

Praktyczny poradnik

– jak szybko zrozumieć i wykorzystać geostatystykę w pracy badawczej

Practical guide – How to fast understand and use geostatistics in own research work

Alfred Stach

Instytut Geoekologii i Geoinformacji, Uniwersytet im. A. Mickiewicza, frdstach@amu.edu.pl

Abstrakt

Geostatystyka to gałąź statystyki danych przestrzennych zajmująca się analizą i modelowaniem cech ciągłych. Jest ona od blisko trzydziestu lat z powodzeniem stosowana w różnych dziedzinach nauk o Ziemi. Jej matematyczne podstawy związane z teorią funkcji losowych, a obliczenia wykonywane są za pomocą rachunku macierzowego i algebry liniowej. W związku z tym zrozumienie podstaw teoretycznych geostatystyki i zastosowanie jej narzędzi w własnej pracy badawczej stanowi często dużą trudność. Niniejsze opracowanie ma stanowić użyteczny przewodnik dla osób pragnących pogłębić swą wiedzę z zakresu geostatystyki. Zawiera on rekomendacje odnośnie literatury przedmiotu, internetowych źródeł informacji oraz oprogramowania komputerowego.

Słowa kluczowe: poradnik geostatystyki, teoria geostatystyki, zastosowania geostatystyki, Internet, oprogramowanie geostatystyczne

Abstract

Geostatistics is a branch of spatial statistics dealing with analysis and modeling of continuous variables. Geostatistical techniques for last thirty years have been successfully applied to applications in various fields of Earth sciences. Mathematical background of geostatistics is theory of random functions and calculations are performed using matrix and linear algebra. It makes very often quite difficult to understand of theoretical background and use geostatistics for somebody own research work. This study is intended as useful guide for persons willing to deepen it's geostatistical knowledge. It contains authors recommendations on subject literature, sources of useful information in the Web and software.

Keywords: geostatistical guide, theory of geostatistics, applications of geostatistics, World Wide Web information sources, geostatistical software

Wprowadzenie

Geostatystyka to gałąź statystyki danych przestrzennych (Cressie 1993), w której oprócz cech obiektów uwzględnia w analizie ich lokalizację w przestrzeni i/lub w czasie. Specyfiką geostatystyki jest analiza i modelowanie zmiennych (cech) ciągłych, czyli takich, które w każdym punkcie analizowanego obszaru mają określoną (choć zazwyczaj nie znaną) wartość, lub – w przypadku zmiennych jakościowych – określony stan. Fundament teoretyczny stanowi dla niej rachunek prawdopodobieństwa, a konkretnie teoria funkcji losowych (Isaaks, Srivastava 1989, Goovaerts 1997). Wyniki pomiarów traktowane są bowiem jako realizacje procesu losowego o specyficznych właściwościach, odmiennych od klasycznego jego rozumienia. Podstawą statystyki jest niezależność obserwacji – ich całkowita losowość. Metodami geostatystycznymi analizujemy zaś tzw. zmienne „zregionalizowane” (Zawadzki 2005), które lokalnie mogą być traktowane jako losowe, mające określony rozkład prawdopodobieństwa, globalnie zaś charakteryzują się wzajemną korelacją. Przykładami takich zmiennych mogą być pH gleby, stężenie azotanów w wodach jeziora, udział frakcji piaszczystej w warstwie osadów, temperatura powietrza, lecz także typ gleb, kategoria

użytków itp. Można też analizować zmienne (cechy), które w istocie swojej nie są ciągłe, ale po wstępnej „obróbce”, mogą być jako takie traktowane, na przykład: suma opadów atmosferycznych, gęstość zaludnienia, częstość zachorowań na nowotwory itp.

Geostatystyka powstała w pierwszej połowie lat 60-tych ubiegłego stulecia na gruncie geologii poszukiwawczej w odpowiedzi na potrzebę lepszej, bardziej precyzyjnej oceny złóż użytecznych surowców. Jej fundatorem był francuski matematyk G. Matheron (1930 -2000) pracujący przez większość swojej kariery zawodowej na Wyższej Szkole Górniczej w Fontainebleau pod Paryżem (*l'Ecole des Mines de Paris*). Oprócz swojego oryginalnego wkładu Matheron wykorzystał koncepcje innych badaczy tworzone od lat 20-tych XX wieku (Cressie 1990, Webster, Oliver 2007). Ze względu na pochodzenie, geostatystyka przez dziesięciolecia traktowana była jako specyficzna aplikacja statystyki do danych geologicznych. Dopiero w latach 80-tych ubiegłego stulecia zaczęła być coraz częściej wykorzystywana na innych polach, poczynając od kartografii gleb, meteorologii, oceanografii, ekologii, geochemii a na różnych dziedzinach geografii społeczno-ekonomicznej kończąc. Ponieważ z punktu widzenia operacyjnego, geostatystyka to masowe przetwarzanie danych – głównie rachunek macierzowy, jej powszechne zastosowania były uzależnione od dostępności, pamięci i mocy obliczeniowej komputerów, oraz dostępności programów komputerowych zawierających kody algorytmów. Warunki te zostały spełnione na początku lat 90-tych XX wieku. Od tego momentu zaczął się gwałtowny wzrost liczby publikacji, który dopiero w ostatnich latach zaczyna nieco zwalniać (Hengl i in. 2009, Zhou i in. 2007).

Niniejszego opracowanie ma stanowić użyteczny przewodnik dla osób pragnących pogłębić swą wiedzę z zakresu geostatystyki. Zawiera on rekomendacje autora odnośnie literatury przedmiotu, internetowych źródeł informacji oraz oprogramowania komputerowego. Studiowanie tej dziedziny nie jest bowiem proste, nawet dla osób mających solidne przygotowanie matematyczne, a cóż dopiero dla adeptów nauk o Ziemi. Zamieszczone w przewodniku porady powinny nieco to zadanie ułatwić, a przynajmniej dać możliwość zaoszczędzenia czasu i funduszy przeznaczonych na badania.

Literatura

Różnego typu publikacji prezentujących podstawy teoretyczne geostatystyki i jej aplikacje w różnych dziedzinach jest już bardzo wiele. Są to zarówno liczące kilkaset stron podręczniki, jak i artykuły przeglądowe. Oprócz „samodzielnych” publikacji istnieją rozdziały poświęcone geostatystyce w pracach z zakresu GIS, statystyki przestrzennej, geologii, gleboznawstwa i innych. Jest też kilka poważnych opracowań dostępnych bezpłatnie w Internecie. Po długim okresie posuchy pojawiło się także kilka prac z omówieniem teorii w języku polskim. Osoba pragnąca poznać lepiej geostatystykę może się ze względu na owo „bogactwo” źródeł poczuć nieco zdezorientowana. Ponieważ są wśród nich prace lepsze i gorsze, łatwiejsze i trudniejsze, celowym byłoby podanie kilku rad jak samodzielnie studiować.

Najlepiej zacząć od artykułu przeglądowego, dającego zwięzłe i przystępne omówienie całej problematyki. Do takich zaliczają się na przykład publikacje Goovaerts (1998 i 1999). Jakkolwiek ich tytuły sugerują, że ograniczają się one do zagadnień gleboznawczych, to dają jednak szeroką i zwięzłą panoramę uniwersalnych zastosowań geostatystyki, a dane glebowe służą jedynie jako ilustracja omawianych problemów. Autorami innych prac tego typu są Deutsch (2002) i Gómez-Hernández (2005). Bardziej ograniczony zakres ze względu na konkretne zastosowania mają na przykład publikacje: Lloyd, Atkinson (2004), Oliver i in. 1989a i b, Petitgas 2001, Thayer i in. 2003, oraz Yates i Warrick 2002.

Jeśliby głównym kryterium oceny byłyby przystępność i jasność wywodu to wśród podręczników niekwestionowanym liderem jest praca autorstwa Isaaksa i Srivasatavy (1989). Mimo 20 lat mijających od jej wydania nie straciła nic na aktualności, w szczególności w zakresie podstaw. W najnowszym opracowaniu scjentometrycznym autorstwa Hengla i in. (2009) książka ta jest drugim miejscem najczęściej cytowanych podręczników geostatystyki. Świetnym połączeniem dokładności i szczegółowości w omawianiu podstaw teoretycznych z przejrzystością i względną przystępnością stanowi książka Goovaerts (1997), znajdująca się na czwartym miejscu w wyżej wymienionym zestawieniu. Trudniejsze, bo napisane bardziej hermetycznym, matematycznym językiem, są podręczniki Creesiego (1993, 1 miejsce), Chilèsa i Delfinera (1989, 7) i Wackernagla (2003, 12). Na wyróżnienie zasługuje też podręcznik Webstera i Oliver (2007, 8) ze względu na omówienie wielu zagadnień pomijanych w innych podręcznikach, a ważnych dla specjalistów nauk o Ziemi, a także zamieszczenie bardzo zwięzłego i praktyczny poradnika. Ta sama grupa osób będzie również zainteresowana analizą i modelowaniem specyficznych danych przestrzennych, często spotykanych w różnych gałęziach nauk geograficznych i geologicznych. Są to tak zwane dane kompozytowe, gdzie wartości kilku cech (zmiennych) sumują się dla każdej próbki (lokalizacji pomiarowej) do stałej wartości (najczęściej do 100%). Przykładem mogą być dane składu petrograficznego skał lub składu chemicznego wody. Tego typu dane są zazwyczaj mocno wewnątrznie skorelowane, co zniekształca wyniki analizy przestrzennej. Poza tym uzyskane estymacje (symulacje) też powinny się sumować do stałej. Kilka lat temu pojawił się podręcznik poświęcony geostatystycznej analizie wyłącznie tego typu danych (Pawłowsky-Glahn, Olea 2004). Bardziej techniczny, instruktażowy charakter mają książki Deutscha i Journela (1998, 3 miejsce) Remy'ego i in. (2009, jeszcze nieobecna w zestawieniu). Są to bowiem opisy pakietów oprogramowania geostatystycznego zawierające jednak również wykład podstaw teoretycznych. Do kategorii tej należy również do pewnego stopnia instrukcja obsługi modułu Geostatistical Analyst stanowiącego opcjonalny element oprogramowania ArcGIS (Johnston i in. 2001).

Osobny, bardzo ważny i liczny zbiór stanowią publikacje omawiające teorię i zastosowania, poszczególnych procedur i algorytmów geostatystycznych. Nie są one zbyt użyteczne dla nowicjusza, oprócz takich, które mają z góry charakter przeglądowy (Atkinson, Tate 2000, Vann i in. 2002) lub dydaktyczny (Gringarten, Deutsch 2001, Olea 2006). Prace takie pojawiają się w wielu czasopismach naukowych z różnych dziedzin. Najważniejsze z nich jednak to *Mathematical Geosciences* (do 2008 roku *Mathematical Geology*), *Computers & Geosciences*, *Geoderma*, *Journal of Hydrology*, *Water Resources Research*, *Environmetrics*, *Soil Science Society of America Journal*, *International Journal of Remote Sensing*, *Journal of Geophysical Research*.

W języku polskim pojawiło się na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku kilka opracowań przedstawiających w dużym skrócie główne założenie geostatystyki. Dzisiaj jednak te publikacje są już mało użyteczne. Na szczęście w ostatnich latach sytuacja zaczęła się poprawiać. Stało się to za sprawą podręcznika napisanego przez Namysłowską-Wilczyńską (2006) oraz dwóch rozpraw habilitacyjnych: Zawadzkiego (2005) i Stacha (2009). Szczególnie druga z wymienionych wyżej publikacji jest godna uwagi ze względu na bardzo zwięzły, rzeczowy i stosunkowo klarowny wykład podstaw teoretycznych.

Internet

Globalna sieć komputerowa to prawdziwa kopalnia informacji. Każdy jej przegląd pod kątem określonego tematu jest zawsze niekompletny i już w momencie jego tworzenia także nieaktualny. Wszystkie podane dalej adresy internetowe zostały sprawdzone w dniach 1 i 2 czerwca 2009.

1. Punktem wyjścia dla każdego poszukiwacza wiedzy z zakresu geostatystyki powinien być adres www.ai-geostats.org czyli „A Web Resource for Geostatistics and Spatial Statistics”. Prowadzone są w nim między innymi następujące działy: FAQ (*Frequently Asked Questions*), Dane (*Data*), Oprogramowanie (*Software*), Artykuły (*Papers*), Książki (*Books*), Konferencje (*Conferences*), Kursy (*Courses*), Ludzie (*People*), Praca (*Jobs*), Łącza (*Links*), Wydarzenia (*Events*). Przy serwerze działa także lista dyskusyjna ai-geostats, gdzie nowicjusz może zapytać fachowców o tajniki geostatystyki. Twórcą serwisu, istniejącego już ponad 10 lat, jest Grégoire Dubois, pracownik EU JOINT RESEARCH CENTRE – wspólnej instytucji naukowej państw Unii Europejskiej.
2. Centrum Geostatystyki na Paryskiej Szkole Górniczej (*Centre de Geostatistique de l'Ecole des Mines de Paris*): <http://cg.ensmp.fr/>. Tutaj narodziła się, przy wydatnym udziale Georges Matheron'a (1930-2000), nowa nauka. Pod powyższym adresem udostępnione są w postaci elektronicznej dziesiątki klasycznych prac z zakresu podstaw teoretycznych i zastosowań geostatystyki poczynając od lat 50-tych XX wieku. Wynika z nich, że termin „Geostatystyka” został wprowadzony około roku 1956, a „Kriging” – 1960.
3. Centrum Szacowania Złóż na Uniwersytecie Stanforda (*Stanford Center for Reservoir Forecasting*): <http://pangea.stanford.edu/ERE/research/scrf/>. Jest to bardzo dynamiczna grupa badawcza kierowana przez André Journela, ucznia Matherona. W ścisłym związku z zapotrzebowaniem praktyki gospodarczej, głównie przemysłu wydobywczego, rozwijane są tam od blisko trzydziestu lat nowe techniki, a nawet działy geostatystyki. Byli i aktualni pracownicy SCRF są autorami bardzo popularnego oprogramowania: bibliotek procedur geostatystycznych GsLib, GUTLIB, GsTL oraz programu SGeMS.
4. Portal internetowy firmy Staios LLC: <http://www.staios.com/Staios/index.html>. Głównym produktem tej firmy jest WinGsLib – graficzna nakładka (interfejs) ułatwiający korzystanie z biblioteki GsLib. Jest tam także bezpłatnie udostępniana skompilowana, napisana w Fortranie 90, najnowsza wersja biblioteki oraz sporo materiałów szkoleniowych.
5. Przewodnik analizy geostatystycznej (*Geostatistical Analysis Tutor*): <http://www.uncert.com/tutor/>. Strona prowadzona jest przez byłego doktoranta Zakładu Geologii i Inżynierii Geologicznej Szkoły Górniczej w Golden w stanie Kolorado. Jest to bardzo użyteczny dla nowicjuszy (znających język angielski) przewodnik podstaw geostatystyki dotyczący głównie modelowania struktury przestrzennej.
6. Firma Geovariances (<http://www.geovariances.com/>) znajdująca się Avon Cedex we Francji. Jest ona wraz Ecole Des Mines de Paris producentem najbardziej znanego komercyjnego programu geostatystycznego – Isatis. Pod adresem tym jest także dostępne wiele opracowań ilustrujących różnorodne zastosowania geostatystyki.
7. Międzynarodowa Asocjacja Geologii Matematycznej (*International Association of Mathematical Geology*): <http://iamg.org/index.php>. IAMG to wydawca trzech bardzo ważnych czasopism publikujących prace z zakresu teorii i zastosowań geostatystyki: *Mathematical Geosciences* (do roku 2008 *Mathematical Geology*), *Computers & Geosciences* i *Natural Resources Research*. Oprócz innych wartościowych zasobów pod adresem tym dostępne są kody programów komputerowych opisywanych w C&G.

8. Australijskie Centrum Precyzyjnego Rolnictwa (*Australian Centre for Precision Agriculture*): <http://www.usyd.edu.au/agric/acpa/pag.htm>. Grupa badawcza związana z Uniwersytetem w Sydney, a kierowana przez Alexa McBratneya, zajmująca się problematyką kartowania gleb i analizy przestrzennej ich właściwości oraz plonów do celów precyzyjnego rolnictwa. Jej członkowie są autorami wielu bardzo użytecznych programów komputerowych, z których najbardziej znany jest VESPER. Jest jedyny aktualnie dostępny publicznie program realizujący automatycznie lokalne estymacje (w ruchomym oknie). ACPA na swojej stronie udostępnia też szereg ważnych, a trudno dostępnych publikacji.
9. Strona internetowa Pierra Goovaerts: <http://goovaerts.pierre.googlepages.com>. Jest to jeden z najbardziej produktywnych i najczęściej cytowanych geostatystyków (Hengl i in. 2009, Zhou i in. 2007). Jego prace są również względnie przystępnie napisane, co dla wielu osób jest bardzo ważne. Udostępnia on poprzez swoją witrynę dziesiątki własnych publikacji, prezentacje komputerowe, kody napisanych przez siebie programów oraz zbiory danych wykorzystywane w najbardziej znanych pracach.
10. Podręcznik „*Geospatial Analysis. A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools*” autorstwa Micheala de Smitha, Michaela Goodchilda, Paula Longleya: <http://www.spatialanalysisonline.com>. Jest on dostępny zarówno w postaci drukowanej, pliku PDF, jak i w sieci i zawiera obszernie omówienie metod geostatystycznych. Bogate są również dodatkowe materiały dydaktyczne które można skopiować z tej lokalizacji.
11. Kurs geostatystyki i modelowania przestrzennego przeprowadzony na Duńskim Instytucie Nauk Rolniczych w marcu i kwietniu 2003 roku: <http://genetics.agrsci.dk/statistics/courses/JBS-Geostatistics-2003/>. Bardzo dobrze opracowane i bogate materiały kursu, zarówno wykłady, jak i opisy ćwiczeń są dostępne w sieci.
12. Materiały do kursu z geostatystyki prowadzonego przez Edzera Pebesnę na Uniwersytecie w Münster: http://ifgiweb.uni-muenster.de/~epebe_01/Geostatistics/. Ten sam badacz jest twórcą jednego z najbardziej znanych programów komputerowych do analiz geostatystycznych gstat (<http://www.gstat.org/>). Gstat istnieje w wielu mutacjach: jak samodzielny program, moduł do S-Plus i R oraz popularnego pakietu GIS – Idrisi.
13. Materiały do kursu geostatystyki prowadzonego przez D.G. Rossitera z Międzynarodowego Instytutu Nauk Geoinformacyjnych i Obserwacji Ziemi w Enschede w Holandii (*International Institute for Geo-information Science & Earth Observation*): <http://www.itc.nl/~rossiter/teach/lecnotes.html>. Oprócz typowych materiałów dydaktycznych znajdują się pod tym adresem pliki Excela z zawartością ilustrującą działanie najważniejszych algorytmów estymacji i symulacji geostatystycznych.
14. Strona z materiałami do wykładów i ćwiczeń z geostatystyki prowadzonych na specjalności „geoinformacja” na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM przez autora niniejszego opracowania: <http://www.geoinfo.amu.edu.pl/staff/astach/geostat01.htm>. Oprócz prezentacji komputerowych przygotowanych do poszczególnych wykładów i ćwiczeń znajdują się tam przykładowe analizy z danymi źródłowymi, zestaw literatury przedmiotu, publikacje i prezentacje komputerowe po polsku, opisy programów z biblioteki GsLib i szereg innych użytecznych informacji. Niektóre treści ze względu na prawo autorskie chronione są hasłem. O udostępnienie hasła należy się zwrócić pocztą elektroniczną do administratora strony. Materiały znajdujące się pod powyższym adresem najlepiej przeglądać przy użyciu Internet Explorer.

15. Warto też zwrócić uwagę na kilka obszerniejszych publikacji dostępnych bezpłatnie w sieci. Z godnych uwagi można polecić opracowanie przygotowane przez inżynierów z armii USA: <http://140.194.76.129/publications/eng-tech-ltrs/etl1110-1-175/entire.pdf>, które choć już w niektórych fragmentach zdezaktualizowane (rok 1997), to jednak zawiera wiele interesujących materiałów z podstaw geostatystyki. Znacznie nowsza, bo z 2004 roku, jest publikacja przygotowana w Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (United States Environmental Protection Agency): www.epa.gov/airtrends/specialstudies/dsisurfaces.pdf. Zawiera ona praktyczne omówienie różnych metod interpolacyjnych stosowanych do tworzenia map wskaźników jakości środowiska, ze szczególnym uwzględnieniem zwykłego krigingu. Bardzo wartościowa jest również obszerna prezentacja pod tytułem „Wprowadzenie do geostatystyki” (*Introduction to Geostatistics*) autorstwa Hansa Wackernagla i Laurenta Bertino: http://www.nersc.no/~laurentb/Oral/Cours_Bergen05print.pdf. Nie tylko klimatologów mogą zainteresować raporty przygotowane w programie COST-719 (*The use of GIS In climatology and meteorology*): <http://www.knmi.nl/samenw/cost719/>. Należą do nich między innymi: <http://cost719.met.no/papers/inventory%20report.pdf> (Tveito, Schöner 2002), http://cost719.met.no/wg2_final_report_DRAFT260706.pdf (Tveito i in. 2006) i http://www.knmi.nl/samenw/cost719/documents/ECSN_GIS2.pdf. Opisy metody geostatystycznych stanowią istotną ich część. Pod auspicjami programu Radioactive Environmental Monitoring (REM) realizowanego w Institute for Environment and Sustainability który wchodzi w skład Joint Research Centre Komisji Europejskiej zorganizowano w 1997 roku Porównanie Metod Interpolacji Przestrzennych (*Spatial Interpolation Comparison 97*). Ponad 1/3 z porównywanych metod stanowiły różne algorytmy geostatystyczne. Podsumowanie wyników znajduje się w obszernej publikacji dostępnej pod adresem: http://www.ai-geostats.org/uploads/media/sic97_03.zip.

Oprogramowanie komputerowe.

Algorytmy geostatystyczne są jedynym, ważnym lub ubocznym składnikiem wielu kategorii oprogramowania komputerowego. Poniżej umieszczono ich zestawienie z przykładami najbardziej popularnych programów. Na koniec przedstawiono, na podstawie własnych doświadczeń, kilka rekomendacji dla różnych poziomów zaawansowania opracowań geostatystycznych:

1. **Specjalistyczne programy komercyjnie:** ISATIS v. 9.01 firmy Geovariances (www.geovariances.com), GS+ v. 9.0 firmy Gamma Design Software (www.gammadesign.com)
2. **Procedury w specjalistycznym oprogramowaniu dla geologów** (ocena zasobów złóż kopalin – głównie węglowodorów oraz hydrogeologia): RML-HereSIM firmy Beicip Inc. (www.beicip-inc.com), GoCAD v 2.5.2 firmy Paradigm (www.pdgm.com), GMS v. 6.5 firmy Aquaveo (www.aquaveo.com), RockWorks14 firmy RockWare (www.rockware.com)
3. **Wbudowane procedury lub dodatkowe moduły w komercyjnych pakietach GIS i służących do analiz i wizualizacji danych przestrzennych:** Idrisi Taiga (www.clarklabs.org), ArcGIS v. 9.3 z modułem Geostatistical Analyst firmy ESRI (www.esri.com), MapInfo v. 9.5 firmy PitneyBowes Business Insight z modułem Vertical Mapper (www.mapinfo.com), Surfer v. 9 firmy Golden Software (<http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml>)
4. **Wbudowane procedury lub dodatkowe moduły w pakietach GIS typu open source:** SAGA (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>,

- <http://sourceforge.net/projects/saga-gis>), SPRING (<http://www.dpi.inpe.br/spring/english/index.html>), ILWIS (http://52north.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=16&Itemid=61), gvSIG (<http://www.gvsig.gva.es/>)
5. **Wbudowane procedury lub dodatkowe moduły w komercyjnych pakietach statystycznych** (matematycznych): GenStat firmy VSN International (<http://www.vsnl.co.uk/software/genstat/>), S-Plus firmy TIBCO Software Inc. (<http://www.splus.com/>), MatLab firmy MathWorks (<http://www.mathworks.com/products/matlab/>)
 6. **Geostatystyka w CRAN R** (<http://www.r-project.org/>) – **oprogramowanie statystyczne typu *open source***: gstat (<http://r.meteo.uni.wroc.pl/web/packages/gstat/index.html>), geoR/geoRglm (<http://r.meteo.uni.wroc.pl/web/packages/geoR/index.html>, <http://r.meteo.uni.wroc.pl/web/packages/geoRglm/index.html>) i inne (patrz <http://r.meteo.uni.wroc.pl/web/views/Spatial.html>)
 7. **Publicznie dostępne oprogramowanie z chronionym kodem źródłowym**: Vesper (<http://www.usyd.edu.au/agric/acpa/vesper/vesper.html>), VarioWin (<http://www-sst.unil.ch/research/variowin/index.html>)
 8. **Publicznie dostępne oprogramowanie typu open source**: GsLib (<http://pangea.stanford.edu/ERE/research/scrf/software/>, www.statios.com), GUTLIB (<http://pangea.stanford.edu/ERE/research/scrf/software/>), S-GeMS (<http://sgems.sourceforge.net/>), gstat (<http://www.gstat.org/>), UNCERT (<http://www.uncert.com/>)
 9. **Publikowane w Computers & Geosciences kody źródłowe algorytmów** (<http://www.iamg.org/index.php/publisher/articleview/fmArticleID/112/>)
 10. **Oprogramowanie dydaktyczne**: E(Z)-Kriging (<http://www.ai-geostats.org/index.php?id=114>)

Oczywiście zamieszczone powyżej zestawienie nie jest z pewnością wyczerpujące. Istotne i ciągle aktualizowane informacje o dostępnym oprogramowaniu są umieszczane na głównej witrynie społeczności „geostatystyków” – (<http://www.ai-geostats.org/index.php?id=107>). Tam też znajdują się zwięzłe poradniki dla początkujących, dotyczące wyboru oprogramowania (http://www.ai-geostats.org/fileadmin/Documents/FAQ/FAQ_Geostatistics_Software_01.pdf) oraz wyjaśniające różnice w terminologii stosowanej w różnych programach (http://www.ai-geostats.org/fileadmin/Documents/FAQ/FAQ_Software_Conventions_01.pdf).

Rekomendacje autora niniejszego opracowania zostały zaadresowane do konkretnych grup użytkowników.

1. Osoby, które chcą przede wszystkim wykonać szybko dobre (lecz niekoniecznie najlepsze możliwe) obrazy zmienności przestrzennej analizowanych parametrów, bez wnikania w niuanse metodyki i czasochłonnego rozwiązywania problemów typu „jak to działa?” i „jak to zrobić?”, oraz posiadające odpowiednie zasoby finansowe. W tym przypadku optymalnym wyborem ze względu na stosunek ceny do możliwości jest Surfer firmy Golden Software. Inne programy należące do tej kategorii to GS+ firmy Gamma Design Software i ArcGIS z modułem Geostatistical Analyst firmy ESRI.
2. Druga kategoria jest podobna do pierwszej, a różnica dotyczy chwilowego braku finansów. Osiągnięcie zamierzonego celu jest jak najbardziej możliwe, ale wymaga niestety większego nakładu pracy i czasu. Paleta możliwości jest tu bardzo szeroka, a

konkretny wybór zależy przede wszystkim od jakości i kompletności dokumentacji oraz możliwości wizualizacji uzyskanych wyników. Na pierwszym miejscu należałoby umieścić darmowe programy GIS takie jak SAGA i ILWIS. Na drugim stopniu podium znalazłby się „autonomiczny” GSTAT, oraz jego wariant pracujący w środowisku R (Bivand i in. 2008). W dalszej kolejności można by rozważyć użycie modułów geoR/geoRglm oraz programu VESPER.

3. Do trzeciej kategorii zaliczyć można osoby, które pragną wykonywać wyrafinowane analizy (dane 3W, geostatystyka wielozmienna, nieliniowa, symulacje itp.), ale również dysponują raczej ograniczonymi zasobami. Należałoby im polecić SGeMS i GsLIB/GUTLIB oraz publikowane w Computers & Geosciences kody poszczególnych algorytmów. Użytecznym uzupełnieniem wyżej wymienionych programów jest VarioWin. Wszystkie wymienione wyżej pozycje są dostępne bezpłatnie w Internecie. Aby jednak w pełni móc wykorzystać ich możliwości należy kupić lub wypożyczyć książki z instrukcjami (GsLIB, SGeMS i Variowin: Deutsch, Journal 1998, Remy i in. 2009, Pannatier 1996) i artykuły z opisami (Computers & Geosciences). W sieci można jednakże również znaleźć tworzone przez użytkowników tych programów różnego rodzaju poradniki. Istotnym utrudnieniem może być również konieczność samodzielnej kompilacji kodów opisywanych w Computers & Geosciences oraz fakt, że programy te (także GsLIB i GUTLIB) pracują najczęściej w trybie wsadowym – bez graficznego interfejsu. Z drugiej jednak strony ma to także wiele plusów: możliwość dostosowywania algorytmów do specyficznych potrzeb (modyfikacja kodów źródłowych) oraz niezależność od sprzętu i systemu operacyjnego.
4. Osoby, które nie martwią się o finanse i chcą mieć całą geostatystykę „pod ręką” powinny rozważyć zakup programu ISATIS. Oprócz wysokiej ceny ma on same zalety: najszerszy zestaw procedur geostatystycznych, bardzo dobrą wizualizację danych i wyników analiz, wiele dodatkowych narzędzi statystycznych, duże możliwości importu i eksportu danych także w formatach GIS, wersje dla Windows i różnych wariantów UNIX-a.

Literatura:

- Atkinson, P.M., Tate, N.J., 2000: Spatial scale problems and geostatistical solutions: A review. *Professional Geographer*, 52(4): 607–623.
- Bivand, R.S., Pebesma, E.J., Gómez-Rubio, V., 2008: Applied spatial data analysis with R. Springer Science+ Business Media, LLC, New York, 1-374.
- Chilès, J.-P., Delfiner, P., 1999: Geostatistics. Modeling spatial uncertainty. John Wiley and Sons, New York, 1-695.
- Cressie, N., 1990: The origins of kriging. *Mathematical Geology*, vol. 22, no. 3, 239-252.
- Cressie, N.A.C., 1993: Statistics for spatial data. Revised edition. John Wiley and Sons, New York, 1-900.
- Deutsch, C.V., 2002: Geostatistics. [w:] *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, Volume 6. Academic Press, 697-707.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G., 1998: GSLIB: Geostatistical software library and user's guide. Wydanie 2, Oxford University Press, New York, 1-369.
- Gómez-Hernández, J.J., 2005: Geostatistics. [w:] *Hydrogeophysics*, Y. Rubin i S. S. Hubbard (red.), Springer-Verlag, [Heidelberg](#), 59-83.

- Goovaerts, P., 1997: Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, New York, 1-483.
- Goovaerts, P., 1998: Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 27, 315-334.
- Goovaerts, P., 1999: Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, vol. 89, no. 1, 1-45.
- Gringarten E., Deutsch, C.V., 2001: Variogram interpretation and modeling. *Mathematical Geology*, vol. 33, no. 1, 507-534.
- Hengl, T., Minasny, B., Gould, M., 2009 (w druku): A geostatistical analysis of geostatistics. *Scientometrics*, DOI: 10.1007/s11192-008-2088-6.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989: Applied geostatistics. An Introduction. Oxford University Press, New York, 1-551.
- Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., Lucas, N., 2001: Using ArcGIS™ Geostatistical Analyst. ESRI, Redlands, CA, USA, 1-306.
- Lloyd, C.D., Atkinson, P.M., 2004: Archaeology and geostatistics. *Journal of Archaeological Science*, 31: 151–165.
- Namysłowska-Wilczyńska, B., 2006: Geostatystyka. Teoria i zastosowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1-356.
- Olea, R.A., 2006: A six-step practical approach to semivariogram modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 20: 307-318.
- Oliver, M.A., Webster, R., Gerrard, A.J., 1989a: Geostatistics in physical geography. Part I. Theory. *Transactions of the Institute of British Geographers*, NS 14: 259-269.
- Oliver, M.A., Webster, R., Gerrard, A.J., 1989b: Geostatistics in physical geography. Part II. Applications. *Transactions of the Institute of British Geographers*, NS 14: 270-286.
- Pannatier, Y., 1996: VARIOWIN: software for spatial data analysis in 2D. Springer, New York, 1-91.
- Pawlowsky-Glahn, V., Olea, R.A., 2004: Geostatistical analysis of compositional data. *International Association for Mathematical Geology, Studies in Mathematical Geology 7*, Oxford University Press, New York, 1-181.
- Petitgas, P., 2001: Geostatistics in fisheries survey design and stock assessment: models, variances and applications. *Fish and Fisheries*, 2: 231–249.
- Remy, N., Boucher, A., Wu, J., 2009: Applied geostatistics with SGeMS. A user's guide. Cambridge University Press, Cambridge, 1-264.
- Stach, A., 2009: Analiza struktury przestrzennej i czasoprzestrzennej maksymalnych opadów dobowych w Polsce w latach 1956-1980. Wydawnictwo Naukowe UAM, Seria Geografia nr 85: 1-323.
- Thayer, W.C., Griffith, D.A., Goodrum, P.E., Diamond, G.L., Hassett, J.M., 2003: Application of geostatistics to risk assessment. *Risk Analysis*: 23(5): 945–960.
- Tveito, O.E., i zespół 2006: Spatialisation of climatological and meteorological information by the support of GIS. COST 719 Final Report, WG2 Spatialisation, Chapter II, Draft Version, Oslo, 26.07.2006, 1-142.
(http://cost719.met.no/wg2_final_report_DRAFT260706.pdf)
- Tveito, O.E., Schöner, W., 2002: Applications of spatial interpolation of climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS). Norwegian Meteorological Institute, Oslo, met.no, Klima, 28/02, 1-43.

- Van Groeningen, J.W., Siderius, W., Stein, A., 1999: Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. *Geoderma*, 87: 239-259.
- Vann, J., Bertoli, O., Jackson S., 2002: An overview of geostatistical simulation for quantifying risk. Paper originally published at a Geostatistical Association of Australasia symposium "Quantifying Risk and Error" March 2002, 1-12.
- Wackernagel, H., 2003: *Multivariate geostatistics. An introduction with applications.* Third, completely revised edition. Springer-Verlag, Heidelberg, 1-387.
- Webster, R, Oliver, M.A., 2007: *Geostatistics for environmental scientists.* Second Edition. J. Wiley and Sons, Chichester, 1-315.
- Yao, T., Journel, A.G., 1998: Automatic modeling of (cross) correlogram tables using fast Fourier transform. *Mathematical Geology*, 30 (6): 589-615.
- Yates, S.R., Warrick, A.W., 2002: *Geostatistics. [w:] Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods*, J.C. Dane, G. Clarke Topp (red), SSSA Book Series Number 5, Soil Science of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 81-118.
- Zawadzki, J., 2005: Wykorzystanie metod geostatystycznych w badaniach środowiska przyrodniczego (sum.: Using geostatistical methods for environmental studies). *Politechnika Warszawska, Prace Naukowe, Inżynieria Środowiska z. 49*, 1-134.
- Zhou, F., Guo, H.-C., Ho, Y.-S., Wu, C.-Z., 2007: Scientometric analysis of geostatistics using multivariate methods. *Scientometrics*, 73 (3): 265-279.