości mniejsze będzie prawdopodobieństwo wystąpienia plonów niższych od $2,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, a większe plonów wyższych od $4,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Tabela 8. Dodatkowe informacje o prawdopodobieństwach osiągnięcia odpowiedniej wysokości plonu łubinu wąskolistnego odmiany Mirela (Wróćnikowo)

Table 8. Additional information about the probability of achieving an appropriate amount of yield blue lupine Mirela cultivar (Wróćnikowo)

Szacowane parametry Estimated parameters	Plony aktualne Present yields	Plony dla 2 x CO ₂ / Yields for 2 x CO ₂ GISS	HadCM3	GFDL
Parametry rozkładu Weibulla Weibull distribution parameters				
α	2,484	3,570	3,189	4,039
β	3,620	4,437	5,612	4,995
Kwantyle rozkładu / Distribution quantiles				
$P(y < 1,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1})$	0,106	0,021	0,015	0,008
$P(y < 2,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1})$	0,205	0,056	0,037	0,025
$P(y < 2,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1})$	0,329	0,121	0,073	0,059
$P(y > 4,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1})$	0,180	0,349	0,610	0,519
$P(y > 5,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1})$	0,107	0,216	0,501	0,366
$P(y > 5,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1})$	0,059	0,116	0,392	0,229
Wartości krytyczne / Critical values				
$P(y < y_0) = 0,01$	0,568	1,223	1,326	1,599
$P(y < y_0) = 0,05$	1,095	1,931	2,211	2,394
$P(y > y_0) = 0,05$	5,630	6,033	7,917	6,554
$P(y > y_0) = 0,01$	6,694	6,806	9,059	7,290
Granice i prawdopodobieństwo tolerancji Tolerance limits and probabilisty				
$P(\bar{y} - s < y < \bar{y} + s)$	0,695	0,680	0,675	0,670
$P(\bar{y} - 2s < y < \bar{y} + 2s)$	0,973	0,963	0,962	0,956
$P(\bar{y} - 3s < y < \bar{y} + 3s)$	0,998	0,999	0,999	0,999

WNIOSKI

1. W północno-wschodniej Polsce, w wieloleciu 1990-2008, obserwowano dużą zmienność czynników meteorologicznych (promieniowania całkowitego, temperatury powietrza i opadów atmosferycznych) w poszczególnych okresach wzrostu i rozwoju łubinu wąskolistnego odmiany Mirela, co miało wpływ na wysokość jej plonowania. Oddziaływanie to było zróżnicowane w zależności od lokalizacji stacji i stanu zaawansowania wegetacji.

2. Uzyskane modele pogoda-plon, jak większość modeli statystycznych, mają ograniczone zastosowanie do obszaru oraz czasu, dla którego zostały utworzone. Procedura Cross Validation spowodowała dyskwalifikację wielu modeli, w pozostałych – współczynniki determinacji R^2_{pred} osiągnęły wysokie wartości.

3. Dominujący wpływ na wysokość plonów łubinu wąskolistnego odmiany Mirela miały zmienne: temperatura maksymalna lub temperatura średnia

początkowych okresów rozwojowych oraz suma opadów w czasie od końca kwitnienia do dojrzałości technicznej.

4. Zweryfikowane modele pogoda-plon dają dobre oszacowanie plonów i umożliwiają ich prognozowanie. Plony łubinu wąskolistnego odmiany Mirela oszacowane dla warunków podwojenia zawartości CO₂ w atmosferze, według wszystkich analizowanych scenariuszy (GISS, HadCM3, GFDL), były wyższe niż obserwowane w latach doświadczeń, a najlepszym okazał się scenariusz HadCM3. Należy spodziewać się, że zachodzące zmiany klimatu wpłyną korzystnie na plonowanie łubinu wąskolistnego.

PIŚMIENNICTWO

- Christiansen J.L., Jørnsgård B., Holm G., Clausen M., 1997. Influence of temperature, day length and sowing date on canopy development and yield stability in determinate and an indeterminate variety of *Lupinus angustifolius* L., W: Łubin we współczesnym rolnictwie. Mat. konf. Łubin-Białko-Ekologia, Olsztyn-Kortowo 25-27.06.1997, 1, 205-212.
- Dymerska A., Grabowska K., 2014. Prognozowanie plonów łubinu żółtego w zależności od wybranych scenariuszy zmian klimatu. Acta Agroph. Monograph., 2, 1-98.
- Dymerska A., Grabowska K., Banaszkiwicz B., 2012. Warunki pogodowe a plonowanie łubinu wąskolistnego (*Lupinus angustifolius* L.) w północnej Polsce. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 12(2), 121-132.
- Faligowska A., Szukała J., 2009. Wpływ terminu zbioru na skład chemiczny i plon zielonki z łubinu białego, żółtego i wąskolistnego. Fragm. Agron., 26(2), 26-32.
- Grabowska K., 2004. Matematyczne modelowanie grochu siewnego w oparciu o czynniki meteorologiczne. UWM Olsztyn, Rozprawy i monografie, 99, ss. 86.
- Grabowska K., Banaszkiwicz B., Dymerska A., 2010. Weather conditions vs. agrophenology and yielding of *Lupinus angustifolius* in north-eastern Poland. W: Agrometeorology Research (Red. J. Leśny). Acta Agroph. Rozpr. i Monogr., 185(6), 111-122.
- Hunt L.A., Kuchar L., Swanton C.J., 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. Agric. For. Meteorol., 91, 293-300.
- Jansen G., 2008. Effects of temperature on yield and protein content of *Lupinus angustifolius* cultivars. W: Lupins for Health and Wealth. (Red. J.A. Palta, J.B. Berger). Proceedings of the 12th International Lupin Conference, 14-18 Sept. 2008, Fremantle, Western Australia. International Lupin Association, Canterbury, New Zealand, 342-345.
- Januszewicz E.K., Suchowilska E., 2003a. Reakcja na susze nowych odmian łubinu żółtego (*Lupinus luteus* L.). Cz. I Reakcja na suszę posiewną. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 495, 27-37.
- Januszewicz E.K., Suchowilska E., 2003b. Reakcja na susze nowych odmian łubinu żółtego (*Lupinus luteus* L.). Cz. II Reakcja na suszę łubinu żółtego w fazie kwitnienia i plonowania. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 495, 39-49.
- Kozyra J., Doroszewski A., Nieróbca A., 2009. Zmiany klimatyczne i ich przewidywany wpływ na rolnictwo w Polsce. Studia i Raporty IUNG – PIB, 14, 243-258.
- Kuchar L., 1994. Validation test for weather forecasting method using plant phenology and data sets from Poland. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 405, 115-119.
- Kuchar L., 2001. Ocena modeli matematycznych na podstawie testu typu Cross Validation. Przegl. Nauk. Wydz. Inż. Kszt. Środ. SGGW, 21, 165-170.

- Kuchar L., 2004. Using WGENK to generate synthetic daily weather data for modelling of agricultural processes. *Math. Comp. Simul.*, 65, 69-75.
- Kuchar L., 2005. Zmodyfikowany model WGENK generowania dobowych danych meteorologicznych na potrzeby modelowania agrometeorologicznego. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, t. 5, z. specj. (14), 185-195.
- Kuchar L., 2009a. Application of mathematical methods for crop yield estimation under changing climatic conditions. W: *Climate change and agriculture in Poland – impacts, mitigation and adaptation measures* (Red. J. Leśny). *Acta Agroph. Rozpr. i Monogr.*, 169(1), 52-62.
- Kuchar L., 2009b. Validation test of WGENK weather generator for Polish Lowland. W: *Environmental aspects of climate changes*. Ed. Z. Szwejkowski. UWM Olsztyn, 9-20.
- Kurasiak-Popowska D., Szukała J., Mystek A., 2003. Wpływ niektórych czynników agrotechnicznych na wigor nasion łubinu żółtego i wąskolistnego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 495, 181-190.
- Łykowski B., 1984. Warunki klimatyczne rozwoju i plonowania soi w Polsce. SGGW-AR Warszawa, *Rozprawy Naukowe i Monografie*, 41, ss. 82.
- Macdonald G., Sertorio L., 1991. *The global climate and ecosystem change*. New York, Plenum Press, 268.
- Mearns L.O., Rosezweig C., Goldberg R., 1997. Mean and variance change in climatic scenarios. Methods agricultural applications and measures of uncertainty. *Climate Change*, 35, 367-396.
- Metodyka Badania Wartości Gospodarczej Odmian (WGO) Roślin Uprawnych. 1. Rośliny Rolnicze. 1.2 Strączkowe. Wydanie I, COBORU Słupia Wielka, 1998.
- Metodyka przeprowadzania doświadczeń odmianowych z roślinami strączkowymi. Słupia Wielka, 1983.
- Michaelson J., 1987. Cross-Validation in Statistical Climate Forecast Models. *J. of Climate and Appl. Meteorol.*, 26, 1589-1600.
- Michalska B., 1993. Agroklimatyczne warunki uprawy bobiku w Polsce. AR Szczecin, *Rozprawy*, 155, ss. 103.
- Podleśny J., Podleśna A., 2010a. Wpływ temperatury w początkowym okresie wzrostu na plonowanie termo- i nietermoneutralnych odmian łubinu wąskolistnego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 550, 97-104.
- Podleśny J., Podleśna A., 2010b. Dynamika gromadzenia suchej masy przez termoneutralne i nietermoneutralne odmiany łubinu wąskolistnego w zależności od terminu siewu. *Acta Agroph.*, 16(1), 137-147.
- Podleśny J., Strobel W., 2006. Wpływ terminu siewu na kształtowanie wielkości plonu nasion i białka zróżnicowanych genotypów łubinu wąskolistnego. *Acta Agroph.*, 8(4), 923-933.
- Podsiadło C., Kaczmarczyk S., 2003. Ocena wpływu deszczowania i nawożenia mineralnego na plonowanie i zachwaszczenie łubinu wąskolistnego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 495, 191-200.
- Rosenzweig C., 1989. *Global Climate Change: Predictions and Observations*. *Am. J. Agric. Econom.*, 71, 1265-1271.
- Strobel W., Pszczółkowski P., 2007. Wpływ wilgotności strąków i czynników pogodowych na pękanie strąków i osypywanie nasion łubinu wąskolistnego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 522, 317-323.
- Wilkin J., 2008. Zmiany klimatu a rolnictwo i obszary wiejskie. Jak przygotować się do niechcianych zmian? Jak zmniejszyć ich negatywny wpływ? FDPA Warszawa, 95-101.

PREDICTING OF BLUE LUPINE YIELDS BASED
ON THE SELECTED CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Krystyna Grabowska, Aneta Dymerska, Katarzyna Pożarska, Jan Grabowski

Department of Water, Climate and Environmental Management
University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Plac Łódzki 1, 10-727 Olsztyn
e-mail: grabkrys@uwm.edu.pl

Abstract. The study examined the impact of weather factors on yielding of blue lupine cultivar Mirela in 1990-2008 and forecasted the yields for 2050-2060 using the weather-yield models and three climate change scenarios for Central Europe: GISS model E, HadCM3 and GFDL. The source material was the results of cultivar experiments and meteorological observations obtained from the COBORU research stations, situated in North-Eastern Poland. The analyses included the correlation and multiple progressive stepwise regression methods. The fitting of the models was evaluated with the coefficient of determination R^2 , adjusted coefficient of determination R^2_{adj} , standard estimation error and coefficient of determination R^2_{pred} calculated with the Cross Validation procedure. The significance of regression equations was determined by a F-Snedecor test. The selected equation was used to prediction the yielding of lupin in conditions of doubling CO_2 content in the atmosphere. It was found that the impact of meteorological factors on the yielding of blue lupine was diversified depending on the location of the station. Most frequently, the yield was significantly influenced by temperature (maximum, average, minimum) in the beginning of growing seasons and also by precipitation in the period: the end of flowering – technical maturity. The studies demonstrated that the predicted climatic changes would exert a beneficial impact on lupin yielding. Simulated yields were higher than those observed in 1990-2008 and the most favourable scenario was HadCM3.

Key words: lupin, yield, meteorological factors, climate change scenarios