

METODY BADANIA STRUKTURY (ZMIENNOŚCI) OBRAZÓW GEOLOGICZNYCH

UKD 624.131.2/.7.002:624.137(438-35 kop. Bełchatów)

Obrazem geologicznym nazywa się tu mapę, przekrój, zdjęcie itp. przedstawiające na płaszczyźnie, w granicach objętych obrazem, wielkość, kształt i sposób rozmieszczenia zazwyczaj typów litologicznych skał (gruntów). Obrazem geologicznym mogą być również mapy, przekroje itp., ilustrujące np. zróżnicowanie barwy, konsystencji, zawartości składnika użytecznego itp. Niekiedy jest potrzebna ocena struktury (zmienności) takich obrazów geologicznych. Tak było w badaniach geologiczno-inżynierskich skarp odkrywki węgla brunatnego „Bełchatów” i skarp zwałowiska zewnętrznego tej kopalni. W tym drugim wypadku chodziło o ocenę i rozpoznanie makrostruktury zwałowiska lub części zwałowiska, przez którą rozumiano:

- wielkość partii zwałowiska, zbudowanych z jednakowego typu gruntu lub jednakowej mieszaniny gruntów,
- udział procentowy danego typu gruntu lub mieszaniny gruntów w określonej partii zwałowiska,
- charakter zróżnicowania (uporządkowania) w występowaniu typów gruntu (mieszanie gruntów) lub sposobu rozmieszczenia wystąpień gruntów w zwałowisku lub jego części.

Makrostrukturę zwałowiska analizowano na podstawie sporządzonych, w wyniku kartowania map, profilów skarp zwałowiska kopalni „Bełchatów”. Analiza makrostruktury zwałowiska ma ważne znaczenie praktyczne z punktu widzenia oceny własności fizyczno-mechanicznych masywu gruntowego i stateczności skarp zwałowiska. Charakter makrostruktury zwałowiska wpływa również na kierunki krążenia i przepływu wód infiltracyjnych w zwałowisku oraz przebieg osiadania większych partii zwałowiska.

W literaturze naukowej brakuje przykładów ilościowej (wskaźnikowej) oceny charakteru obrazów geologicznych (makrostruktury masywu gruntowego), jak również oceny podobieństwa lub różnic różnych partii tego masywu, co dawałoby lepsze podstawy do jego rejonizacji. Przedstawione zagadnienie może odnosić się nie tylko do problematyki geologiczno-inżynierskiej. Ilościowa (wskaźnikowa) analiza struktury obrazów geologicznych może być stosowana i do innych zagadnień, jak np. klasyfikacji wyrażających stopień skomplikowania budowy geologicznej, zagadnień związanych z rejonizacją geologiczną (geologiczno-inżynierską), oceny charakteru mineralizacji złoża itp.

METODYKA OPISU ZMIENNOŚCI OBRAZU GEOLOGICZNEGO

Obraz geologiczny w postaci mapy, przekroju itp. – stworzony na podstawie interpretacji danych z wierceń, sondowań lub powstający w trakcie bezpośredniej obserwacji i kartowania, np. skarp odkrywek i zwałowisk może być traktowany jako pewien układ elementów geologicznych, których rolę pełnią pojedyncze wydzielenia, najczęściej typ litologiczny skał (gruntów). Ograniczając się w niniejszym artykule do zagadnień skarp zwałowiska zewnętrznego kopalni „Bełchatów” można stwierdzić, że elementy te – zarejestrowane w trakcie profilowania skarp zwałowiska – są znacznie silniej zróżnicowane między sobą

niż wewnątrz siebie. Praktycznie, przy danej skali obserwacji można je uważać – ze względu na wyróżniające je cechy – za wewnątrznie jednorodne.

Rejestracja wydzieleni tworzących obraz geologiczny jest prowadzona w skali nominalnej, na podstawie klasyfikacji elementów geologicznych (wydzieleni), na wzajemnie wykluczające się kategorie jednakowego typu. Symbole (nazwy) opisujące wydzielenia mają jedynie znaczenie identyfikatorów i nie informują o relacjach zachodzących między wydzieleniami z punktu widzenia charakteryzujących je w sposób ilościowy parametrów geologiczno-inżynierskich. W takim ujęciu badanie struktury obrazów geologicznych wymaga zastosowania statystyki cech jakościowych.

Pełny zestaw informacji o zmienności budowy geologicznej skarp zwałowiska powinien obejmować:

- ocenę udziału poszczególnych wydzieleni w obrębie analizowanego profilu,
- liczbowo wyrażoną zmienność budowy geologicznej i charakterystykę sposobu rozmieszczenia wydzieleni.

Udział poszczególnych typów gruntu w budowie skarp zwałowiska może być określony liniowo, powierzchniowo lub przestrzennie. Ze względu na specyfikę obserwacji geologiczno-inżynierskich najważniejsze jest stosowanie miary powierzchniowej. Udział powierzchniowy danego wydzielenia w profilu skarpy wyznacza się jako stosunek powierzchni jego występowania (S_i) do powierzchni całego profilu (S):

$$p_i = \frac{S_i}{S}$$

Pomiary powierzchni na mapach profilów mogą być wykonane za pomocą siatki linearnej, paletki lub planimetru. Najdogodniejszą dla oceny wizualnej formą przedstawienia udziałów powierzchniowych wydzieleni jest histogram. Dostarcza on informacji co do proporcji wystąpień poszczególnych wydzieleni (dominacji ilościowej pewnych typów gruntu lub ich równomiernego udziału).

Zmienność obrazu geologicznego, wynikająca z tytułu stwierdzonego rozkładu udziałów, można scharakteryzować za pomocą entropii (H) – miary stosowanej do oceny nieokreśloności procesu losowego. Jej wartość liczbowa określa się ze wzoru:

$$H = \frac{- \sum_{i=1}^m p_i \cdot \ln p_i}{m}$$

gdzie: p_i – udział i tego wydzielenia w budowie skarpy,
 m – liczba wydzieleni.

Miara ta przyjmuje wartości z przedziału (0,1). Entropia jest bliska zeru w warunkach silnej dominacji powierzchniowej jednego typu gruntu, natomiast bliska jedności w warunkach mniej więcej równego udziału wszystkich wydzieleni. Entropia jest równa dokładnie zeru, w wypadku pełnej jednorodności badanego obiektu, tzn. wówczas, gdy jest on zbudowany tylko z jednego typu gruntu. Taka interpretacja jednorodności nie pokrywa się całko-

wicie z pojęciem jednorodności w sensie statystyczno-geologicznym. W tym drugim ujęciu o jednorodności obiektu geologicznego mówi się także i wtedy, gdy składa się on z różnych elementów, ale dokładnie przemieszanych, co ma ten skutek, że w każdej (nawet małej) próbce są zachowane proporcje odzwierciedlające udział tych elementów w całym profilu.

Zarówno entropia, jak i zestawienie udziałów typów gruntu nie charakteryzuje zmienności rozmieszczenia dokonanych wydzielen w obrębie profilu skarpy zwału. Można w tym celu posłużyć się wskaźnikiem zmienności struktury obliczonym ze wzoru (rys. 1a):

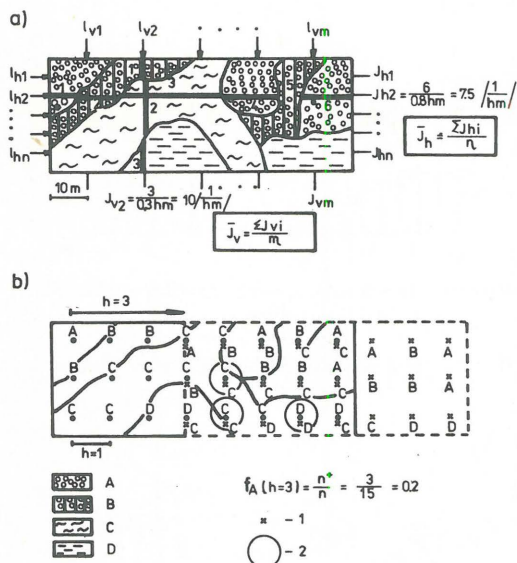
$$I_i = \frac{n_i}{l_i}$$

gdzie: n_i – liczba wydzielen występująca wzdłuż linii obserwacji,

l_i – długość linii.

Zmienność budowy w danym kierunku reprezentuje średni ważony wskaźnik zmienności I_a z wagą odpowiadającą długości linii obserwacji. Wartość tego wskaźnika określona dla różnych orientacji linii daje podstawę do oceny anizotropii struktury ze wzoru:

$$A = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$$



Ryc. 1. Przykłady ilustrujące sposób określania:

a) wskaźnika zmienności struktury (I), b) wartości funkcji autoasocjacji dla przesunięcia poziomego $h = 3j$; $f_A(h = 3)$, I_{h1} , I_{v1} – odpowiednio: wartości wskaźników zmienności dla kierunku równoleżnikowego i południkowego wzdłuż linii l_{h1} , l_{v1} , \bar{I}_h , \bar{I}_v – wartości średnie wskaźników zmienności dla kierunku poziomego i pionowego, A, B, C, D, – typy wydzielen, 1 – punkty porównania typu wydzielenia (węzły sieci), 2 – punkty, w których stwierdzono identyczne wydzielenia w profilu wyjściowym i profilu przesuniętym o h jednostek

Fig. 1. Examples showing the mode of evaluation of

a) index of variability of structure (I), b) value of autoassociation function for horizontal displacement $h = 3$ units; $f_A(h = 3)$, I_{h1} , I_{v1} – values of variability indices for latitudinal and longitudinal directions along lines l_{h1} and l_{v1} , respectively. \bar{I}_h , \bar{I}_v – mean values of variability indices for horizontal and vertical directions, A, B, C, D – types of soils, 1 – points of comparison of types of soils (network points), 2 – points in which were found identical soils in reference section and section h -units translocated

gdzie: I_{\max} , I_{\min} – odpowiednio wielkości wskaźników wzdłuż linii maksymalnej i minimalnej zmienności struktury obrazu geologicznego.

Możliwość dokładniejszej charakterystyki rozmieszczenia wydzielen daje funkcja autoasocjacji opisująca podobieństwo budowy geologicznej w punktach oddalonych o h jednostek (2). Wartości funkcji autoasocjacji dla danego przesunięcia h wyznacza się ze wzoru (rys. 1b):

$$f(h) = \frac{n^+}{n}$$

gdzie: n^+ – liczba punktów w profilu wyjściowym i przesuniętym o h , w których stwierdzono identyczne wydzielenia (rys. 1b),

n – liczba punktów, w których dokonano porównania wydzielen.

Statystyczną istotność autoasocjacji dla danego przesunięcia h można zweryfikować za pomocą χ^2 . Statystyka χ^2 ma postać:

$$\chi^2 = \frac{(O - E)^2}{E} + \frac{(O' - E')^2}{E'}$$

gdzie: O , O' – odpowiednio: liczba punktów, w których stwierdzono ten sam i różny typ wydzielen, E , E' – odpowiednio: oczekiwana liczba punktów, w których powinien wystąpić ten sam i różny typ wydzielen.

Wielkość E można wyznaczyć ze wzoru:

$$E = \frac{\sum_{k=1}^m \chi_k^2 - n}{(n-1) \cdot n} \cdot n^+$$

gdzie: χ_k^2 – liczba punktów, w którym stwierdza się występowanie k – tego typu wydzielen,

m – liczba wydzielen,

$n = \sum_{i=1}^m \chi_k$,

n^* – liczba punktów, w których porównuje się typ wydzielen w profilu wyjściowym i przesuniętym o h .

Wielkość E' równa jest: $E' = n^+ - E$.

Hipoteza zerowa testu zakłada, że stwierdzona liczba zgodności (n^+) nie różni się istotnie od liczby zgodności dla losowej serii elementów o tej samej strukturze, przy porównywaniu jej samej ze sobą przy danym przesunięciu h . Gdy wartość obliczona χ^2 (χ^2_{obl}) jest większa od wartości krytycznej χ^2 (χ^2_{kr}), wyznaczonej z tablic dla poziomu istotności α i jednego stopnia swobody, można przyjąć z ryzykiem błędu równym α , iż autoasocjacja jest statystycznie istotna. Testowanie istotności funkcji autoasocjacji dla różnych wielkości przesunięcia h pozwala ustalić zasięg autoasocjacji, tzn. przesunięcia, dla którego autoasocjacja jest statystycznie istotna. Ponadto postać funkcji autoasocjacji dostarcza informacji o charakterze rozmieszczenia wydzielen w obrębie analizowanego profilu skarpy zwału.

W zaproponowanym zestawie miar opisujących zmienność struktury obrazów geologicznych nie uwzględniono miar charakteryzujących zmienność występowania pojedynczych wydzielen. Wygodną dla tego celu miarą byłby statystyczny współczynnik zmienności określony dla udziału danego typu gruntu w pewnych podobszarach, na jakie należy podzielić profil. Zastosowanie jednak tego typu miary ilościowej napotyka duże trudności. Najpoważniejszą stanowi określenie wielkości i formy podobszarów, które mogą być traktowane jako swojego rodzaju próbki.

Wielkości współczynników zmienności określone dla podobszarów o różnej wielkości i formie mogą się znacznie różnić między sobą. Zgodnie z zasadami przyjętymi przy oprobowaniu, wielkość takiego podobszaru powinna znacznie przewyższać rozmiary wydziałów.

Obserwacja skarp zwałów dowodzą, iż pojedyncze wydzielenia mogą osiągać niejednokrotnie duże rozmiary. Przy ustalaniu wielkości podobszarów, należałoby więc pogodzić dwie przeciwne tendencje: wymóg odpowiedniej wielkości i liczby podobszarów dla uzyskania wiarygodnej wartości współczynnika zmienności. Nie bez wpływu na charakterystykę zmienności pozostaje fakt, iż w wypadku udziałów wydziałów w podobszarach mamy do czynienia z układem zamkniętym zmiennych, tzn. udziały nie są niezależne, gdyż wiąże je warunek stałej sumy równej 1 (100%).

Charakteryzując zmienność całego układu, można zastosować wspomnianą wcześniej entropię określaną osobno dla każdego podobszaru. Nie rozwiązuje to jednak w dalszym ciągu kwestii wielkości i formy podobszarów.

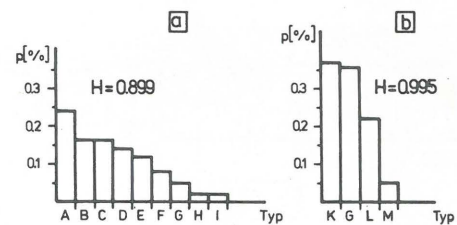
PRZYKŁAD OPISU ZMIENNOŚCI STRUKTURY OBRAZÓW GEOLOGICZNYCH

Charakterystykę zmienności przy zastosowaniu przedstawionych miar przeprowadzono dla dwóch wybranych skarp zwału z kopalni „Bełchatów”. Już wizualne porównanie map profilów (rys. 2) geologicznych pozwala dostrzec istotne różnice w budowie skarp polegające na różnej liczbie wydziałów i sposobie ich rozmieszczenia. W profilu skarpy a wyróżniono 9 typów gruntów. Tworzą one zwarte podobszary występujące w profilu tylko jeden raz. W profilu skarpy b wyróżniono 4 typy gruntów. Niektóre z nich występują w profilu kilkakrotnie. Forma występowania wydziałów jest bardziej nieregularna niż w profilu skarpy a.

Udziały powierzchniowe wydziałów w budowie skarpy ilustruje histogram przedstawiony na rys. 3. W obu wypadkach nie obserwuje się silnej dominacji jednego z wy-

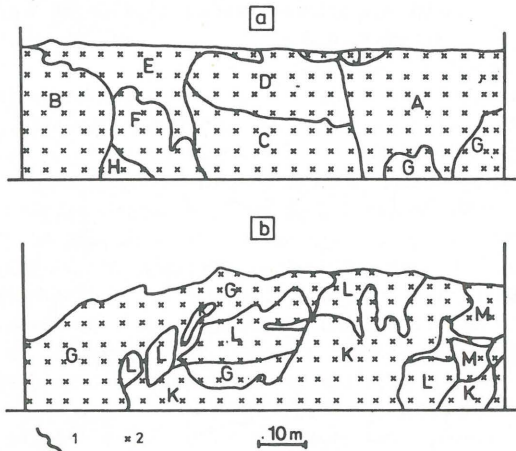
działów. Znajduje to wyraz w wysokich wartościach entropii równych odpowiednio dla skarpy a: $H = 0,899$ i dla skarpy b: $H = 0,995$. W dalszej kolejności określono wskaźniki zmienności struktury dla 7 linii równoległych o przebiegu równoleżnikowym i 25 linii o przebiegu południkowym (rys. 4). W tym drugim wypadku wykres zmienności sporządzono na podstawie średniego wskaźnika zmienności obliczonego dla grup 5 kolejnych linii. Jako odległość między liniami obserwacji przyjęto rozstęp 4 m. Jak wynika z rys. 4 większą zmiennością budowy cechuje się skarpa b. Postać grafiku zmienności wskazuje na zróżnicowanie zmienności określonej dla linii równoleżnikowych w zależności od wysokości ich położenia w profilu. Dla skarpy a wskaźniki zmienności przybierają wyższe wartości w dolnej partii profilu, natomiast w profilu b w partii górnej. Bardziej stabilne są wartości wskaźnika I ustalone dla linii pionowych, szczególnie dla skarpy a.

Zmienność struktury obrazów skarp w zależności od kierunku badania ilustruje indykatory wskaźników zmienności I przedstawiona na rys. 5. W obu wypadkach stwierdza się największą zmienność w kierunku południkowym. Różne są natomiast kierunki minimalnej zmienności (skarpa a – kierunek równoleżnikowy, skarpa b – kierunek przekątnej NE–SW). Wskaźniki anizotropii, mimo wyraźnie zróżnicowanych wartości wskaźników zmienności struktury, są identyczne i wynoszą 1,5. Informacje uzyskane z grafików zmienności (rys. 4 i 5) mogą być pomocne



Ryc. 3. Histogramy udziałów powierzchniowych wydziałów w profilu skarpy

Fig. 3. Histograms of share of surface soils in escarpment sections

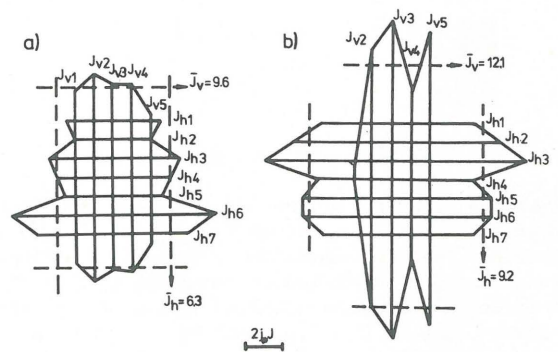


Ryc. 2. Profile geologiczno-inżynierskie skarp zwału zewnętrznej Kopalni Bełchatów

1 – granice wydziałów, 2 – punkty obserwacji (węzły sieci obserwacji), A, B, C... M – typy wydziałów

Fig. 2. Geological-engineering sections of escarpments of outer dump in the Bełchatów mine

1 – boundaries of soil differentiations, 2 – observation points (network points), A, B, C... M – types of soils



Ryc. 4. Wykresy zmienności budowy geologicznej skarp zwału

I_{h_i} , I_{v_i} – wartości wskaźników zmienności wzdłuż linii równoleżnikowych i południkowych, \bar{I}_h , \bar{I}_v – wartości średnie wskaźników dla kierunku równoleżnikowego i południkowego

Fig. 4. Graphs of variability in geological structure of dump escarpments

J_{h_i} , J_{v_i} – values of variability indices along latitudinal and longitudinal lines, \bar{I}_h , \bar{I}_v – mean values of indices for latitudinal and longitudinal directions

przy podziale zwału na strefy dla celów obliczeniowych.

Próbie określenia prawidłowości rozmieszczenia wydzielań w obrębie analizowanych profilów skarp podjęto przy zastosowaniu funkcji autoasocjacji. Jako wielkość przesunięcia elementarnego profilów przyjęto rozstęp 4 m. Postacie funkcji autoasocjacji ustalono zarówno dla przesunięcia poziomego, jak i pionowego (rys. 6). Profil skarpy a reprezentuje funkcja autoasocjacji, której wykresem jest krzywa malejąca wykładniczo do zera ze wzrostem odległości między punktami porównania wydzielań. Jest ona typowa dla sekwencji utworów nie powtarzających swego występowania w profilu. Zasięg autoasocjacji (W), a więc odległość, do której podobieństwo budowy geologicznej jest statystycznie istotne (dla $\alpha = 0,01$), jest wyraźnie większy w kierunku równoleżnikowym niż południkowym. Uzyskany wynik potwierdza istnienie anizotropii zmienności wydzielań, zasygnalizowanej już przy zastosowaniu wskaźnika zmienności I . Profil skarpy b reprezentuje krzywa o zbliżonym kształcie. Różnica w porównaniu z krzywą dla skarpy a polega jedynie na tym, iż po prze-

kroczeniu zasięgu autoasocjacji wykres zmierza do zera bardzo powoli. Wskazuje to na tendencję do powtarzalności występowania wydzielań, ale zaznaczoną nie tak silnie, aby zjawisko można było traktować jako okresowe. Również i w wypadku profilu skarpy b wykresy funkcji autoasocjacji potwierdzają występowanie anizotropii wyrażone wyższym zasięgiem autoasocjacji dla orientacji równoleżnikowej niż dla południkowej.

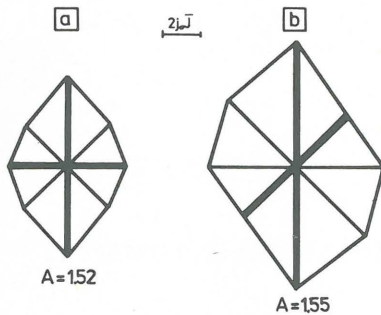
Interesujące wydaje się zestawienie wykresów cząstkowych funkcji autoasocjacji określonych dla przesunięcia poziomego. Zostały one sporządzone osobno dla trzech grup linii: 1-2-3, 4-5, 6-7 (rys. 7). Porównanie rozrzutu wykresów dla obu profilów skarp potwierdza większą zmienność budowy geologicznej skarpy b. Dla skarpy a reprezentujące je krzywe cząstkowe mają przebiegi bardzo zbliżone, dla skarpy b zaś wykresy są znacznie oddalone od siebie.

PODSUMOWANIE I WNIÓSKI

1. Podjęta próba oceny zmienności struktury obrazów geologicznych nie wyczerpuje wszystkich możliwości jej opisu i może być poszerzona lub zastąpiona innymi miarami.

2. Zaproponowany zestaw miar charakteryzujących zmienność budowy obiektów geologicznych cechuje prostota ich obliczania i łatwość interpretacji. Większego nakładu pracy wymaga jedynie określenie postaci funkcji autoasocjacji. Badanie zmienności pojedynczych wydzielań w obrębie profilu za pomocą ilościowych metod statystycznych może napotykać duże trudności, co zostało zasygnalizowane w tekście. Ponadto przy dużej liczbie wydzielań może to być zadanie bardzo pracochłonne.

3. Podstawową trudność przy obliczaniu wskaźnika zmienności struktury I i funkcji autoasocjacji może stanowić określenie optymalnej odległości między liniami obserwacji i wielkości przesunięcia elementarnego profilu. Zmniejszenie ich prowadzi do uzyskania dokładniejszych wyników, ale znacznie zwiększa nakład pracy. W pierwszym przybliżeniu można w tym celu przyjąć wielkości zbliżone do rozmiarów najmniejszych wystąpień wyróżnionych typów gruntów.

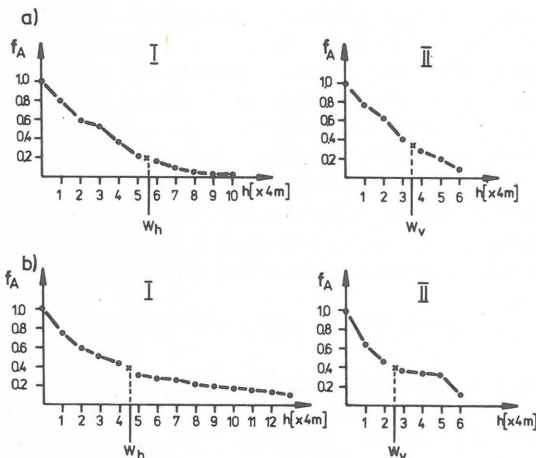


Ryc. 5. Indykatrysa wskaźników zmienności struktury geologicznej skarp zwału

A – wskaźnik anizotropii

Fig. 5. Indicatrix of variability indices for geological structure of dump escarpments

A – anisotropy index

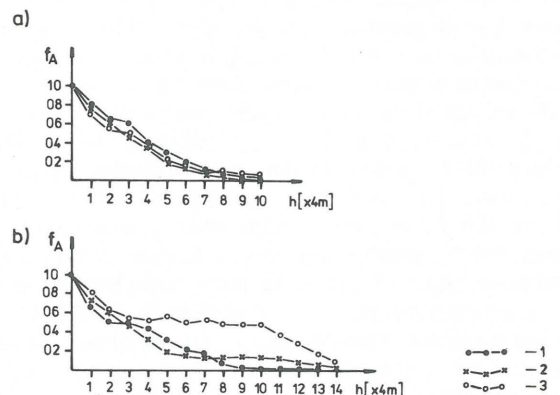


Ryc. 6. Wykresy funkcji autoasocjacji dla profilów skarp

I – przy przesunięciu poziomego profilu, II – przy przesunięciu pionowym profilu

Fig. 6. Graphs of autoassociation function for escarpment sections

I – with horizontal displacement of section, II – with vertical displacement of section



Ryc. 7. Wykresy cząstkowych funkcji autoasocjacji dla przesunięcia poziomego

1 – wykres dla trzech najwyższych położonych linii obserwacyjnych (1+2+3), 2 – wykres dla linii (4+5), 3 – wykres dla linii (6+7)

Fig. 7. Graphs of partial autoassociation functions for horizontal displacement

1 – graph for three highest-situated observation lines (1+2+3), 2 – graph for lines (4+5), 3 – graph for lines (6+7)

4. W związku z brakiem doświadczeń w zakresie opisu zmienności struktury obrazów geologicznych, nie można jeszcze w tej chwili klasyfikować wielkości wskaźników zmienności. Dalszych badań wymaga określenie praktycznej przydatności miar zmienności pod kątem np. oceny stateczności skarp zwałów i rejonizacji geologiczno-inżynierskiej.

L I T E R A T U R A

1. Cz e t w i e r i k o w L.J. — Teoreticzeskije osnovy modelirowanija tieł poleznych iskopajemych. Woroneż 1968.
2. D a v i s J.C. — Statistika i analiz geologiczeskich dannyh. Wyd. Mir Moskwa 1977.
3. R a c M.B. — Nieodnorodnost gornych porod i ich fiziczeskich swojstw. Wyd. Nauka Moskwa 1968.

S U M M A R Y

The necessity of quantitative estimations of variability in structure of geological images is discussed and justified.

The estimations may be made using four measures of variability of geological-engineering objects: histogram of share of individual types of surface soils, entropy, index of structural variability, and autoassociation function. The measures were used in descriptions of variability of two escarpments of outer dump in the Bełchatów mine.

Р Е З Ю М Е

В статье обоснована необходимость количественной оценки изменчивости структуры геологических изображений. Предлагается применение четырёх мер изменчивости геолого-инженерных объектов: гистограммы поверхностного участия отдельных типов грунта, энтропии, показателя изменчивости структуры и функции автоассоциации. Приведенные меры были применены для описания изменчивости двух откосов внешнего отвала шахты Белхатов.