

DARIUSZ GOZDOWSKI ¹
DANIEL SAS ²
STANISŁAW SAMBORSKI ³
ANDRZEJ KAPELIŃSKI ³

¹ Katedra Doświadczalnictwa i Bioinformatyki, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

² Zakład Planowania i Statystyki, Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach

³ Katedra Agronomii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Ocena zmienności przestrzennej zasobności gleby i plonowania pszenicy ozimej z wykorzystaniem pakietu R*

Evaluation of spatial variability of soil fertility and yielding of winter wheat using R software

Dane do analiz pozyskano w roku 2009 z dwóch pól uprawnych obsianych pszenicą ozimą (odmian: *Fregata* i *Potenzial*) zlokalizowanych na Kujawach, w miejscowościach Miechowice i Osłonki. Na podstawie prób roślin i gleby pobranych (z miejsc o znanych współrzędnych geograficznych) na każdym z pól w 25 punktach oceniono wielkość plonu ziarna, zawartość białka w ziarnie oraz zasobność gleby w makroelementy (P₂O₅, K₂O, MgO) oraz pH gleby. Dane poddano analizom geostatystycznym z wykorzystaniem pakietu geoR w programie R z użyciem funkcji `variog()` i `variofit()`. Ocenę zmienności przestrzennej badanych cech wykonano wykorzystując parametry teoretycznych wariogramów.

Słowa kluczowe: zmienność przestrzenna, pszenica ozima, właściwości gleby, wariogramy, plon ziarna, zawartość białka w ziarnie.

Data for analyses were acquired in 2009 from two commercial fields cropped with the winter wheat (cv. *Fregata* and *Potenzial*) in Kujavia region (villages Miechowice and Osłonki). On the basis of soil and plant samples (with known geographical coordinates) collected in 25 sampling points on each field the following traits were examined: grain yield, grain protein content, soil fertility in P₂O₅, K₂O and MgO and soil pH. Geostatistical methods in R software using geoR package (functions: `variog()` and `variofit()`) were applied for the data analyses. Spatial variability of the investigated traits was evaluated using parameters of the theoretical variograms.

Key words: spatial variability, winter wheat, soil properties, variograms, grain yield, grain protein content.

* Praca powstała z dofinansowaniem ze środków grantu SGGW nr 504-10-01230011.

Praca była prezentowana w ramach I Warsztatów Biometrycznych, które odbyły się w IHAR-PIB w Radzikowie w dniach 14-15 września 2010 r.

WSTĘP

Ocena zmienności przestrzennej, w obrębie pojedynczego pola uprawnego, pod względem zasobności gleby w makroelementy oraz potencjału plonowania danego siedliska jest ważnym elementem rolnictwa precyzyjnego (Kerry i Oliver, 2003). Może być również ważna w ocenie zmienności pól uprawnych przeznaczonych pod doświadczenia ściśle (Gołaszewski, 2000; Fagroud i Van Meirvenne, 2001). Dla właściwej oceny zmienności przestrzennej konieczne jest zebranie danych z dużej liczby punktów położonych na obszarze całego pola uprawnego. Miejsca te powinny mieć przypisane współrzędne określające ich położenie przestrzenne. Mogą to być współrzędne geograficzne określone z użyciem odbiornika GPS, bądź współrzędne określone względem punktu położonego np. w obrębie badanego pola uprawnego. Takie dane mogą być następnie wykorzystane do oceny zmienności przestrzennej ocenianych cech (zmiennych) przy wykorzystaniu wariogramów (McBratney i Pringle, 1999).

Badania w zakresie zmienności przestrzennej gleb prowadzono znacznie wcześniej niż zaistniała potrzeba ich praktycznego wykorzystania w technologiach rolnictwa precyzyjnego (Campbell, 1979; Webster i Burgess, 1984). Od początku lat 90. ubiegłego wieku, badania w zakresie zmienności przestrzennej pól uprawnych zaczęły budzić większe zainteresowanie m.in. ze względu na możliwość ich praktycznego wykorzystania do optymalizacji liczby i rozmieszczenia pobieranych prób gleby. Jedną z ważnych prac na ten temat jest publikacja McBratneya i Pringle (1999), którzy próbowali określić z wykorzystaniem wariogramów, jaka strategia pobierania prób gleby byłaby najkorzystniejsza ze względów rolniczych i ekonomicznych. Celem ich pracy było określenie zmienności przestrzennej właściwości fizyko-chemicznych gleby na obszarze pól uprawnych, w zakresie odległości od 1 metra do 1 kilometra. Za najważniejsze cechy gleby uznano pH gleby, zasobność gleby w przyswajalne formy azotu (N), fosforu (P), potasu (K), materię organiczną oraz skład granulometryczny, zwięzłość i pojemność wodną gleby.

Ocena zmienności przestrzennej różnych właściwości gleby, ważnych z rolniczego punktu widzenia, była przedmiotem wielu badań w różnych krajach (Di Virgilio i in., 2007; Liu i in. 2008; Ferreyra, 2002; Huang i in., 2004), w tym również w Polsce (Usowicz i in., 2004 a, 2004 b).

Celem niniejszej pracy było przedstawienie możliwości wykorzystania programu R do oceny zmienności przestrzennej, pól uprawnych obsianych pszenicą ozimą (odmian: Fregata i Potencjal), pod względem zasobności gleby w makroelementy, odczynu gleby, wielkości plonu ziarna oraz zawartości białka w ziarnie. Dane do analiz pochodziły z dwóch pól uprawnych o powierzchni ok. 1 ha każde, zlokalizowanych na Kujawach, w miejscowościach Miechowice i Osłonki. Na podstawie wariogramów, uzyskanych z wykorzystaniem pakietu GeoR (Diggle i Ribeiro, 2007) w programie statystycznym R (R Development Core Team, 2009), oceniono zmienność przestrzenną badanych cech. Powodem wyboru pakietu R i jego funkcji geostatystycznych były jego szerokie możliwości (m.in. różnorodność funkcji teoretycznych wariogramów i ich parametrów) oraz dostępność programu dla użytkowników (program jest bezpłatny i dostępny bez żadnych ograniczeń). Głównym elementem niniejszej pracy jest przedstawienie metodyki

analiz i interpretacji wyników na podstawie wariogramów, a w mniejszym stopniu uogólnianie uzyskanych wyników do warunków środowiskowych regionu lub Polski.

MATERIAŁ I METODY

Dane do analiz pozyskano w 2009 roku z dwóch pól uprawnych obsianych pszenicą ozimą (odmian: Fregata i Potencjal). Pola te, każde o powierzchni ok. 1 ha, zlokalizowane były na Kujawach, w miejscowościach Miechowice i Osłonki (pola w dalszej części pracy oznaczone zostały jako pole nr 1 i 2). Na podstawie prób roślin i gleby pobranych (z miejsc o znanych współrzędnych geograficznych), na każdym z pól w 25 punktach oceniono wielkość plonu ziarna, zawartość białka w ziarnie i zasobność gleby w podstawowe makroelementy (P_2O_5 , K_2O MgO) oraz pH gleby. Współrzędne geograficzne zostały przeliczone na współrzędne względne wyrażone w metrach (układ metryczny), aby każdy punkt miał przypisane współrzędne względem określonego punktu na obrzeżu pola. Przekształcenie to konieczne jest m.in. ze względu, że 1 stopień długości geograficznej nie jest równy 1 stopniowi szerokości geograficznej. Ponadto przekształcenie współrzędnych geograficznych do układu metrycznego ułatwia interpretację uzyskanych wyników.

Pozyskane dane poddano analizom geostatystycznym w celu określenia zmienności przestrzennej badanych cech. Do tego celu wykorzystano wariogramy empiryczne i wariogramy teoretyczne, czyli funkcje dopasowane do danych empirycznych. Wariogram umożliwia przedstawienie zmienności przestrzennej jednej cechy w odniesieniu do odległości między punktami pobrania próbek. Na osi X wariogramu jest przedstawiona odległość między punktami, a na osi Y semiwariancja:

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{2N(\vec{h})} \sum_{n=1}^{N(\vec{h})} [z(x_i) - z(x_i + \vec{h})]^2$$

$\gamma(h)$ — wartość semiwariancji,

$N(h)$ — liczba par punktów odległych o h ,

$z(x_i)$ — wartość badanej cechy (np. pH) w punkcie o znanym położeniu,

$z(x_i+h)$ — wartość badanej cechy w punkcie odległym o h od punktu x_i .

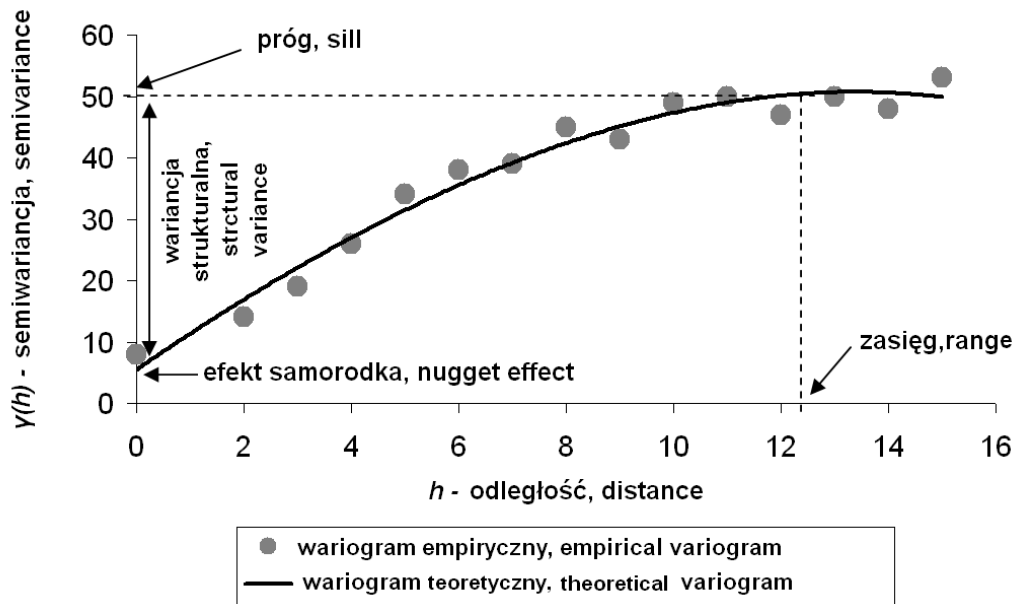
Wartość semiwariancji jest podstawowym parametrem określającym zróżnicowanie przestrzenne między dowolną parą punktów w odległości h między nimi, większa wartość semiwariancji wskazuje na większe różnice, a tym samym większą zmienność przestrzenną.

Na podstawie tak określonych wartości semiwariancji dla wszystkich 300 [$n \times (n-1)/2$] par punktów uzyskuje się rozkład empiryczny, tzw. semiwariogram empiryczny, a następnie uśrednia wartości dla grup punktów odległych o podobną odległość h (odległość ta określana jest jako lag). Do punktów wariogramu empirycznego dopasowuje się funkcję, którą nazywamy wariogramem teoretycznym, (rys. 1). Najczęściej wykorzystywanymi funkcjami są funkcje: sferyczna, wykładnicza lub Gaussa. Dopasowanie dokonuje się zwykle metodą najmniejszych kwadratów (OLS) lub też metodą ważonych najmniejszych kwadratów (WLS). Metoda ważonych najmniejszych kwadratów jest zwykle nieco lepsza ze względu na to, że uwzględnia liczbę punktów na podstawie, której uzyskano wartość

uśrednioną dla każdego lagu. Na podstawie dopasowanych modeli teoretycznych można określić zmienność przestrzenną badanych cech. Wariogram teoretyczny posiada następujące parametry charakteryzujące zmienność przestrzenną badanej cechy, tj.

- próg (sill) (C_0+C), czyli maksymalna szacowana wartość semiwariancji na podstawie funkcji wariogramu teoretycznego — określa zakres zmienności badanej zmiennej dla punktów położonych w odległości na tyle dużej, gdzie nie występuje już między nimi autokorelacja przestrzenna,
- zakres (range) — odległość, do której występuje zależność przestrzenna (autokorelacja),
- efekt samorodka (nugget effect) (C_0): określa różnicę wartości zmiennej w punktach bardzo blisko położonych np. prób gleby pobranych obok siebie, czyli prawie w tym samym miejscu (zwykle wynika z błędu losowego np. w trakcie analizy chemicznej),
- wariancję strukturalną (structural variance) (C), czyli wartość wzrostu semiwariancji od poziomu efektu samorodka do wartości prog.

Parametry te przedstawione są graficznie na rysunku 1.



Rys. 1 Model wariogramu empirycznego i teoretycznego oraz jego parametry
Fig.1. Model of empirical and theoretical variogram and its parameters

Analizy geostatystyczne wykonano w programie R z użyciem pakietu GeoR. Do utworzenia wariogramów empirycznych użyto funkcji `variog()`, natomiast do dopasowania teoretycznych modeli wariogramu funkcji `variofit()`.

Wariogramy empiryczne zostały oszacowane z użyciem domyślnej liczby lagów, która wyniosła 9, natomiast modele teoretyczne zostały oszacowane z użyciem metody WLS (Weight Least Squares) przy wykorzystaniu metodyki zaproponowanej przez Cressie'go (1985).

Kod programu R, wraz z komentarzem (po znaku #) zawierający obydwie ww. funkcje wykorzystany do wykonania analiz jest przedstawiony poniżej.

```
library(geoR)#wczytanie pakietu geoR
setwd("C:/ścieżka_dostępu")#podanie ścieżki do katalogu z danymi
dane <- read.geodata("nazwa_zbioru_danych")
# czytanie zbioru danych z współrzędnymi (pierwsze dwie kolumny)
# oraz analizowaną zmienną (trzecia kolumna)
wariogram_emp <- variog(dane, max.dist = 100)#obliczanie
wariogramu empirycznego z podaniem maksymalnej odległości h -
powinna być ona nieco mniejsza niż maksymalna odległość między
punktami
wariogram_emp <- data.frame(n = j$n, d = j$u, g = j$v)
j2 <- variofit(j,c(1,40),cov.model="spherical",weights="cressie")
#dopasowanie teoretycznej funkcji wariogramu teoretycznego
#przyjęto model sferyczny i metodę WLS Cressie'go jako metodę
#dopasowania funkcji
#jako parametry wstępne progę i zasięgu przyjęto wartości 1 i 40
# zapisanie parametrów wariogramu teoretycznego
cs <- j2$cov.pars[1]
c0 <- j2$nugget
sill <- cs + c0
range <- j2$cov.pars[2]
#utworzenie wykresu z wariogramem empirycznym i teoretycznym
plot(j, type = "p", col = "black", pch = 19, cex = 0.75, main =
"nazwa_cechy", cex.axis = 0.75, cex.lab = 0.75, cex.main = 1)
abline(h = sill, col = "lightgray", lty = 2, lwd = 1.5)
lines(j2, col = "blue", lwd = 2)
abline(v = range, col = "lightgray", lty = 2, lwd = 1.5)
abline(h = c0, col = "lightgray", lty = 2, lwd = 1.5)
```

Na podstawie uzyskanych wyników oceniono zmienność przestrzenną badanych cech i porównano uzyskane wyniki między dwoma badanymi polami uprawnymi.

WYNIKI BADAŃ

Podstawowe parametry statystyczne charakteryzujące zróżnicowanie badanych cech przedstawiono w tabeli 1. Dwa oceniane pola uprawne w największym stopniu różniły się pod względem zasobności gleby w fosfor. Znacznie większą przeciętną zasobność gleby w P_2O_5 stwierdzono dla pola w Miechowicach w porównaniu z polem w Osłonkach, również dla tego pierwszego pola stwierdzono znacznie wyższą zmienność tej cechy. W przypadku

obu pól wielkość plonu ziarna oraz zawartość białka w ziarnie charakteryzowała się znacznie mniejszą zmiennością niż cechy związane z zasobnością gleby.

Tabela 1

Wartości średnie oraz parametry charakteryzujące zmienność cech dla dwóch badanych pól uprawnych

Mean values and parameters characterizing variability of the traits for both examined fields

	Średnia — Mean	Min.	Max.	SD	CV (%)
Pole 1, Field 1: Miechowice — Fregata					
pH _{KCl}	6,12	4,77	7,54	0,86	14,0
P ₂ O ₅ (mg·100 g ⁻¹)	29,7	3,90	76,0	23,6	79,4
K ₂ O (mg·100 g ⁻¹)	9,64	6,00	16,0	2,69	27,9
Mg (mg·100 g ⁻¹)	7,36	5,20	9,90	1,31	17,8
Plon ziarna — Grain yield (t·ha ⁻¹)	7,55	6,67	8,39	0,48	6,4
Zawartość białka w ziarnie Grain protein content (%)	13,6	12,4	14,2	0,39	2,9
Pole 2, Field 2: Osłonki — Potenzjal					
pH _{KCl}	5,69	4,76	7,50	0,97	17,1
P ₂ O ₅ (mg·100 g ⁻¹)	10,4	6,50	21,3	3,76	36,0
K ₂ O (mg·100 g ⁻¹)	12,3	6,00	25,0	4,55	37,1
Mg (mg·100 g ⁻¹)	7,87	4,20	11,3	1,65	21,0
Plon ziarna — Grain yield (t·ha ⁻¹)	8,60	6,46	10,3	1,03	12,0
Zawartość białka w ziarnie Grain protein content (%)	13,0	11,6	14,4	0,65	5,0

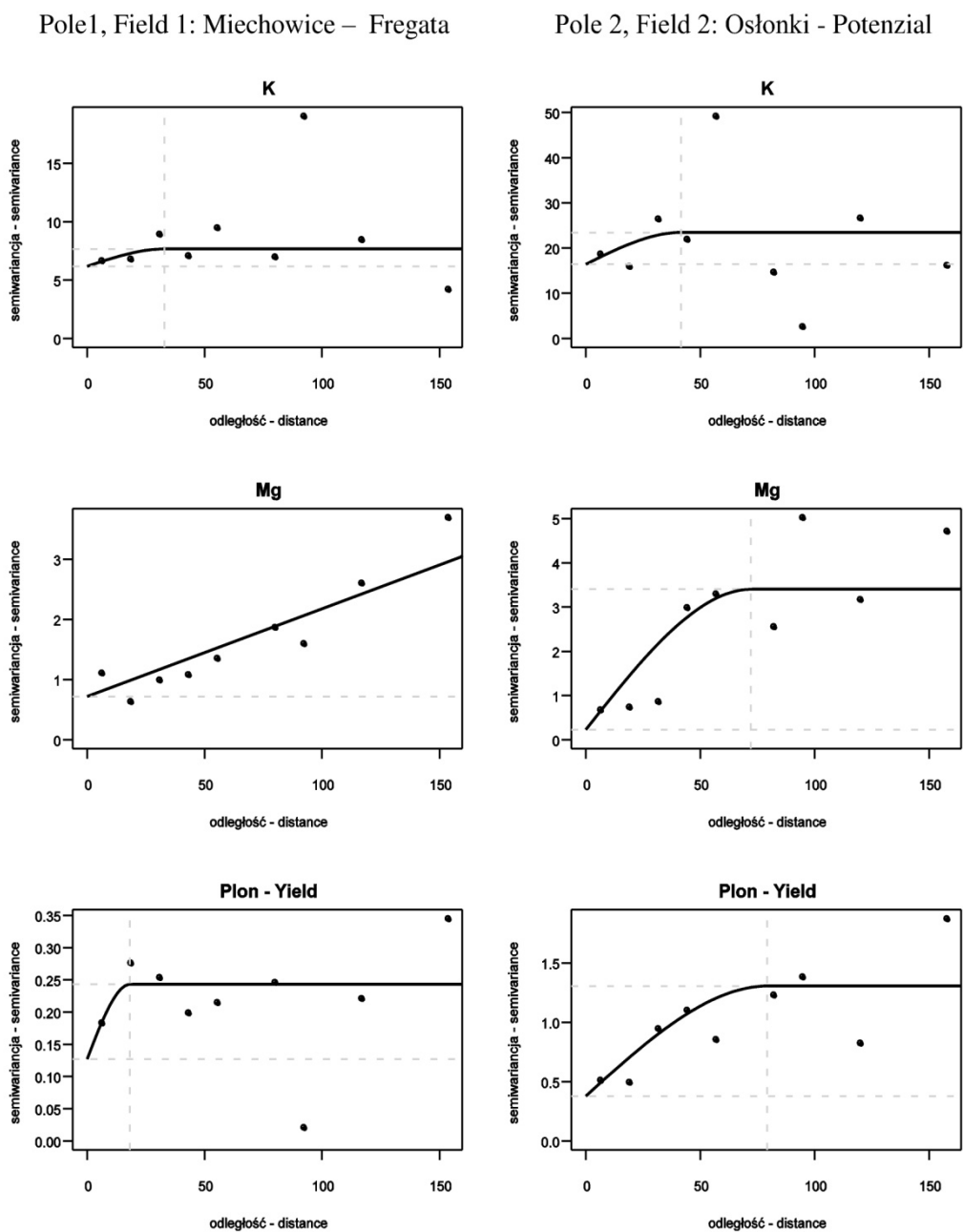
SD — Odchylenie standardowe, standard deviation

CV — Współczynnik zmienności, coefficient of variation

Tabela 2

Parametry wariografów teoretycznych (funkcja sferyczna) ocenianych cech dla obu badanych pól
Parameters of theoretical variograms (spherical function) of evaluated traits for both examined fields

	Zasięg, Range	Efekt samorodka Nugget effect (C ₀)	Wariancja strukturalna, structural variance (C)	Próg, Sill (C ₀ +C)	C/(C ₀ +C) (%)
Pole 1, Field 1: Miechowice — Fregata					
pH _{KCl}	28547	0,00	235	235	100%
P ₂ O ₅ (mg·100 g ⁻¹)	92	0,06	885	885	100%
K ₂ O ₅ (mg·100 g ⁻¹)	32,9	6,18	1,49	7,67	19,4%
Mg (mg·100 g ⁻¹)	38594	0,72	377	378	99,8%
Plon ziarna — Grain yield (t·ha ⁻¹)	18,1	0,13	0,11	0,24	45,8%
Zawartość białka w ziarnie Grain protein content (%)	43,0	0,14	0,02	0,16	12,5%
Pole 2, Field 2: Osłonki — Potenzjal					
pH _{KCl}	47441	0,00	403	403	100%
P ₂ O ₅ (mg·100 g ⁻¹)	69071	2,1	7982	7984	100%
K ₂ O (mg·100 g ⁻¹)	41,6	16,4	7,0	23,4	29,9%
Mg (mg·100 g ⁻¹)	72,1	0,23	3,18	3,41	93,3%
Plon ziarna — Grain yield (t·ha ⁻¹)	79,2	0,38	0,92	1,30	70,8%
Zawartość białka w ziarnie Grain protein content (%)	33,9	0,22	0,22	0,44	50,0%



Rys. 2. Wariogramy zasobności gleby w K_2O ($mg/100\ g$), MgO ($mg \cdot 100g^{-1}$) i plonu ($t \cdot ha^{-1}$) dla dwóch badanych pól
 Fig. 2. Variograms of soil fertility in K_2O ($mg \cdot 100g^{-1}$), MgO ($mg \cdot 100g^{-1}$) and grain yield ($t \cdot ha^{-1}$) for two examined fields

Parametry wariogramów teoretycznych (funkcji teoretycznych) przedstawione są w tabeli 2, natomiast wariogramy w formie graficznej zamieszczono dla trzech wybranych cech na rys. 2. Maksymalna odległość między skrajnymi punktami gdzie pobierano próby gleby i roślin w obrębie każdego z pól wyniosła ok. 150 m, dlatego też wariogramy ograniczone są do tej odległości. Ze względu na to, że zależność przestrzenna (autokorelacja) dla niektórych cech (pH — oba pola, zasobność gleby w P_2O_5 na polu nr 2 oraz zasobności gleby w MgO na polu nr 1) miała zasięg większy niż 150 m szacowany zasięg tej zależności przyjął wartości znacznie większe niż maksymalna odległość między punktami. Wtedy szacowanie zasięgu obarczone jest bardzo dużym błędem i nie należy formułować wniosków na podstawie tego parametru wariogramów. W przypadku pozostałych cech zależność przestrzenna ograniczała się do obszaru badanych pól, tj. nie przekraczała odległości 150 m, zatem wszystkie oszacowane parametry wariogramów teoretycznych można traktować jako właściwe. Na podstawie tych parametrów możemy stwierdzić, że zasobność gleby w potas miała charakter losowy w obrębie badanych pól, gdyż wielkość efektu samorodka dla wariogramu dla tej cechy była bardzo bliska wartości progu. Oznacza to, że nawet dla punktów pobrania gleby znajdujących się w niewielkich odległościach stwierdzono dość duże różnice w zasobności gleby w potas. Spośród cech związanych z zasobnością gleby najsilniejsze zależności przestrzenne stwierdzono, dla pH i MgO. W przypadku wielkości plonu ziarna silniejsze zależności przestrzenne występowały na polu nr 2 niż na polu nr 1, mimo to, że na polu nr 1 całkowita zmienność wielkości plonu ziarna była mniejsza. Zależność przestrzenna na polu nr 1 występowała do odległości poniżej 20 m, natomiast na polu nr 2 do blisko 80 m. Zawartość białka wykazywała stosunkowo słabą zależność przestrzenną na obydwu badanych polach, czyli podobnie jak zasobność gleby w potas miała charakter losowy w obrębie badanych pól.

DYSKUSJA

Uzyskane wyniki charakteryzujące zmienność przestrzenną zasobności gleby w makroelementy, odczyn gleby oraz plon ziarna i zawartość białka w ziarnie mogą być uznawane za wiarygodne. Jednak w przypadku niektórych cech, zwłaszcza tych których zmienność była niewielka i zależność przestrzenna silna w obrębie obszaru badań ($h \leq 150$), nie określono maksymalnej wartości teoretycznej funkcji wariogramu. Wynikało to głównie z tego, że odległość między najdalszymi punktami, gdzie pobierano próbki gleby i roślin, w obrębie badanych pól (ok. 150 m) była zbyt mała, co powodowało, że jeszcze do tej odległości występowała silna korelacja przestrzenna. Wartości zasięgu większe niż 150, podane w tabeli 1 dla takich cech (np. pH) nie należy traktować jako właściwie odzwierciedlające rzeczywistość, gdyż są one poza obszarem badanych pól (ekstrapolowane).

Innym problematycznym elementem uzyskanych wyników jest stosunkowo nieduża liczebność próby. Dla każdego z pól wyniosła ona 25, a więc liczba kombinacji par punktów dla estymacji modelu wariogramu równała się 300 [$n \times (n-1) / 2$]. Liczba ta uznawana jest w literaturze za zbyt małą, Webster i Oliver (1992) uznali, że wiarygodne

modele teoretyczne wariogramów można uzyskać dla liczebności obserwacji większej niż 50, natomiast według Journel i Huijbregts (1978) minimalna liczba obserwacji powinna wynosić 30.

Należy pamiętać, że wyniki szacowanie teoretycznych modeli wariogramów mogą znacząco różnić się przy różnej liczbie lagów oraz przy różnych metodach dopasowania funkcji. Poza metodą dopasowania użytą w niniejszej pracy możliwe jest użycie innego sposobu dopasowania wariogramów z wykorzystaniem metody WLS (Weight Least Squares) lub też nawet klasycznej metodyki OLS (Ordinary Least Squares).

W przypadku występowania większej lub mniejszej zmienności w obrębie różnych części pola (np. spowodowanej różnym ukształtowaniem powierzchni, lub różnymi typami gleby) wskazane jest zastosowanie modeli uwzględniających skorelowane zmienne towarzyszące, co wymaga zmian opisanych wyżej procedur analiz statystycznych.

WNIOSKI

1. Oszacowane funkcje teoretyczne wariogramów pozwoliły na ocenę zmienności przestrzennej zmiennych w obrębie badanych pól uprawnych, co może być ważne m.in. przy optymalizacji wyznaczania miejsc pobrania prób gleby lub oceny przydatności tych pól pod doświadczenia ściśle.
2. Najsilniejsze zależności przestrzenne stwierdzono dla zasobności gleby w fosfor (pole nr 1), magnez i plon ziarna (pole nr 2), natomiast największą zmienność przestrzenną i losowy charakter tej zmienności w obrębie badanych pól stwierdzono dla zasobności gleby w potas (oba pola).
3. Oszacowanie zasięgu teoretycznej funkcji wariogramu w przypadku względnie niewielkich obszarów, czego przykładem mogą być badane pola, może być obarczone znacznym błędem ze względu na konieczną ekstrapolację tego parametru.
4. Pakiet geostatystyczny GeoR, który jest elementem programu R, może być efektywnym narzędziem w określaniu zmienności przestrzennej cech gleby i roślin z wykorzystaniem wariogramów, ze względu na jego szerokie możliwości i dostępność dla użytkowników.

LITERATURA

- Campbell J. 1979. Spatial variability of soils. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 69 (4): 544 — 556.
- Cressie N.A. 1985. *Math. Geol.* 17: 563 — 586.
- Di Virgilio N., Monti A., Venturi G. 2007. Spatial variability of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) yield as related to soil parameters in a small field. *Field Crop. Res.* 101: 232 — 239.
- Diggle P. J., Ribeiro P. J. 2007. *Model-based geostatistics*. Springer: 228 pp.
- Fagroud M., Van Meirvenne M. 2010. Accounting for soil spatial autocorrelation in the design of experimental trials. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 1134 — 1142.
- Ferreira R. A., Apezteguia H. P., Sereno R., Jones J. W. 2002. Reduction of soil water spatial sampling density using scaled semivariograms and simulated annealing. *Geoderma*, 110(3), 265 — 289.
- Gołaszewski J. 2000. Analiza zmienności przestrzennej w doświadczeniach polowych. *Fragm. Agron.* 4: 4 — 14.

- Huang S. Jin J. Yang L., Bai Y., Li C. 2004. Spatial variability of nitrate in cabbage and nitrate-n in soil. *Soil Sci.* 169(9):640 — 649.
- Journel A. G. Huijbregts, Ch. J. 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press, London: 600 pp.
- Kerry R., Oliver M. A. 2003. Variograms of ancillary data to aid sampling for soil surveys. *Precision Agriculture*, 4, 261-278.
- Liu X., Zhao K., Xu J., Zhang M., Si B., Wang F. 2008. Spatial variability of soil organic matter and nutrients in paddy fields at various scales in southeast China. *Environ. Geol.* 53: 1139 — 1147.
- McBratney A., Pringle M. 1999. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. *Precis. Agric.*, 1: 125 — 152.
- R Development Core Team 2009. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
- Usołowicz B., Hajnos M., Sokołowska Z., Józefaciuk G., Bowanko G., Kossowski J. 2004 a. Przestrzenna zmienność fizycznych i chemicznych właściwości gleby w skali pola i gminy. *Acta Agrophysica*, 103 (3): 90.
- Usołowicz B., Hajnos M., Sokołowska Z., Józefaciuk G., Bowanko G., Kossowski J., Usołowicz J. 2004b. Zmienność wybranych cech gleby w skali pola i gminy. *Roczniki Gleboznawcze*, LV (1): 237 — 247.
- Webster R., Burgess T. 1984. Sampling and bulking strategies for estimating soil properties in small regions. *Eur. J. Soil Sci.* 35: 127 — 140.
- Webster R., Oliver M.A. 1992. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *J. Soil Sci.* 43: 77 — 192.