

Analiza statystyczna i geostatystyczna zróżnicowania przestrzennego parametrów położenia warstw w NW części Gór Świętokrzyskich

Urszula Dębowska*, Jarosław Zawadzki**



Statistical and geostatistical analysis of the spatial diversity of strata positions in the NW part of Holy Cross Mts, central Poland. *Prz. Geol.*, 53: 306–310.

S u m m a r y. Strata positions of the Paleozoic rocks in the NW part of Holy Cross Mts are analysed statistically and geostatistically. The study area was subdivided into the eastern and western part. Statistical characteristics allowed to exclude outlier values. Variograms were calculated to determine range of influence of strata position parameters analysis allows to describe the spatial diversity of strike and dip strata value.

Key words: strata position, geostatistic, semivariance, spatial correlation, Holy Cross Mts

U. Dębowska J. Zawadzki

Celem artykułu jest przedstawienie zróżnicowania parametrów położenia warstw utworów paleozoiku łysogórskiej części Gór Świętokrzyskich oraz określenie wpływu lokalizacji punktów pomiarowych na otrzymane wyniki analiz.

Badaniami został objęty obszar, którego południowy zasięg terenu wyznacza dyslokacja świętokrzyska, lokalizowana wzdłuż południowych stoków Pasma Głównego, a północny natomiast — granica między utworami paleozoiku i obrzeżenia permo-mezozoicznego w okolicach Kajetanowa, Wzdółu i Bronkowic (ryc. 1, 2). Na wschodzie granicę wyznacza łysogórska strefa dyslokacyjna w okolicach Nowej Słupi i Rudek, a na zachodzie — wychodnie skał paleozoiku w okolicach linii kolejowej Radom–Kielce.

Budowa geologiczna

Badany obszar jest zbudowany ze skał paleozoicznych. Najstarszymi opisywanymi utworami są środkowokambryjskie łupki ilaste i mułowcowe (Orłowski, 1996). Na nich leżą piaskowce kwarcowe i łupki górnego kambru (Orłowski, 1968, 1975; Tomczykowa, 1968) oraz ordowickie wapienie z wkładkami iłowców (Bednarczyk, 1981). Brak utworów górnego tremadoku i arenigu jest tłumaczony ruchami tektonicznymi i erozją obszaru (Tomczyk, 1974). W dalszej części profilu litostratygraficznego rejonu łysogórskiego występują górnoordowickie wapienie margliste. Na nich leżą łupki ilaste i mułowcowe, iłowce i mułowce szarogłazowe syluru (Bednarczyk, 1981; Czarnocki, 1957; Tomczykowa & Tomczyk, 1981). Devon dolny reprezentują piaskowce. W wyższej części profilu występują dolomity i wapienie organodetrytyczne, na których leżą łupki mułowcowo-ilaste z przewarstwieniami wapieni (Szulczewski, 1981, 1995). Najmłodszymi utworami strefy łysogórskiej są łupki ilaste famenu (Stupnicka, 1997).

Łączna miąższość utworów łysogórskiego trzonu paleozoicznego wynosi ok. 5000 m (Filonowicz, 1967; Stupnicka, 1997). Na sfałdowanych w czasie ruchów

waryscyjskich utworach trzonu paleozoicznego leżą skały górnego permu rozpoczynające permo-mezozoiczny cykl sedimentacyjny.

Na obszarze strefy łysogórskiej stwierdzono trzy walne struktury tektoniczne o rozciągłości WNW–ESE (Stupnicka, 1997). Są to od południa: jednostka łysogórska zbudowana ze skał kambru, ordowiku i syluru; synklina bodzentyńska, której jądro tworzą skały dewonu i antyklina bronkowicko-wydrzyszowska utworzona ze skał górnosylurskich i dolnodewońskich.

Omawiany teren jest poprzecinany uskokami poprzecznymi. Ze względu na niejednorodność tektoniczną analizowany obszar podzielono na dwie domeny: wschodnią o powierzchni 211,7 km² i zachodnią — 127,3 km² (ryc. 2). Naturalna granica między nimi przebiega wzdłuż strefy uskoku Świętej Katarzyny (Stupnicka, 1997) zwanej też uskokiem psarskim (Mizerski, 1991). Domenę wschodnią charakteryzuje większa liczba odsłoneń, często układających się liniowo, wzdłuż rzek i grzbietów wzniesień.

Metodyka

W celu zbadania zmienności przestrzennej parametrów położenia warstw wykorzystano zarówno statystykę opisową, jak i metody geostatystyczne. Metody geostatystyczne uwzględniające korelacje przestrzenne badanej zmiennej są naturalnym uzupełnieniem tradycyjnych metod statystycznych w geologii strukturalnej (m. in. Jaroszewski, 1972, Robin & Jowett, 1986). Analizę przeprowadzono dla wartości biegu i upadu warstw uzyskanych ze szczegółowych map geologicznych w skali 1:50 000 arkusze Kielce, Bodzentyn i Słupia Nowa (Filonowicz, 1962, 1963, 1971) i zweryfikowanych w wyniku prac terenowych przeprowadzonych w latach 2002–2004. W celu dokładnej lokalizacji odsłoneń wykorzystano systemy informacji przestrzennych (GIS). Pomiarów dotyczą niewielkich rozmiarów odsłoneń, będących małymi łomikami, wkopami pod fundamenty, słupy wysokiego napięcia, przekopami dróg czy głębszymi fragmentami rowów ciągnących się wzdłuż dróg czy lasów. W przypadku większych odsłoneń przyjęto wartości średnie dla mniejszych części odsłoneń. Punkty pomiarowe zostały dokładnie zlokalizowane na podkładzie topograficznym. W miejscach, gdzie obecnie odsłoneńca są w bardzo złym stanie, przyjęto wartości wskazane na mapach geologicznych. Region łysogórski charakteryzuje się małą ilością i złym

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; U.Debowska@uw.edu.pl

**Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, ul. Nowowiejska 20, 00-661 Warszawa; jarek97@yahoo.com

stanem odsłonięć. Na badanym terenie zlokalizowano łącznie 334 punkty pomiarowe biegu i upadu warstw, z czego w domenie zachodniej 77 pomiarów, a we wschodniej — 257. Liczba pomiarów w utworach poszczególnych okresów geologicznych dla całego obszaru rozkładają się po ok. 30% dla kambru, syluru i dewonu. Brak odsłonięć w utworach ordowiku (ryc. 2). W domenie zachodniej dominują odsłonięcia w utworach kambru (ok. 50%), a we wschodniej — w utworach dewonu (ok. 40%). Oznacza to, że na zachód od dyslokacji Świętej Katarzyny najlepiej odsłonięte są utwory jednostki łysogórskiej, a na wschodzie — skały synkliny bodzentyńskiej. Jednostki te charakteryzują się odmiennym stylem tektonicznym. Na podstawie struktur tektonicznych, a także analizy zdjęć lotniczych i radarowych stwierdzono, że zachodnią część regionu łysogórskiego cechuje większe zaangażowanie tektoniczne (m.in. Mizerski, 1991; Mizerski, 1998; Mastella & Mizerski, 2002).

Statystyka opisowa

Przeciętne położenie warstw w domenie zachodniej odczytane z diagramów konturowych wynosi 115/37 N, a we wschodniej 106/47 N (ryc. 2). W domenie wschodniej występują również nieliczne odsłonięcia w warstwach zapadających na południe. Dominująca wartość biegu i upadu tych warstw to 91/50 S.

Przeciętny bieg warstw w części zachodniej ma wartość o 10° większą niż na wschodzie i wynosi 113°. Jest to efektem ogólnej zmiany kierunku przebiegu struktur z WNW–ESE na NW–SE na zachodzie (Mastella & Mizerski, 2002). Analiza średnich wartości upadu uwidacznia występowanie bardziej stromych warstw na wschodzie (upad na zachodzie 40°, a na wschodzie 50°). Wynika to z niejednorodności stylu tektonicznego jednostek, w których zlokalizowane są pomiary, a także różnej ilości odsłonięć. Ma to odzwierciedlenie również w wielkościach rozstępu wartości biegu i upadu dla poszczególnych domen. W części zachodniej wielkości te wynoszą dla biegu 90° i dla upadu 75°. We wschodniej są to odpowiednio 140° (bieg) i 85° (upad; ryc. 2, 3). Zróżnicowanie parametrów położenia warstw w obydwu domenach przedstawiono na ryc. 2 i 3.

Przygotowując dane do analizy geostatystycznej należało określić zakres wartości nieodstających oddziel-

nie dla biegu i upadu warstw (ryc. 3). Za wartości nieodstające przyjęto 95% liczby pomiarów w poszczególnych zbiorach. Granice przedziałów określono za pomocą wykresów ramka-wąsy, jak to pokazano na ryc. 3, a następnie zaznaczono je na diagramach punktowych położenia warstw (ryc. 3). Zwykle w analizie strukturalnej (np. wykonywanej w programie StereoNet lub TectonicsFP) wartości odstające są odrzucane przez odpowiedni dobór dolnej izarytmy procentowej dla diagramów konturowych.

Systemy informacji przestrzennych (GIS) dają możliwość łatwego zlokalizowania punktów odstających na mapie geologicznej. Potwierdzono, że odstające wartości parametrów położenia warstw mogły być podstawą do wyznaczenia strefy uskokowej na północ od Bodzenty (dolina Świśliny), a także osi fałdów oraz podrzędnych zafałdowań w okolicach Nowej Słupi.

Ze zbiorów poddawanych dalszym analizom wykluczono tylko te położenia warstw, których oba parametry zaliczono do odstających. W części zachodniej odrzucono jeden pomiar, a we wschodniej sześć. Do analizy geostatystycznej wykorzystano 76 pomiarów z domeny zachodniej i 251 ze wschodniej (ryc. 3).

Analiza geostatystyczna

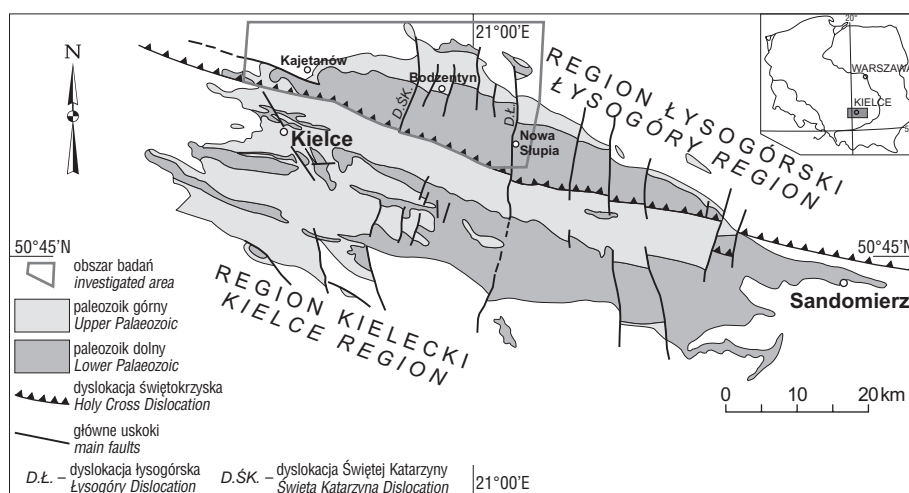
Głównymi problemami, które skłoniły do sięgnięcia po metody geostatystyczne, są przestrzenne zróżnicowanie wartości położenia warstw oraz określenie maksymalnej odległości do jakiej obserwowana jest zależność pomiędzy wielkościami tych parametrów.

Podstawową funkcją w geostatystyce jest semiwariancja $\gamma(h)$. Opisuje ona zależność między średnim zróżnicowaniem wartości parametrów z zmierzonych w danych punktach a odległością h między tymi punktami (Matheron, 1962; Royle, 1975; Isaaks & Srivastava, 1988):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^n (z_{i+h} - z_i)^2 \quad (\text{Matheron, 1962})$$

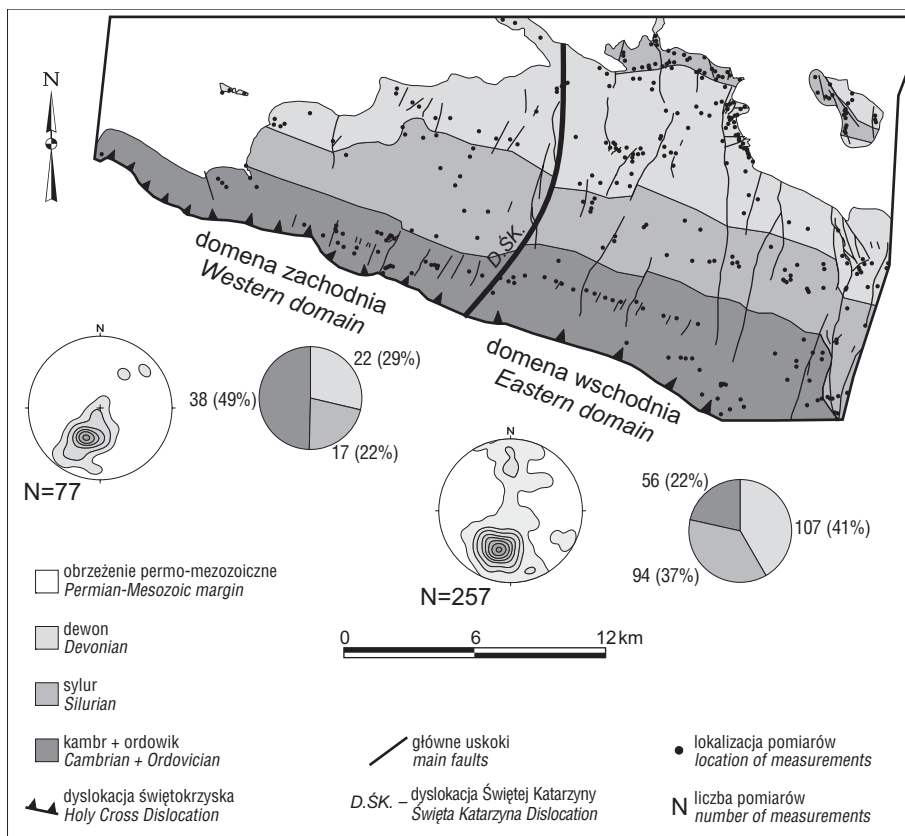
z_i, z_{i+h} — wartości badanych parametrów w punktach odległych o h

N_h — liczba par punktów pomiarowych odległych o h .

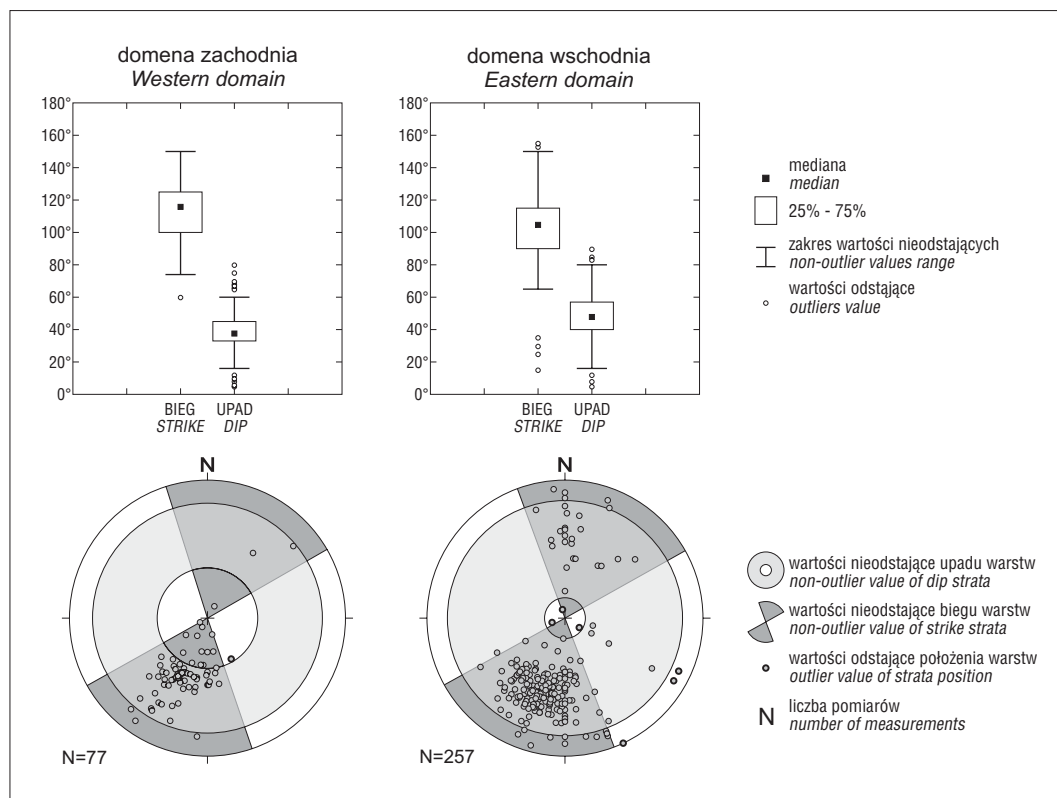


Ryc. 1. Lokalizacja terenu badań na mapie geologicznej Gór Świętokrzyskich (wg Kutek & Głazek, 1972)

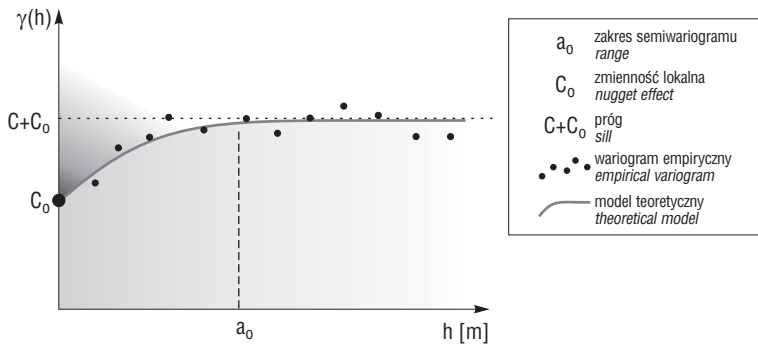
Fig. 1. Location of the study area within the Holy Cross Mts (by Kutek & Głazek, 1972)



Ryc. 2. Położenie warstw na tle szkicu tektonicznego obszaru badań (diagramy konturowe — domena zachodnia: 1,3–3,9–9,1–14,3–19,5 → 26,0%, — domena wschodnia: 0,4–1,6–3,1–6,2–8,9–12,1–15,6 → 18,7%; projekcja na dolną półkulę siatki Schmidta)
Fig. 2. Strata positions on the tectonic background of the study area (contour diagrams — western domain: 1,3–3,9–9,1–14,3–19,5 → 26,0%, — eastern domain: 0,4–1,6–3,1–6,2–8,9–12,1–15,6 → 18,7%; projection of normals on the lower hemisphere of Schmidt grid)



Ryc. 3. Wartości nieodstające; A) wykresy ramka-wąsy; B) diagramy punktowe — projekcja normalnych na dolną półkulę siatki Schmidta
Fig. 3. Non-outlier values; A) box-whiskers plots; B) point diagrams — projection of normals on the lower hemisphere of the Schmidt grid



Ryc. 4. Przykładowy wariogram teoretyczny — model sferyczny (pozostałe objaśnienia w tekście)
Fig. 4. Sample of theoretical variogram — spherical model (see other explanations in the text)

Wykres semiwariacji zwany jest wariogramem (semi-wariogramem, ryc. 4). Dla zbiorów wartości biegu i upadu warstw sporządzono wariogramy empiryczne (ryc. 5) Następnie dopasowano do nich modele teoretyczne (m. in. Mucha, 1994; Zawadzki, 2002a; Gumiaux i in., 2003). Wykorzystano tu model sferyczny, który opisuje postępujący (wraz ze wzrostem dystansu między każdą parą punktów) spadek korelacji przestrzennych aż do osiągnięcia pewnej odległości, po przekroczeniu której wartość korelacji jest równa „zero”.

Na podstawie wariogramów określono zmienność lokalną (tzw. efekt samorodka) jaka występuje między wartościami w punktach położonych w odległości mniejszej niż krok wariogramu (ryc. 4). W części zachodniej zmienność lokalna wartości biegu i upadu jest mniejsza niż w części wschodniej (ryc. 5).

Część wykresu, w której obserwowany jest wzrost wartości semiwariacji, opisuje zasięg oddziaływania (ryc. 4). Symbolem a_0 na wykresach oznaczono odległość, powyżej której obserwowana jest maksymalna zmienność badanego parametru (Zawadzki, 2002b; ryc. 5). Parametr ten wyznacza pewną odległość między punktami pomiarowymi, którą należy uwzględnić przy charakteryzowaniu przestrzennej zmienności badanych parametrów. Korelacja między wartościami biegu w części zachodniej zachodzi do odległości 2,1 km między punktami, a we wschodniej — 1,6 km. W przypadku upadów zasięg korelacji kształtuje się następująco: w części zachodniej — 3,8 km, a we wschodniej 2,3 km.

Poza zakresem oddziaływania nie występują korelacje przestrzenne i najczęściej istnieją duże zmiany w budowie geologicznej. W domenie zachodniej zasięg korelacji między wartościami parametrów położenia warstw jest większy niż we wschodniej. Wiąże się to z mniejszą ilością

odsłoneń na tym obszarze co rzutuje na mniejszą stwierdzoną zmienność parametrów położenia warstw.

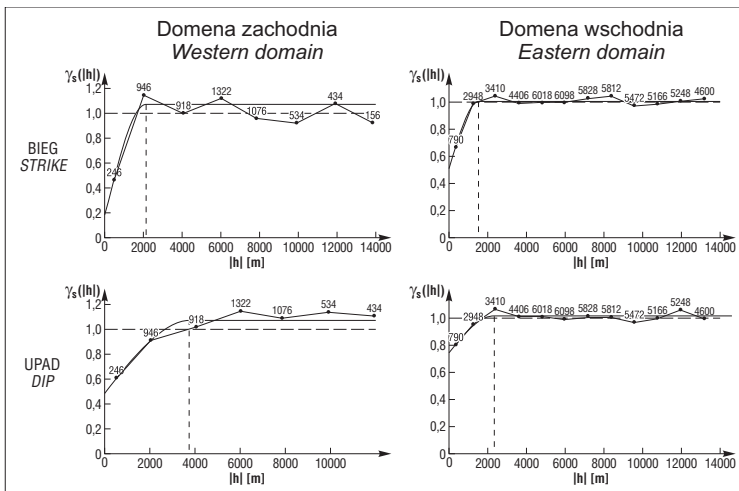
Podsumowanie

Po dokonaniu dokładnej analizy budowy geologicznej wydzielono dwie domeny: zachodnią i wschodnią. Na podstawie diagramów punktowych i konturowych określono przeciętne położenie warstw: 115/37 N na zachodzie i 106/47 N na wschodzie. Dzięki statystykom opisowym dokładnie scharakteryzowano parametry położenia warstw i wyznaczono zakresy wartości nieodstających. Z dalszych obliczeń wykluczono łącznie 7 pomiarów odstających.

Parametry położenia warstw są zmiennymi zregionalizowanymi, tzn. związanymi z rozmieszczeniem przestrzennym. Dla zbadania ich ciągłości przestrzennej wykonano analizy geostatystyczne, na podstawie których określono zasięgi oddziaływania zmiennych. W tym celu wykonano izotropowe standaryzowane wariogramy wartości biegów i upadów warstw.

Lepsze rozpoznanie budowy geologicznej domeny wschodniej i większe zróżnicowanie parametrów położenia warstw przejawia się mniejszymi niż na zachodzie zasięgami oddziaływania. Dla biegu wartości te są mniejsze o ok. 25%, a dla upadu o 40%. Ponadto obserwowany w obrębie domen mniejszy zasięg korelacji przestrzennych dla wartości biegu niż dla wartości upadu jest skutkiem większej zmienności pierwszego z wymienionych parametrów.

Analiza geostatystyczna umożliwiła dokładniejszą charakterystykę wartości biegu i upadu warstw niż wynikałoby to tylko z klasycznej analizy statystycznej. Obszar badań charakteryzuje się stosunkowo niewielką liczbą odsłoneń, co wpływa na nieregularność rozmieszczenia



Ryc. 5. Standaryzowane wariogramy empiryczne wartości biegu i upadu warstw (objaśnienia w tekście i na ryc. 4)

Fig. 5. Standardized empirical variograms of strike and dip strata values (see explanations in the text and fig. 4)

punktów pomiarowych. Skutkiem tego jest duży udział par punktów pomiarowych występujących poza zasięgiem oddziaływania. Wyniki analiz geostatystycznych mogą więc być pomocne w planowaniu prac terenowych w celu jak najdokładniejszego rozpoznania budowy geologicznej terenu badań, a co za tym idzie zminimalizowania możliwości popełnienia błędów podczas interpretacji geologicznych.

Literatura

- BEDNARCZYK W. 1981 — Stratygrafia ordowiku Gór Świętokrzyskich. Przew. 53 Zjazdu Pol. Tow. Geol., Kielce: 35–41.
- CZARNOCKI J. 1957 — Tektonika Gór Świętokrzyskich. Pr. Inst. Geol., 18: 16–20.
- FILONOWICZ P. 1962 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Bodzentyn (M34–42B).
- FILONOWICZ P. 1963 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Słupia Nowa (M34–43A).
- FILONOWICZ P. 1971 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Kielce (815).
- GUMIAUX C., GAPAIS D. & BRUN J.P. 2003 — Geostatistics applied to best-fit interpolation of orientation data. *Tectonophysics*, 376: 241–259.
- KUTEK J. & GLAZEK J. 1972 — The Holy Cross area, Central Poland, in the Alpine cycle. *Acta Geol. Pol.*, 22: 603–653.
- ISAAKS E.H. & SRIVASTAVA R.M. 1988 — Spatial continuity measures for probabilistic and deterministic geostatistics. *Mathematical Geology*, 20: 26–40.
- MASTELLA L. & MIZERSKI W. 2002 — Budowa geologiczna jednostki łysogórskiej (Góry Świętokrzyskie) na podstawie analizy zdjęć radarowych. *Prz. Geol.*, 50: 767–772.
- MATHERON G. 1962 — *Traité de géostatistique appliquée*. Editions Technip., t. 1 Paris.
- MIZERSKI W. 1991 — Ewolucja tektoniczna regionu łysogórskiego Gór Świętokrzyskich. *Rozprawy UW*, 362: 1–141.
- MIZERSKI W. 1998 — Podstawowe problemy tektoniki i tektogenezy utworów paleozoicznych Gór Świętokrzyskich. *Prz. Geol.*, 46: 337–342.
- MUCHA J. 1994 — Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Katedra Geologii Kopalnianej AGH, Kraków.
- ORŁOWSKI S. 1968 — The Cambrian stratigraphy in the Holy Cross Mts. XXIII Cong. Geol. Int., Praha: 127–131.
- ORŁOWSKI S. 1975 — Jednostki litostratygraficzne kambru i górnego prekambru w Górach Świętokrzyskich. *Acta Geol. Pol.*, 25: 431–448.
- ORŁOWSKI S. 1996 — Kambry — dokonania i problemy. *Prz. Geol.*, 4: 358–363.
- ROBIN P. Y. F. & JOWETT E. C. 1986 — Computerized density contouring and statistical evaluation of orientation data using counting circles and continuous weighting functions. *Tectonophysics*, 121: 207–233.
- ROYLE A.G. 1975 — A practical Introduction to Geostatistics, Mining Sciences Department, University of Leeds, Leeds.
- STUPNICKA E. 1997 — Strefa łysogórska. [W:] *Geologia regionalna Polski*. Wyd. Geol.: 147–153.
- SZULCZEWSKI M. 1981 — Devon środkowy i górny zachodniej części Gór Świętokrzyskich. Przew. 53 Zjazdu Pol. Tow. Geol., Kielce: 68–82.
- SZULCZEWSKI M. 1995 — Depositional evolution of the Holy Cross Mts. (Poland) in the Devonian and Carboniferous — a review. *Kwart. Geol.*, 39: 471–488.
- TOMCZYK H. 1974 — Góry Świętokrzyskie. [W:] *Budowa geologiczna Polski*. T. 4, cz. 1. Wyd. Geol.
- TOMCZYKOWA E. 1968 — Stratygrafia osadów najwyższego kambru w Górach Świętokrzyskich. Pr. Inst. Geol., 54: 64–70.
- TOMCZYKOWA E. & TOMCZYK H. 1981 — Rozwój badań syluru i najniższego dewonu w Górach Świętokrzyskich. Przew. 53 Zjazdu Pol. Tow. Geol., Kielce: 42–57.
- ZAWADZKI J. 2002a — Zastosowanie metod geostatystycznych do analizy danych przestrzennych. *Wiadomości Statystyczne Głównego Urzędu Statystycznego*, 12: 23–36.
- ZAWADZKI J. 2002b — Badania korelacji przestrzennych zawartości wybranych pierwiastków śladowych w glebach Warszawy i okolic. *Ochrona Środowiska*, 4: 17–26. Wrocław.