

Tomasz Rozbicki

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW
Zakład Meteorologii i Klimatologii
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU
Division of Meteorology and Climatology

Zastosowanie wskaźników opadowych jako parametrów w modelowaniu agrometeorologicznym

Application of precipitation indexes in agrometeorological modelling

Słowa kluczowe: pszenica ozima, modele pogoda - plon, opad atmosferyczny

Key words: winter wheat, weather – yield modeling, precipitation

Wstęp

Właściwa ocena i wykorzystanie, a także badanie wpływu warunków środowiskowych na rozwój i plonowanie roślin jest problemem bardzo złożonym, zajmującym badaczy – specjalistów reprezentujących różne dziedziny nauki. Jednym z najważniejszych czynników oddziałujących bezpośrednio na wielkość i jakość produkcji rolniczej jest pogoda, która charakteryzuje się na tle innych dużą zmiennością. Potrzeba opracowania modeli pogoda – plon oraz udoskonalanie modeli już istniejących jest uzasadniona. Rolnictwo musi przystosować się do takich zjawisk, jak długotrwały trend klimatyczny czy systematyczne zmniejszanie się arealu. Prawidłowa ocena wysokości plonów jest pierwszym etapem

w poszukiwaniu takich rozwiązań, które przy znacznych wahaniami pogody zminimalizują skutki przypadkowości zmian produkcji rolniczej.

Celem niniejszego opracowania jest określenie związków między wysokością plonów pszenicy ozimej i elementami meteorologicznymi, charakteryzującymi warunki termiczne, opadowe i wilgotnościowe, oraz wyznaczenie zależności funkcyjnej wysokości plonów od wskaźników charakteryzujących warunki opadowe. Ważnym etapem pracy jest próba odpowiedzi na pytanie, czy złożone wskaźniki opadowe zastosowane w analizie regresji jako zmienne niezależne poprawiają jakość uzyskanych równań pogoda – plon.

Materiał i metoda

Dane o wysokości plonów i fazach rozwojowych pszenicy ozimej oraz dane meteorologiczne pochodzą z sze-

ściu Stacji Doświadczalnych Oceny Odmian i związanych z nimi stacji meteorologicznych, z wielolecia 1970–1990. Przy doborze stacji badawczych posłużono się dwoma kryteriami – klimatycznym i glebowym. Wykaz stacji, ich przynależność do regionu klimatycznego oraz zwięzłość gleby, na której prowadzone są uprawy pszenicy ozimej, przedstawia tabela 1.

Duża liczba elementów meteorologicznych uwzględnionych w analizie daje możliwość pełniejszego obrazu zjawiska, z drugiej strony duża liczba zmiennych spotęgowana przez ich interakcje zaciemnia obraz i może spowodować niezauważenie jakiegoś istotnego elementu (Drapper i Smith 1973). Aby ograniczyć takie ryzyko przy wyznaczaniu najlepszego równania regresji, zastosowano dwustopniową selekcję parametrów (Rozbicki 1997). Zestawienie elementów meteorologicznych wykorzystanych w analizie przedstawiono w tabeli 2.

W pierwszym etapie materiałem wyjściowym były wszystkie elementy meteorologiczne z jednego rozpatrywanego okresu rozwojowego pszenicy

ozimej. W wyniku takiej selekcji najczęściej otrzymano równanie regresji prostej lub wielokrotnej, uwzględniające zmienne z pojedynczego okresu rozwojowego, nazwane w pracy równaniem dla fazy. W drugim etapie materiałem wyjściowym były wszystkie elementy meteorologiczne, które znalazły się w równaniach dla faz (w I etapie), a wynikiem takiej analizy było równanie regresji wielokrotnej uwzględniające elementy z całego okresu rozwojowego pszenicy ozimej, nazwane równaniem najlepszym. Równania najlepsze, uzyskane w drugim etapie, dodatkowo poddano weryfikacji metodą CV – cross validation (Kuchar 2001).

Powyższa dwuetapowa analiza została przeprowadzona dla wszystkich sześciu stacji dla dwóch wariantów równań. W pierwszym przypadku do analizy wykorzystano wszystkie rozpatrywane elementy meteorologiczne (proste i złożone). Następnie podjęto próbę wyznaczenia równań najlepszych, zawierających jako zmienne jedynie elementy proste.

TABELA 1. Wykaz stacji meteorologicznych i Stacji Oceny Odmian Roślin
TABLE 1. List of meteorological station and phenological stations

Stacja meteorologiczna Meteorological station	Stacja Oceny Odmian Phenological Station	Region klimatyczny (wg Romera) Climatic region (by Romer)	Gleba Soil
Resko	Prusim	klimat bałtycki Baltic climate	lekka / light
Radostowo			ciężka / heavy
Koło	Kościelec	klimat Krainy Wielkich Dolin Great Lowland climate	lekka / light
Sulejów			średniozwięzła moderate
Wrocław	Zybiszów	klimat podgórskich nizin i kotlin Mountain-foot climate	ciężka / heavy
Tarnów	Przeclaw		hiężka / heavy

TABELA 2. Lista elementów meteorologicznych i wskaźników opadowych – zmiennych niezależnych użytych w analizie regresji

TABLE 2. List of meteorological elements and precipitation indexes – independent variables used in regression analysis

Symbol Symbol	Elementy meteorologiczne (elementy proste) Meteorological elements (simple elements)	Jednostka Unit
1	2	3
<i>t</i>	średnia temperatura powietrza mean air temperature	°C
<i>tx</i>	średnia maksymalna temperatura powietrza mean air maximum temperature	°C
<i>tn</i>	średnia minimalna temperatura powietrza mean air minimum temperature	°C
<i>tg</i>	średnia minimalna temperatura powietrza przy gruncie (na wys. 5 cm) mean air minimum temperature 5 cm above ground level	°C
<i>P</i>	wysokość opadu atmosferycznego amount of precipitation	mm
<i>bo</i>	liczba dni bez opadu numer of days without precipitation	
<i>zo</i>	liczba dni z opadem numer of days with precipitation	
<i>f</i>	średnia wilgotność względna mean relative humidity of air	%
<i>d</i>	średni niedosyt wilgotności powietrza mean vapour pressure deficit	hPa
<i>du</i>	wskaźnik parowania ($d \cdot u^{1/2}$), przy czym <i>u</i> jest prędkością wiatru index of evaporation ($d \cdot u^{1/2}$), where <i>u</i> is the wind velocity	
Wskaźniki opadowe Precipitation indexes		
<i>P²</i>	kwadrat sumy opadów atmosferycznych square of amount of precipitation	
<i>P^{1/2}</i>	pierwiastek sumy opadów atmosferycznych square root of amount of precipitation	
<i>PL</i>	wskaźnik obliczony jako średnia suma opadów w okresie rozwojowym (<i>P/L</i>), przy czym <i>L</i> – długość okresu międzyfazowego index calculated as mean amount of precipitation in the phenological period (<i>P/L</i>), where <i>L</i> – duration of phenological period	mm·d ⁻¹
<i>PZ</i>	wskaźnik obliczony jako średnia suma opadu dla dni opadowych (<i>P/zo</i>), przy czym <i>zo</i> – liczba dni z opadem index calculated as mean amount of precipitation for days with precipitation (<i>P/zo</i>), where <i>zo</i> – numer of days with precipitation	mm·d ⁻¹
<i>il</i>	średnia wartość wskaźnika wilgotności gruntu obliczonego według wzoru Lambora – patrz objaśnienia mean value of interior precipitation index calculated by the use of Lambor formula – see explanations	
<i>ia</i>	średnia wartość wskaźnika wilgotności gruntu obliczonego metodą „amerykańską” – patrz objaśnienia mean value of interior precipitation index calculated by the use of AHS formula – see explanations	

cd. tab. 2
tab. 2 cont.

1	2	3
1	siew – wschody swing – appearance	
0	wschody – wiosenne ruszenie wegetacji appearance – spring start of vegetation	
2	wiosenne ruszenie wegetacji – strzelanie w źdźbło spring start of vegetation – shooting	
3	strzelanie w źdźbło – początek kłoszenia shooting – start of heading	
4	kłoszenie – dojrzałość woskowa start of heading – dough stage	

Objaśnienia/Explanations:

$$il = \frac{1}{120} \sum (a_i \cdot \sqrt{P_i})^2 - \text{wskaźnik wilgotności gruntu obliczony metodą Lambora,}$$

– anterior precipitation index calculated by the use of Lambor formula

a_i – współczynnik wagowy przyjmowany jako $a_1 = 15$, $a_2 = 14$ itd. aż do dnia piętnastego $a_{15} = 1$

weighted coefficient assumed as $a_1 = 15$, $a_2 = 14$ etc. and $a_{15} = 1$

P_i – suma opadów atmosferycznych w i -tym dniu

precipitation of the day i

$$ia = \sum k^i \cdot P_i - \text{wskaźnik wilgotności gruntu obliczony metodą „amerykańską”}$$

anterior precipitation index calculated by the use of American Hydrological Service formula,

k – stały współczynnik, przyjmowany $k = 0,84$

constant coefficient assumed $k = 0.84$

Na zakończenie wyznaczone zostały funkcje opisujące zależności wysokości plonów od parametrów charakteryzujących warunki opadowe, przy założeniu średniego przebiegu pozostałych elementów (termicznych i wilgotnościowych). Funkcje te zostały określone w ten sposób, że do równań regresji wyznaczonych w drugim etapie analizy (równań najlepszych) podstawiono średnie wartości parametrów temperatury i wilgotności powietrza.

Wyniki

Zestawienie tabelaryczne (tab. 3) zawiera podstawowe charakterystyki statystyczne uzyskanych równań regre-

sji. Analizując zestawione wyniki, zauważa się, że w pięciu przypadkach współczynniki determinacji równań regresji wyznaczonych na podstawie elementów prostych i złożonych są wyższe niż współczynniki determinacji równań opracowanych tylko na podstawie elementów prostych. Wyjątek stanowi równanie dla stacji Tarnów – Przecław. Elementy charakteryzujące opad atmosferyczny znalazły się w równaniach opracowanych dla wszystkich sześciu stacji, a najczęściej występującą zmienną jest suma opadu atmosferycznego w okresie „strzelanie w źdźbło – początek kłoszenia” lub wskaźniki opadu z tego okresu rozwojowego. Wszystkie uzyskane równania najlepsze są istotne na poziomie $\alpha = 1\%$.

TABELA 3. Charakterystyki statystyczne równań regresji pogoda – plon
TABLE 3. Statistics of regression equations weather – yield

Stacja Station	Równanie Equation	R^2_{adj} [%]	SEE	$R^2_{adj(1)}$ [%]	$R^2_{pred.}$ [%]
Prusim	$Y = 3,743 + 0,112 \cdot tx_1 + 0,0513 \cdot PZ_2^2 - 0,434 \cdot il_2 + 0,00498 \cdot PZ_3^2 - 0,0401 \cdot bo_3 - 0,0185 \cdot PZ_4^2$	77,5	0,33	75,7	27,5
Radostowo	$Y = -79,68 - 3,165 \cdot P_2 + 0,00870 \cdot P_2^2 + 32,270 \cdot P_2^{1/2} + 0,103 \cdot PZ_2 - 8,020 \cdot il_2 - 0,0414 \cdot f_3$	76,3	0,58	75,9	57,7
Kościelec	$Y = 1,97 - 0,112 \cdot du_1 + 0,393 \cdot tx_2 + 0,314 \cdot tg_2 + 0,000215 \cdot P_3^2 + 0,22 \cdot PZ_3 - 4,322 \cdot il_3$	81,9	0,43	80,8	34,1
Sulejów	$Y = 32,005 + 1,456 \cdot P_3 - 0,00571 \cdot P_3^2 - 11,659 \cdot P_3^{1/2} - 0,386 \cdot PZ_3 - 0,179 \cdot ia_3$	72,4	0,59	36,0	54,1
Zybiszów	$Y = 33,864 - 0,302 \cdot f_2 - 1,837 \cdot d_2 - 0,0395 \cdot PZ_3^2 - 0,833 \cdot il_4$	77,1	0,39	67,9	60,9
Przeclaw	$Y = 8,458 + 0,17 \cdot zo_1 - 0,0000443 \cdot PZ_2^2 - 0,0696 \cdot bo_2 + 0,371 \cdot t_3 - 0,411 \cdot tn_3 + 0,0696 \cdot P_3 - 1,088 \cdot P_3^{1/2}$	69,5	0,50	69,5	59,5

gdzie:

R^2_{adj} – adjustowany współczynnik determinacji równania regresji
squared correlation coefficient (adjusted)

SEE – błąd standardowy
standard error of estimation,

$R^2_{adj(1)}$ – adjustowany współczynnik determinacji równania regresji zawierającego tylko elementy proste,

squared correlation coefficient (adjusted) for the equation included only simple elements,

R^2_{pred} – współczynnik determinacji równania regresji po zastosowaniu testu CV
squared correlation coefficient after CV test

Równania uzyskane dla czterech, spośród sześciu badanych stacji: Radostowo, Sulejów, Wrocław – Zybiszów i Tarnów Przeclaw, przeszły pozytywnie procedurę testu CV.

Stacja Radostowo

Równania wskaźniki opadowe – plon:

$$Y = -85,6 - 3,165 \cdot P_2 + 0,0087 \cdot P_2^2 + 32,27 \cdot P_2^{1/2} + 0,103 \cdot PZ_2$$

$$Y(P_2) = -85,3 - 3,165 \cdot P_2 + 0,0087 \cdot P_2^2 + 32,27 \cdot P_2^{1/2}$$

$$Y(PZ_2) = 5,85 + 0,103 \cdot PZ_2$$

Stacja Sulejów

Równania wskaźniki opadowe – plon:

$$Y = 30,47 + 1,456 \cdot P_3 - 0,00571 \cdot P_3^2 + - 11,659 \cdot P_3^{1/2} - 0,386 \cdot PZ_3$$

$$Y(P_3) = 29,05 + 1,456 \cdot P_3 - 0,00571 \cdot P_3^2 - 11,659 \cdot P_3^{1/2}$$

$$Y(PZ_3) = 6,49 - 0,386 \cdot PZ_3$$

Stacje Wrocław – Zybiszów

Równania wskaźniki opadowe – plon:

$$Y = Y(PZ_3) = 5,72 - 0,0395 \cdot PZ_3^2$$

Stacje Tarnów – Przeclaw

Równania wskaźniki opadowe – plon:

$$Y = Y(P_3) = 9,29 + 0,0696 \cdot P_3 + - 1,088 \cdot P_3^{1/2}$$

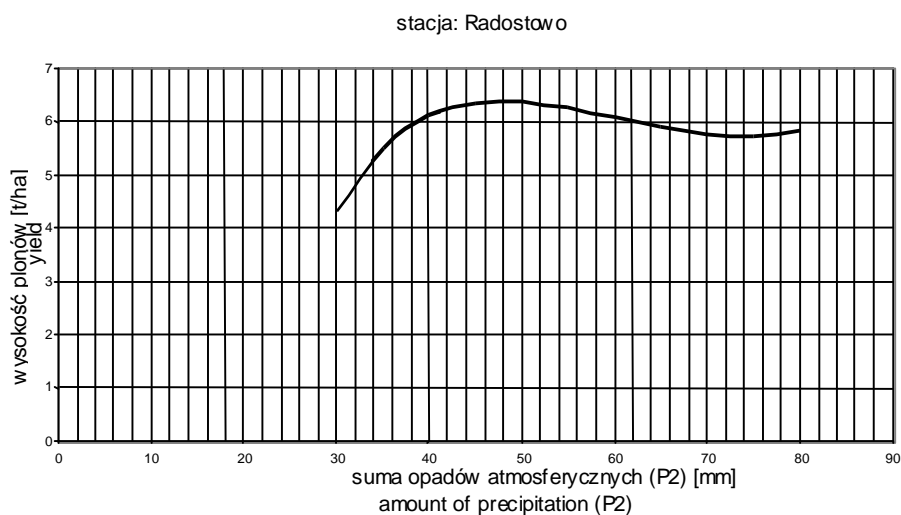
Zależności między wysokością plonu pszenicy ozimej a wskaźnikami charakteryzującymi warunki opadowe przyjmują postać równań krzywoliniowych. Wykresy przebiegu tych równań zestawione zostały na rysunkach 1–4. Zakres wartości sum opadu atmosferycznego i wskaźników opadowych na rysunkach został ograniczony do przedziału między minimalną i maksymalną wartością występującą w rozpatrywanym wieloleciu.

Wnioski

1. Dla czterech stacji spośród sześciu rozpatrywanych istnieją silne związki między wysokością plonu pszenicy ozimej i elementami meteorologicznymi. Współczynniki deter-

minacji uzyskanych równań regresji wielokrotnej zawarte są w przedziale od wartości 69,5% dla stacji Tarnów – Przeclaw do wartości 77,1% dla stacji Wrocław – Zybiszów.

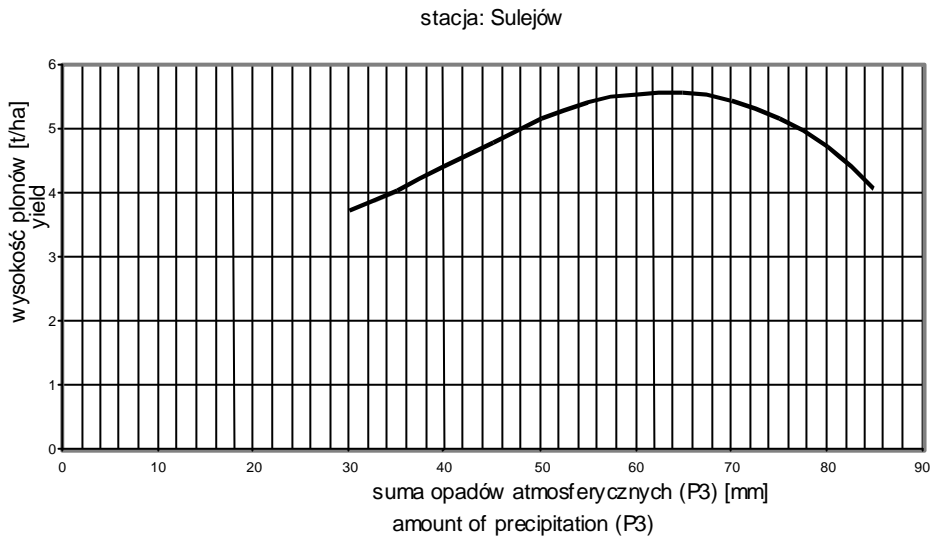
2. Zastosowanie podczas analizy parametrów, takich jak: wskaźniki opadów uprzednich, wskaźniki średnich sum opadów atmosferycznych czy też nieliniowe transformacje sumy opadów (kwadrat, pierwiastek), pozwala na uzyskanie lepszych (z większą wartością współczynnika determinacji) równań regresji niż w przypadku stosowania jedynie prostych elementów meteorologicznych. Potwierdza to, że w warunkach klimatu Polski wpływ wysokości opadów atmosferycznych na plonowanie roślin uprawnych jest złożony.



$$R^2_{\text{adj}} = 76,3\%; \alpha = 0,01$$

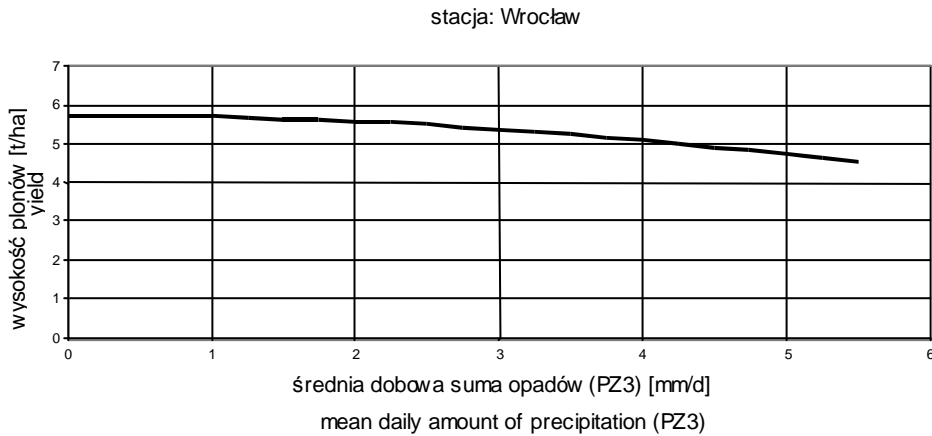
RYSUNEK 1. Wykres zależności między wysokością plonu pszenicy ozimej a sumą opadów w okresie wiosenne ruszenie wegetacji – strzelanie w źdźbło dla stacji Radostowo

FIGURE 1. Graph of relationship between the winter wheat yield and amount of precipitation in the period spring start of vegetation – shooting in Radostowo station



$$R^2_{adj} = 72,4\%; \alpha = 0,01$$

RYSUNEK 2. Wykres zależności między wysokością plonu pszenicy ozimej a sumą opadów w okresie strzelanie w źdźbło – początek kłoszenia dla stacji Sulejów
 FIGURE 2. Graph of relationship between the winter wheat yield and amount of precipitation in the period shooting – start of heading in Sulejów station

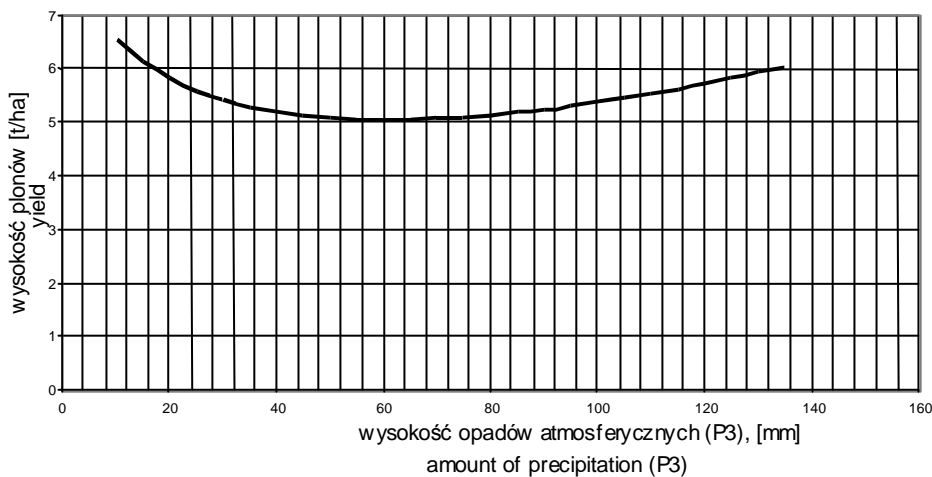


$$R^2_{adj} = 77,1\%; \alpha = 0,01$$

RYSUNEK 3. Wykres zależności między wysokością plonu pszenicy ozimej a średnią dobową sumą opadów w okresie strzelanie w źdźbło – początek kłoszenia dla stacji Wrocław – Zybiszów
 FIGURE 3. Graph of relationship between the winter wheat yield and mean daily amount of precipitation in the period shooting – start of heading in Wrocław – Zybiszów station

..

stacja: Tarnów – Przecław



$$R^2_{adj} = 69,5\%; \alpha = 0,01$$

RYSUNEK 4. Wykres zależności między wysokością plonu pszenicy ozimej a sumą opadów w okresie strzelanie w źdźbło – początek kłoszenia dla stacji Tarnów – Przecław

FIGURE 4. Graph of relationship between the winter wheat yield and amount of precipitation in the period shooting – start of heading in Tarnów – Przecław station

3. Na podstawie równań regresji wielokrotnej w dalszym etapie można wyznaczyć zależności funkcyjne, które umożliwiają określenie optymalnych warunków opadowych dla rozwoju i plonowania roślin uprawnych przy założonym średnim przebiegu warunków termicznych i wilgotnościowych.

Literatura

- DRAPPER N.R., SMITHS H. 1973: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa
- KUCHAR L. 2001: Ocena modeli matematycznych na podstawie testu typu Cross Validation. *Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska* 21: 165–170.
- ROZBICKI T. 1997: Wpływ warunków meteorologicznych na rozwój i plonowanie wybranych roślin uprawnych w różnych warun-

kach glebowych. Praca doktorska. SGGW, Warszawa.

Summary

Application of precipitation indexes in agrometeorological modelling. The aim of the paper is to analyze the relationship between winter wheat yield and selected indexes of precipitation and soil moisture conditions and consequently the attempt of estimation optimum precipitation conditions for the yield. Six meteorological stations and related to them phonological stations have been the source of long-term meteorological, phonological and winter wheat yield data. The stations are situated in three different climatic regions and winter wheat has been grown on different types of soil.

The relationships between the yield and meteorological elements have been stated by the use of multiple regression model

selection. Winter wheat yield was taken as dependent variable and meteorological elements of air temperature, humidity, soil moisture and precipitation and time distribution of precipitation were taken as independent variables.

The relationship equations between winter wheat yield and meteorological elements are strong and adjusted determination coefficients are in the range 69.5–81.9%. Precipitation anterior index, average amount of precipitation indexes and transformation of precipitation amounts (squared and

square root) used as variables in the regression equations improve the correlation coefficients of these equations in comparison the equations including only simple meteorological elements.

Author's address:

Tomasz Rozbicki
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa
Poland