

## STATYSTYCZNE WSKAŹNIKI UZIARNIENIA GRUNTÓW SYPKICH

UKD 624.131.21:624.131.431.6/.7:519.24(084.21)

Uziarnienie jest jedną z głównych własności strukturalnych gruntów sypkich, a analiza granulometryczna stanowi podstawową metodę badania tych gruntów, szeroko stosowaną w naukach geologicznych.

Szeroka i zróżnicowana problematyka związana z analizą granulometryczną i wykorzystaniem jej wyników dla celów naukowych i praktycznych spowodowała, że od początków XIX w., tj. od chwili, kiedy datują się pierwsze prace na ten temat, do dnia dzisiejszego, narosła olbrzymia ilość literatury, której nie sposób tu przytoczyć. Omówienie starszych prac w ujęciu historycznym znajduje się w pracach i podręcznikach sedymentologii m. in. W. C. Krumbain (23, 29) i F. J. Pettijohn (37, 38); z kolei prace: L. B. Ruchina (42), E. Köstera (21, 22), A. Rosfeldera (41), Z. Kukala (31), R. L. Folk (4) zawierają bogatą bibliografię dotyczącą tych zagadnień.

Dowodem szerokiego zainteresowania oraz ciąglej potrzeby rozwijania tej problematyki jest aktualnie ukazująca się znaczna ilość prac (zob. np. kolejne numery czasopisma „Journal of Sedimentary Petrology” np. vol. 22—37, 1952—1967). Z wielu zagadnień związanych z analizą granulometryczną, jedną z ważniejszych są metody przedstawiania wyników badań uziarnienia gruntów sypkich. Wynika to z faktu, że warunkiem szerokiego stosowania analizy granulometrycznej w badaniach geologicznych jest możliwość porównywania wyników tych badań przeprowadzonych dla różnych (np. genetycznie czy wiekowo) gruntów z różnych regionów. Analiza literatury dokonana pod tym kątem wskazuje, że istnieje duża różnorodność wspomnianych metod, powodująca często trudności bądź wręcz niemożliwość porównania wyników

uziarnienia. Fakty te oraz to, że polska literatura dotycząca metod przedstawiania wyników uziarnienia jest stosunkowo skromna, skłoniły autora do omówienia tego problemu i zwrócenia uwagi na znaczenie liczbowych charakterystyk uziarnienia w badaniach geologicznych.

### PODSTAWOWE METODY OKREŚLANIA STATYSTYCZNYCH WSKAŹNIKÓW UZIARNIENIA

#### Teoretyczne podstawy badania uziarnienia gruntów i definicja statystycznych wskaźników uziarnienia

Opierając się na założeniu sformułowanym po raz pierwszy przez J. A. Udden (54), że badanie środowiska sedymentacyjnego na podstawie uziarnienia jest zależne od warunków środowiska, w których powstają osady — analiza granulometryczna stała się główną metodą ich charakterystyki. Analiza wyników uziarnienia osadów, wykonywanych zwykle na znacznej ilości próbek, idzie w kierunku rozpoznania samej struktury uziarnienia oraz uchwycenia zmienności składu w obrębie określonego obszaru, często przy znanej genezie tych utworów.

Uziarnienie gruntu sypkiego charakteryzujemy podając wielkości średnie ziarn zawartych w pewnych klasach (rozmiary oczek na sąsiednich sitach) oraz procentową zawartość poszczególnych frakcji. Zakładając, iż uziarnienie gruntu jest wynikiem nakładających się procesów znajdujących się pod wpływem czynników losowych możemy traktować średnicę ziarn jako zmienną losową ciągłą, zaś procentowe zawartości ziarn poszczególnych frakcji (klas) — jako

prawdopodobieństwo<sup>1</sup>. Tak więc określanie uziarnienia jest szukaniem prawdopodobieństwa występowania w danej próbie gruntu ziaren o odpowiednich średnicach. Otrzymane wartości przedstawione w postaci krzywych uziarnienia zwanych kumulacyjnymi można więc rozpatrywać jako krzywe rozkładu zmiennych losowych ciągłych, a zatem stosować do ich opisu metody rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.

Z krzywej kumulacyjnej odczytujemy bezpośrednio (np. A. Rivière, 39, E. A. Lohse, 32) szereg wartości liczbowych, charakteryzujących poszczególne punkty krzywej. Na podstawie tych wartości wylicza się wskaźniki liczbowe charakteryzujące bądź określony odcinek krzywej kumulacyjnej, bądź tylko jeden jej punkt. Wartości te dalej będą nazywane statystycznymi wskaźnikami uziarnienia (s.w.u.). Krzywą uziarnienia, stanowiącą określony rozkład w sensie statystycznym, tzn. dający się opisać przez którąś z funkcji statystycznych, charakteryzujemy więc za pomocą ogólnie znanych statystycznych wskaźników — miar przeciętnych (moda, mediana, średnie) oraz miar zmienności (odchylenie standardowe, skośność, spłaszczenie).

Komentując przydatność metod analizy statystycznej do badań uziarnienia W. H. Twenhofel i S. A. Tyler (1941, op. cit. in: B. K. Sahu, 44) pisali: „W końcowej fazie badań okaże się zapewne, że metody statystyczne są znacznie bardziej przydatne, niż to możemy obecnie ocenić. Wyniki statystyczne niewątpliwie dają nam możliwość szybkiego i łatwego porównywania dużej ilości osadów oraz uwydatniają podobieństwa i różnice między tymi osadami. Należy zbadać jakie znaczenie mają te wyniki dla określenia warunków środowiskowych”.

#### Podstawowe statystyczne wskaźniki uziarnienia<sup>2</sup>

Istnieje bardzo bogata literatura, głównie autorów amerykańskich, dotycząca charakterystyki uziarnienia gruntów sypkich za pomocą wskaźników uziarnienia obliczanych metodami stosowanymi w statystyce matematycznej. Podstawowe statystyczne wskaźniki uziarnienia są następujące:

1) średnia średnica (mean diameter  $M_z$ ) ziarn zwaną również wartością przeciętną (average size) — jest to średnia arytmetyczna lub średnia ważona próbeki gruntu. W pracach amerykańskich stosowane są najczęściej średnie geometryczne lub logarytmiczne;

2) mediana średnicy (median diameter  $M_d$ ), wartość centralna, środkowa  $d_{50}$  — dzieli na połowę szereg uporządkowanych według wartości średnic ziarn. Na krzywej kumulacyjnej wyznacza ją punkt, od którego 50% średnic ziarn (cząstek) posiada wartości mniejsze, a 50% wartości większe. Warunkiem wstępnym i zasadniczym dla określenia mediany jest uporządkowanie wartości średnic ziarn według wielkości wzrastających lub malejących;

3) moda, dominanta — średnica odpowiadająca maksymalnej zawartości procentowej frakcji.

4) wysortowanie lub dyspersja (sorting) — wskazuje rozproszenie rozkładu uziarnienia w stosunku do wartości średniej. Miara wysortowania jest odchylenie standardowe (standard deviation  $\sigma$ );

5) skośność czyli asymetria (skewness) — wskazuje symetryczność rozkładu krzywej kumulacyjnej. Miarami skośności rozkładu krzywej uziarnienia są wskaźniki skośności lub współczynnik asymetrii;

6) spłaszczenie (eksczes, pułap, czyli kurtoza = kurtosis) — informuje o spłaszczeniu krzywej uziarnienia

nia w stosunku do krzywej rozkładu normalnego (Gaussa). Krzywe bardziej strome niż krzywa normalna (tj. przewyższające pułap rozkładu normalnego) K. Pearson (vide G. V. Yule, M. G. Kendall, 58) nazywał leptokurtycznymi (leptokurtic), krzywe o stromości (peaknades) zbliżonej do rozkładu normalnego — mezokurtycznymi (mesokurtic), zaś krzywe bardziej spłaszczone (tj. nie osiągnące pułapu rozkładu normalnego) — platykurtycznymi (platykurtic).

#### Metody określenia statystycznych wskaźników uziarnienia

Przytoczone powyżej podstawowe wskaźniki statystyczne posiadają szereg postaci i form w zależności od metody ich obliczania. Wspomniane wskaźniki obliczać można za pomocą:

- 1) metod analitycznych: kwantylowych (kwartyli, decyle, percentyle) i momentów,
- 2) metod graficzno-analitycznych.

Do statystycznych wskaźników uziarnienia gruntów sypkich wyznaczonych metodami analitycznymi przy użyciu kwartyli lub decyli należą m. in.: współczynnik równomierności uziarnienia — A. Hazena (11) współczynnik wysortowania, współczynnik asymetrii — P. D. Traska (52, 53), współczynnik gradacji wprowadzony przez Unified Soil Classification System (J. N. Luthin, 33), cecha dominacji (W. Kollis, 17, 18) i zmodyfikowany współczynnik równomierności uziarnienia (B. Kozerski, 19, 20).

Najstarszym i najpowszechniej chyba do dziś stosowanym wskaźnikiem jest współczynnik równomierności uziarnienia (uniformity coefficient —  $U$ ) A. Hazena (11) wyrażony w postaci:

$$U = \frac{d_{80}}{d_{10}}$$

gdzie:

$d_e$  — średnica miarodajna (efektywna — effective size A. Hazena, 11) ziarn w mm równa wskaźnikowi  $d_{10}$ ,

$d_{80}$  — średnica ziarn w mm, poniżej której 80% ciężaru całej próbki posiada średnice mniejsze.

Warunkiem przyjęcia średnicy miarodajnej  $d_e = d_{10}$  wg Hazena jest spełnienie wyrażen

$$0,1 \text{ mm} \leq d_e = d_{10} \leq 3 \text{ mm}$$

oraz

$$1 \leq U < 5$$

Pierwszy użył miar kwantylowych w badaniach osadów P. D. Trask, który w 1930 r. wprowadził miary kwantylów geometrycznych, a w 1932 r. podał i przedyskutował ich teorię. Wartość geometrycznego odchylenia kwantyl Trask określił jako współczynnik wysortowania (sorting coefficient —  $S_0$ ) o postaci następującej:

$$QDg = S_0 = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}} \text{ co odpowiada } S_0 = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}$$

gdzie:

$Q_3$  ( $d_{75}$ ),  $Q_1$  ( $d_{25}$ ) — średnice ziarn w mm, których ciężar ziarn o mniejszej od nich średnicy stanowią odpowiednio 75% i 25% ciężaru danej próbki. Wartość  $Q_3$  jest zawsze większa od  $Q_1$ .

P. D. Trask (52, 53) proponuje na podstawie kwartyli obliczać współczynnik asymetrii (skewness coefficient)  $S_k$  wg wzoru:

$$S_k = \frac{Q_1 Q_3}{M d^3}$$

<sup>1</sup> Możliwość traktowania uziarnienia gruntu jako funkcji losowej ciągłej wynika z faktu przybierania przez średnice ziarn wartości liczbowych, należących do pewnego przedziału liczbowego, którego wielkość jest funkcją dokładności przyrządu pomiarowego, tj. średnic oczek na sitach.

<sup>2</sup> Dotyczą wyników uziarnienia wyrażonych w procentach wagowych.

gdzie:

$M_d$  — mediana średnicy w mm;

W. C. Krumbein (25, 26, 28) stosując metodę kwartyli wyznacza skośność kwartylową, którą oblicza wg następujących wzorów:

arytmetyczna skośność kwartylowa

$$Sk_a = \frac{Q_3 + Q_1 - 2Md}{2}$$

geometryczna skośność kwartylowa

$$Sk_g = \sqrt{\frac{Q_1 \cdot Q_3}{Md^2}}$$

logarytmiczna skośność kwartylowa

$$\begin{aligned} \log Sk_g &= \frac{\log Q_1 + \log Q_3 - 2 \log Md}{2} \\ &= \log Sk_g = \log \sqrt{\frac{Q_1 \cdot Q_3}{Md^2}} \end{aligned}$$

Charakterystykę uziarnienia gruntów można określić podając współczynnik krzywej (curvate coefficient  $C_c$  lub współczynnik gradacji (gradation coefficient  $C_g$ ) określane wg wzoru:

$$C_g = \frac{(d_{20})^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

gdzie:

$d_{10}, d_{30}, d_{60}$  — średnice ziarn w mm, których ciężar o średnicach mniejszych stanowi 10, 30 i 60% ciężaru danej próbki.

Według Unified Soil Classification System, 1951, wartość tego współczynnika dla gruntów o zawartości ponad 50% ziarn o średnicy większej od 0,074 mm (No 200) wynosi od 1 do 3 (33).

W. Kollis (17, 18), opierając podział uzyskanego z analizy granulometrycznej szeregu rozdzielczego na decylach (podział zbiorowości na 10 części), proponuje nowy wskaźnik charakteryzujący asymetrię krzywych tzw. cechę dominacji  $C_d$  wyrażonej wzorem:

$$C_d = \frac{d_{90} \cdot d_{10}}{d_{50}^2}$$

$d_{10}, d_{50}, d_{90}$  — średnice ziarn w mm, odczytane z krzywej kumulacyjnej, odpowiadające średnicom ziarn o zawartości 10, 50 i 90% ciężaru ziarn o średnicach mniejszych w stosunku do pozostałych.

W przypadku, gdy  $C_d < 1$  (tj.  $\frac{d_{50}}{d_{10}} > \frac{d_{90}}{d_{50}}$ ) czyli

przewaga frakcji mniejszych od  $d_{50}$  mamy do czynienia z asymetrią w kierunku frakcji odrobnych, gdy zaś  $C_d > 1$  mamy asymetrię w kierunku frakcji grubszych. Przewaga frakcji drobnych zwykle stanowi świadectwo, że grunt może wykazywać cechy wyraźnej anizotropii (18).

B. Kozerski (19, 20), badając zależność między uziarnieniem a odsączalnością, zaproponował nową postać współczynnika równomierności uziarnienia, a mianowicie:

$$U_2 = \frac{d_{20}}{d_5}$$

przy czym najmniejsza średnica miarodajna  $d_5$  nie powinna być mniejsza od 0,11 mm przy wartości  $U_2 = 2,0$ . Pełny zakres wartości  $U_2$  (odpowiadający wartościom  $U < 5$ ) wynosi 1,0 do 6,0 dla średnic miarodajnych  $d_{10}$  zawartych w granicach 0,196 — 3,8 mm.

Stosując metody kwantylowe oblicza się również wartość ekscesu (skurtosis) wyrażoną wzorem T. L. Kelleya (1924 in: W. C. Krumbein i F. J. Pettijohn, 29, str. 238):

$$K_{ga} = \frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})}$$

gdzie:

$Q_3, Q_1, P_{90}(d_{90}), P_{10}(d_{10})$  — odpowiadają wartościom średnic w mm, określanych we wzorach podanych wyżej.

Krzywa rozkładu normalnego posiada wartość  $K_{ga} = 0,263$ ; wartości mniejsze od 0,263 charakteryzują stromą krzywą uziarnienia.

Obliczanie statystycznych wskaźników uziarnienia za pomocą metody kwartyli i decyli jest bardzo szybkie<sup>3</sup>, poglądowe i co najważniejsze daje się zastosować do wszystkich danych analizy granulometrycznej niezależnie od charakteru frakcji, w których jest wyrażona. Szczególnie wygodny jest ten sposób dla charakterystyki gruntów słabo wysortowanych lub analiz wyrażonych we frakcjach o niestałym stosunku średnic poszczególnych klas (sit). Dlatego też metodę sporządzania krzywej kumulacyjnej i określenia z niej wskaźników uziarnienia niektórzy badacze (np. L. B. Ruchin, 42, 43), uważają za uniwersalną metodę opracowania danych z analizy uziarnienia.

Z kolei dla analiz wyrażonych we frakcjach ze stałym, określonym stosunkiem granicznych średnic poszczególnych sit ( $\sqrt{2}, \sqrt[4]{2}, \sqrt[10]{2}$  itp.) bardziej słusze jest obliczanie s.w.u. za pomocą metody momentów.

Momenty (inaczej średnie potęgowe) stanowią najbardziej wszechstronne oraz ściśle ujęcie miar przeciętnych i miar zmienności. Zazwyczaj oblicza się pierwsze cztery momenty, które dostarczają odpowiedniego opisu rozkładu uziarnienia. Pierwszy moment jest średnią arytmetyczną, drugi jest w przybliżeniu równy odchyleniu standardowemu, trzeci służy do określania współczynnika symetrii, natomiast czwarty moment jest pomocny przy określaniu kurtozy rozkładu.

Pierwszymi, którzy zastosowali metodę momentów do obliczania statystycznego wskaźników uziarnienia byli C. E. van Orstrand, 1924, C. K. Wentworth, 1929, T. Hatch i S. P. Choate, 1929, (op. cit. W. C. Krumbein i F. J. Pettijohn, 29) oraz W. C. Krumbein (24, 25, 26), który rozwinął zastosowane wcześniej metody obliczania wskaźników uziarnienia i przytoczone powyżej wskaźniki obliczone za pomocą kwartyli wyraził w wartościach skali phi ( $\phi$ ). W. C. Krumbein (24) wyprowadził proste równanie logarytmiczne pozwalające przekształcić geometryczną skalę Wentwortha (57) o podstawie 2, na skalę phi<sup>4</sup>, a mianowicie:

$$\phi(\phi) = -\log_2 d,$$

gdzie:

$d$  jest średnicą ziarna w mm.

Przyjmując  $\phi$  jako nową zmienną otrzymujemy równomierną skalę (o równych przedziałach klas), a więc spełniony zostaje warunek możliwości stosowania metod statystycznych do uziarnienia osadów. Wtedy niewygodne granice klas Wentwortha między poszczególnymi wymiarami ziarn osadów zastąpiono liczbami całkowitymi, wzrastającymi ze zmniejszeniem się wielkości frakcji. Tak więc wartość skali phi polega na tym, że będąc skalą arytmetyczną zachowuje jednocześnie geometryczne własności skali logarytmicznej. Niekorzystną stroną jest natomiast fakt, iż ziarna o średnicy większej od 1 mm (1 mm odpowiada 0 w skali phi) posiadają wartości ujemne. Ponadto poszczególne wartości phi stanowiące ekwiwalenty średnic można wyrazić w milimetrach. Przekształcenia wartości phi na milimetry można dokonać bądź to poprzez nomogramy W. C. Krumbein (25),

<sup>3</sup> W tym celu można stosować również grafikę W. P. Pettelina (36).

<sup>4</sup> Analogicznie W. C. Krumbein (27) zaproponował wprowadzenie skali zeta, która stanowi przekształcenie skali Atterberga, a W. P. Baturin (1) — skalę gamma dla zamiany dziesiętnej klasyfikacji.

ZESTAWIENIE GŁÓWNYCH STATYSTYCZNYCH WSKAZNIKÓW UZIARNIENIA GRUNTÓW SYPKICH  
WYRAZONYCH W SKALI PHI

Tabela I

Statystyczne wskaźniki uziarnienia		Oryginalna, nazwa, autor, rok	W z ó r
TENDENCJI CENTRALNEJ	Mediana	Phi Median Diameter (D. L. Inman, 1952)	(1) $Md_{\phi} = \phi_{50}$
	Średnia średnica	Phi Mean Diameter (D. L. Inman, 1952)	(2) $M_{\phi} = \frac{1}{2} (\phi_{15} + \phi_{84})$
Mean Size (R. L. Folk, W. C. Ward, 1957)		(3) $M_x = \frac{\phi_{15} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	
Mean Size (W. Harrison, M. P. Lynch, A. G. Altschaeffl, 1964)		(4) $M_x = \frac{\phi_5 + \phi_{15} + 4\phi_{50} + 2\phi_{84} + \phi_{95}}{10}$	
Odchylenie standardowe		Sorting coefficient (P. D. Trask, 1930, 1932)	(5) $So_{\phi} = \frac{\phi_{75} - \phi_{25}}{2}$
	Phi Quartile Deviation (W. C. Krumbein, 1936)	(6) $QD_{\phi} = \frac{1}{2} (Q_3_{\phi} - Q_1_{\phi})$	
	Phi Deviation Measure (W. C. Krumbein, 1936, G. H. Otto, 1939, D. L. Inman, 1952)	(7) $\sigma_{\phi} = \frac{1}{2} (\phi_{84} - \phi_{15})$	
	Inclusive Graphic Standard Deviation (R. L. Folk, W. C. Ward, 1957)	(8) $\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{15}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$	
	Simple Sorting Measure (G. M. Friedman, 1967)	(9) $So_S = \frac{1}{2} (\phi_{95} - \phi_5)$	
	Współczynniki asymetrii, skośności	Skewness coefficient (P. D. Trask, 1930, 1932)	(10) $Sk_{\phi} = \phi_{25} + \phi_{75} - 2\phi_{50}$
		Phi Quartile Skewness (W. C. Krumbein, 1936)	(11) $Sk_{q\phi} = \frac{1}{2} (Q_1_{\phi} + Q_3_{\phi}) - Md_{\phi}$
		Phi Skewness Measure (D. L. Inman, 1952)	(12) $\alpha_{\phi} = \frac{M_{\phi} - Md_{\phi}}{\sigma_{\phi}} = \frac{\phi_{15} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{\phi_{84} - \phi_{15}}$
		2nd Phi Skewness Measure (D. L. Inman, 1952)	(13) $\alpha_{2\phi} = \frac{\frac{1}{2} (\phi_5 + \phi_{95}) - Md_{\phi}}{\sigma_{\phi}} = \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{\phi_{84} - \phi_{15}}$
Skewness Ratio (D. L. Inman, 1952)		(14) $R_{\phi} = \frac{\alpha_{2\phi}}{\alpha_{\phi}}$	
Inclusive Graphic Skewness (R. L. Folk, W. C. Ward, 1957)		(15) $Sk_I = \frac{\phi_{15} + \phi_{84} + 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{15})}$	
Simple Skewness Measure (G. M. Friedman, 1967)		(16) $\alpha_S = (\phi_{95} + \phi_5) - 2(\phi_{50})$	
EKSCESU (KURTOZY)		Współczynniki kurtozy	Phi Inclusive Measure (D. L. Inman, 1952)
	Graphic Kurtosis (R. L. Folk, W. C. Ward, 1957)		(18) $K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$ lub
	(19) $K_{G'} = \frac{K_G}{K_G + 1}$		

skale 1iniową D. L. Inman (13, str. 127), bądź też najwygodniej przy pomocy szczegółowej tabeli przeliczeniowej H. P. Page (35), J. C. Griffiths i D. D. Mc Intyre (8). Ostatnio R. L. Folk (3) podał metodę szybkiego przeliczenia skali phi na mm za pomocą zwykłego suwaka logarytmicznego, a G. C. Grender (9) podał wzór na przeliczenie mm na wartości skali phi

$$(mm = \text{anty log. } \frac{-\phi}{3.322}).$$

Znacznie szybszą, uproszczoną metodą obliczania tych wskaźników, a odpowiadających wyliczonym metodą momentów, z dostateczną dla praktyki dokładnością, jest metoda graficzno-analityczna. W metodzie tej wyniki uziarnienia przedstawione są na wykresach, gdzie oś rzędnych stanowi skala prawdopodobieństwa, zaś oś odciętych skala arytmetyczna, bądź logarytmiczna. Twórcą papieru prawdopodobieństwa był A. Hazen, 1914, a pierwszymi, którzy zaproponowali jego użycie w badaniach osadów byli T. Hatch i S. P. Choate, 1929, proponując wyniki uziarnienia nanosić na arytmetyczny papier prawdopodobieństwa. Z kolei od momentu wprowadzenia przez W. C. Krumbaina skali phi stała się ona najczęściej używaną skalą dla osi odciętych. G. H. Otto (34) przystosował papier prawdopodobieństwa Hazena dla wykreślenia krzywych kumulacyjnych, otwierając drogę dla wykreslno-analitycznej metody statystycznych wskaźników uziarnienia opartych na metodzie momentów.

Przydatność stosowania skali phi oraz skali prawdopodobieństwa (siatka prawdopodobieństwa) dla przedstawienia wyników uziarnienia uwydatnia się jeszcze bardziej w związku z zagadnieniem, jaki typ rozkładu reprezentuje uziarnienie różnych genetycznych osadów. Wykazano bowiem, że duża część osadów posiada w przybliżeniu rozkład lognormalny; przedstawienie wyników uziarnienia w siatce prawdopodobieństwa daje linię prostą, a odchylenia od prostej m. in. świadczą mogą o innym typie rozkładu. Problem ten znalazł swoje odbicie w licznych pracach (np. 6, 7, 30, 38, 39, 40, 45, 46, 49, 50, 53).

Na podstawie przedstawionych wyników uziarnienia określono szereg statystycznych wskaźników uziarnienia, najczęściej wyrażonych w jednostkach phi, charakteryzujących dokładnie krzywą kumulacyjną, przy czym najpełniej rozwinięli te zagadnienia D. L. Inman (13, 14) oraz R. L. Folk i W. C. Ward (5).

Schemat wyznaczania statystycznych wskaźników uziarnienia w układzie skala phi — skala prawdopodobieństwa (siatka prawdopodobieństwa) przedstawiono na rycinie. Zasadniczy warunek i różnica w stosowaniu statystycznych wskaźników uziarnienia podanych przez Inmana oraz Folka i Warda polega na określeniu, po wykonaniu analizy uziarnienia, modalności rozkładu uziarnienia danego gruntu. W przypadku, gdy rozkład ten jest jednomodalny (zbliżony do rozkładu normalnego) należy stosować wskaźniki uziarnienia podane przez D. L. Inmana (13), zaś w przypadku dwu lub wielomodalnych rozkładów uziarnienia — wskaźniki podane przez R. L. Folka i W. C. Warda (5).

Dla wskazania dwu oraz wielomodalnego charakteru krzywych uziarnienia (czyli charakteryzują się liczne osady np. rzeczne) B. K. Sahu (44) proponuje obliczanie nowego wskaźnika statystycznego, tzw. wskaźnika modalności  $m\phi$  (modality index), wyrażonego wzorem:

$$m\phi = 1 + \frac{\phi_e - \phi_1}{2\sigma_1}$$

gdzie:

$\phi_e$  — wartość wyrażona w jednostkach phi, ostatniej (najdrobniejszej) wartości modalnej,

5 F. J. Pettijohn (38, str. 40) tak skomentował wspomniany problem: „...liczne osady nie są log-normalne, a nawet te, które są nimi w przybliżeniu wykazują odchylenia od typowego (ściśłego) rozkładu lognormalnego”.

Wartości poszczególnych graficznych statystycznych wskaźników uziarnienia wg R. L. Folka i W. C. Warda, 1957, wyrażonych w skali $\phi$	Klasyfikacja
1	2
Graficzny współczynnik wysortowania (Inclusive Graphic Standard Deviation) $\sigma_1$	Wysortowanie osadów
< 0,35	bardzo dobre
0,35 — 0,5	dobre
0,5 — 1,0	średnie
1,0 — 2,0	słabe
2,0 — 4,0	bardzo słabe
> 4,0	wyjatkowo słabe
Graficzna skośność (Inclusive Graphic Skewness) $Sk_1$	Asymetria krzywych
— 1,00 ÷ — 0,30	bardzo ujemnie skośne (very negative-skewed)
— 0,30 ÷ — 0,10	ujemnie skośne (negative skewed)
— 0,10 ÷ + 0,10	prawie symetryczne (nearly symmetrical)
+ 0,10 ÷ + 0,30	dodatnio skośne (positive-skewed)
+ 0,30 ÷ + 1,00	bardzo dodatnio skośne (very positive skewed)
Graficzny eksces (Graphic kurtosis)	Splaszczanie (eksces) krzywych
$K_G$ $K_G' = \frac{K_G}{K_G + 1}$	bardzo platykurtyczne (płaskie, b. szerokie maksima) — very platykurtic
< 0,67    < 0,40	platykurtyczne (ładne, szerokie maksima) — platykurtic
0,67 — 0,90    0,40 — 0,47	platykurtyczne (wyróżnione maksima) — platykurtic
0,90 — 1,11    0,47 — 0,53	mezokurtic
1,11 — 1,50    0,53 — 0,60	leptokurtyczne (ostre wąskie maksima) — leptokurtic
1,50 — 3,00    0,60 — 0,75	bardzo leptokurtyczne (b. wyraźne maksima) — very leptokurtic
> 3,00    > 0,75	skrajnie leptokurtyczne (wyjątkowo ostro zaznaczone maksima) extremely leptokurtic

$\phi_1$  — wartość wyrażona w jednostkach phi, pierwszej (najgrubszej) wartości modalnej,

$\sigma_1$  — wartość graficznego odchylenia standardowego wg definicji Folka i Warda.

Podane przez Inmana oraz Folka i Warda statystyczne wskaźniki uziarnienia stanowią przybliżone graficzne analogie do miar momentów używanych w statystyce matematycznej. Zaletą przedstawionych przez Folka i Warda wskaźników statystycznych jest możliwość ich stosowania dla rozkładów normalnych oraz niernormalnych. Dlatego też znajdują one obecnie bardzo szerokie zastosowanie w pracach sedimentologicznych, głównie amerykańskich. Są również coraz częściej stosowane w pracach polskich (vide R. Unrug i A. Calikowski, 56, R. Unrug, 55, T. Jerzykiewicz 15, 16, Z. Dembowski 2, A. Słaczka, R. Unrug, 48, A. Teofilak 51). Zestawienie głównych statystycznych

Tabela III

Przedziały wartości statystycznych wskaźników uziarnienia				
$\sigma\phi$	$S_0^*$	Wysortowanie osadów	$\sigma$	$\sigma_I$
wg G. M. Friedmana, 1962			wg autora, 1967	
< 0,35	< 1,17	Bardzo dobrze wysortowane	< 0,35	< 0,30
0,35 — 0,50	1,17 — 1,20	dobrze wysortowane	0,35 — 0,47	0,30 — 0,44
0,50 — 0,80	1,20 — 1,35	średnio dobrze wysortowane	0,47 — 0,70	0,44 — 0,72
0,80 — 1,40	1,35 — 1,87	średnio wysortowane	0,70 — 1,15	0,72 — 1,27
1,40 — 2,00	1,87 — 2,75	slabo wysortowane	1,15 — 1,61	1,27 — 1,82
2,00 — 2,60	> 2,75	bardzo slabo wysortowane	1,61 — 2,06	1,82 — 2,37
> 2,60		wyjatkowo slabo wysortowane	> 2,06	> 2,37

\* w badaniach, gdzie uziarnienie jest wyrażone w mm.

Tabela IV

Nr próbek	Charakterystyczne parametry krzywej uziarnienia badanych próbek wyrażone w jednostkach skali phi											
	$\phi_5$ $d_{95}^*$	$\phi_{10}$ $d_{90}$	$\phi_{16}$ $d_{84}$	$\phi_{25}$ $d_{75}$	$\phi_{40}$ $d_{60}$	$\phi_{60}$ $d_{40}$	$\phi_{70}$ $d_{30}$	$\phi_{75}$ $d_{25}$	$\phi_{80}$ $d_{20}$	$\phi_{84}$ $d_{16}$	$\phi_{90}$ $d_{10}$	$\phi_{95}$ $d_5$
1	1,73	2,02	2,21	2,41	2,68	2,84	3,17	3,26	3,39	3,56	3,90	4,32
2	0,92	1,15	1,32	1,50	1,74	1,88	2,20	2,28	2,38	2,50	2,71	2,98
3	0,82	1,07	1,24	1,43	1,68	1,83	2,38	2,60	2,85	3,08	3,50	4,00

\*  $d_{95}$ ,  $d_{90}$  — wartości parametrów krzywej uziarnienia (wyrażone w mm) odpowiadające przytoczonym parametrom  $\phi_5$ ,  $\phi_{10}$  itd uzyskane przez zmianę jednostek skali phi na mm (vide np. 35), z uwzględnieniem zmiany układu odwzorowania.

Tabela V

Nr próbki	Główne statystyczne wskaźniki uziarnienia badanych próbek wyrażone w jednostkach skali phi (kolejność wg wzorów w tabeli I)																		
	$Md\phi$	$M\phi$	$M_z$	$M_x$	$So\phi$	$QD\phi$	$\sigma\phi$	$\sigma_I$	$So_s$	$Sk\phi$	$Sk_q\phi$	$\alpha\phi$	$\alpha_s\phi$	$R\phi$	$Sk_I$	$\alpha_s$	$\beta\phi$	$K_G$	$K_G'$
1	2,84	2,885	2,87	2,895	0,425	0,425	0,675	0,73	1,295	-0,01	-0,005	0,0(6)	0,274	4,(15)	4,(21)	0,37	0,918	1,249	0,555
2	1,88	1,91	1,90	1,906	0,39	0,39	0,59	0,607	1,03	0,02	0,01	0,05	0,119	2,38	3,25	0,14	0,746	1,082	0,520
3	1,83	2,16	2,05	2,078	0,585	0,585	0,92	0,94	1,59	0,37	-1,12	0,36	0,630	1,76	2,35	1,16	0,728	1,114	0,527

wskaźników uziarnienia wyrażonych w skali phi podano w tabeli I.

Na podstawie uzyskanych z badań wartości graficzno-analitycznych statystycznych wskaźników uziarnienia ( $\sigma_I$ ,  $Sk_I$ ,  $K_G$  i  $K_G'$ ) R. L. Folk i W. C. Ward (5) zaproponowali dla gruntów sypkich klasyfikację pod względem wysortowania, asymetrii i spłaszczenia krzywych kumulacyjnych, co przedstawiono w tabeli II.

G. M. Friedman (6) wyznaczył korelację empiryczną między wskaźnikami charakteryzującymi wysortowanie osadów, a więc wskaźnikami Traska  $S_0$ , Inmana  $\sigma$  oraz Fólka i Warda  $\sigma_I$ , a odchyleniem standardowym stanowiącym najbardziej ścisłą miarę dla opisu charakteru wysortowania. Odchylenie standardowe określone jest przez równanie:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum f(m_\phi - \bar{x}_\phi)^2}{100}}$$

gdzie:

$$\bar{x}_\phi = \frac{1}{100} \sum f m_\phi \text{ — wartość przeciętna wyrażona w } \phi,$$

$f$  — % zawartości ziarn o średnicy odpowiadającej danemu podziałowi sit,

$m_\phi$  — punkt środkowy każdego przedziału sit w wartościach  $\phi$ .

G. M. Friedman (6) podał następujące równania regresji między wartościami odchylenia standardowego a wskaźnikami wysortowania Fólka i Warda  $\sigma_I$  oraz wskaźnikiem wysortowania Inmana  $\sigma$

$$\sigma_I = 0,9174 \sigma\phi - 0,0173$$

$$\sigma = 0,8284 \sigma_I + 0,1017$$

Zależność między odchyleniem standardowym  $\sigma\phi$  a wskaźnikiem Traska  $S_0$  przedstawił w postaci graficznej G. M. Friedman (6, fig. 9, str. 749). Na podstawie przedstawionych równań autor obliczył wartości wskaźników wysortowania Fólka i Warda ( $\sigma_I$ ) oraz Inmana ( $\sigma$ ) odpowiadające klasyfikacji wysortowania osadów w oparciu o wartości wskaźników Traska  $S_0$  i odpowiadających im wartości odchylenia standardowego wg Friedmana  $\sigma\phi$ , co przedstawiono w tabeli III.

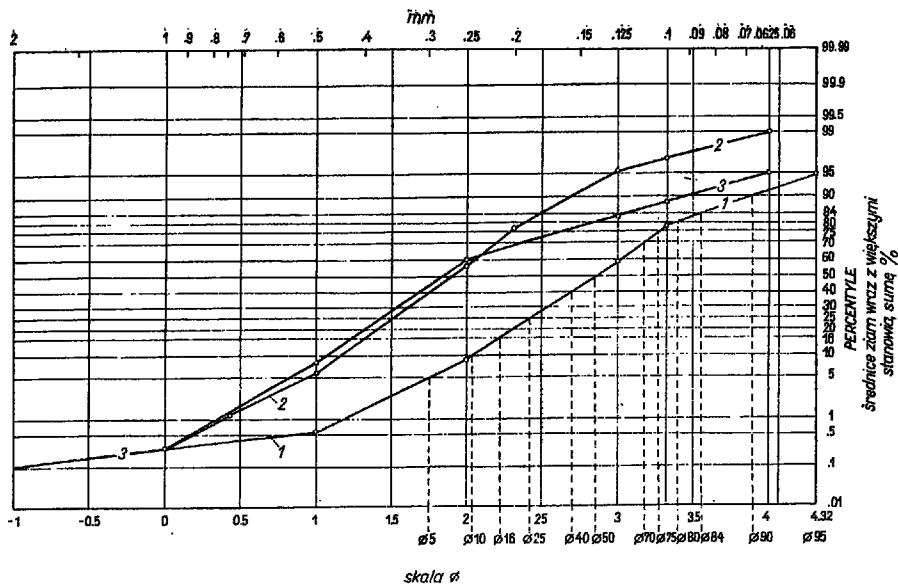
Z wspomnianych powyżej metod określania statystycznych wskaźników uziarnienia gruntów sypkich najdokładniejszą charakterystykę krzywej kumulacyjnej uziarnienia gruntów daje metoda momentów. Przewaga metody momentów nad metodą kwartyli polega m. in. na tym, że:

1) przy obliczaniu s.w.u. tą metodą uwzględnia się zawartość procentową wszystkich frakcji, gdy wielkość kwartyli może nie ulegać zmianie przy zmianie ciężaru skrajnych lub zawartych między kwartyliami frakcji,

2) wyliczenie s.w.u. można przeprowadzić wyłącznie analitycznie bez wstępnego graficznego obrazu.

Natomiast niedogodnością tej metody jest jej duża pracochłonność.

Najszybszą, choć uproszczoną metodą obliczania tych wskaźników, a odpowiadających wyliczonym za pomocą metody momentów, z wystarczającą dla praktyki dokładnością jest metoda graficzno-analityczna. Metoda ta ze względu na swoje zalety oraz fakt coraz częstszego używania jej (przede wszystkim w pracach



Schemat wyznaczania statystycznych wskaźników uziarnienia na siatce prawdopodobieństwa.

1, 2, 3 — numery badanych próbek; objaśnienia wg tekstu.

Scheme of determination of the statistical indices on the graph paper probability.

1, 2, 3 — numbers of the investigated samples.

amerykańskich) dla charakterystyki osadów nie tylko sypkich i spoistych, ale nawet i litych, zasługuje na znacznie szersze zastosowanie jej w pracach polskich geologów.

Poniżej podano własne wyniki badań granulometrycznych przykładowo wybranych 3 próbek piasków. Próbkę nr 1 stanowi piasek drobnoziarnisty (kreda dolna) z Białej Góry k. Tomaszowa Mazowieckiego; próbkę nr 2 — piasek średnioziarnisty (deluwialny, plejstocen) z Walentynowa, próbkę nr 3 — piasek średnioziarnisty (wydmowy, holocen) z Kostusina.

Próbki nr 2 i 3 reprezentują piaski obszaru przelomowego odcinka Wisły środkowej i wyżyn przyległych, których bliższą charakterystykę własności fizycznych i mechanicznych przedstawiono wcześniej (47). Uziarnienie trzech wybranych próbek przedstawiono na ryc., a charakterystyczne parametry dla obliczenia statystycznych wskaźników uziarnienia tych piasków przytoczono w tabeli IV. Statystyczne wskaźniki uziarnienia obliczone metodą graficzno-analityczną (według wzorów podanych w tabeli I) przedstawiono w tabeli V. Znaczenie obliczania głównych statystycznych wskaźników uziarnienia gruntów sypkich opublikowane będzie w jednym z najbliższych numerów „Przeglądu Geologicznego”.

#### LITERATURA

1. Baturin W. P. — Paleogeograficzekij analiz geologiczeskowo prozłogo po tierriiennym komponentam. Ak. Nauk ZSRR, 1947.
2. Dembowski Z. — Rozwój i wykształcenie warstw ilastkich w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. IG Biul. 204 Warszawa 1967.
3. Folk R. L. — Rapid Phi-millimeter conversion by ordinary slide rule. Jour. Sed. Petr., 1964, vol. 34, nr 3.
4. Folk R. L. — A review of grain-size parameters. Sedimentology, 1966, vol. 6, nr 2.
5. Folk R. L., Ward W. C. — Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Jour. Sed. Petr., 1957, vol. 27, nr 1.
6. Friedman G. M. — On sorting, sorting coefficients, and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones. Jour. Geol., 1962, vol. 70, nr 6.
7. Friedman G. M. — Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. Jour. Sed. Petr., 1967, vol. 37, nr 2.
8. Griffiths J. C. i McIntyre D. D. — A table for the conversion of millimeters to phi units. Mineral. Ind. Expt. Sta., Penna. State Univ., University Park, Pennsylvania, 1958.

9. Grender G. C. — Note on measurement of grain size in phi units. Jour. Sed. Petr., 1961, vol. 31, nr 4.
10. Harrison W., Lynch M. P. and Altschaeffl A. G. — Sediments of lower Chesapeake Bay, with emphasis on mass properties. Ibidem, 1964, vol. 34, nr 4.
11. Hazen A. — Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration. Massachusetts State Board of Health, Pub. Doc., nr 34. 1892.
12. Hazen A. — Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply. Trans. Am. Soc. Civil Engrs., 1914, vol. 77.
13. Inman D. L. — Measures for describing the size distribution of sediments. Jour. Sed. Petr., 1952, vol. 22, nr 3.
14. Inman D. L. — Sediments: Physical properties and mechanics of sedimentation. In Shepard F. P., „Submarine geology” Ch. V, Harper Row, Publishers, New York, Evanston and London, 1963.
15. Jerzykiewicz T. — Sedymentacja górnych piaskowców dolowych Gór Stołowych i okolic Krzeszowa (Górny turon niecki śródsudeckiej). Rozprawa doktorska. Wrocław, 1966.
16. Jerzykiewicz T. — Środowisko sedymentacyjne piaskowców Szczelińca. Acta Geol. Pol., 1966, vol. XVI, nr 4.
17. Kollis W. — Skład granulometryczny aluwiołów dennych Wisły pod Warszawą. Arch. Hydrotechn., 1961, t. VIII, z. 1, PWN Warszawa.
18. Kollis W. — Wpływ metody wyznaczania współczynnika przepuszczalności na dokładność wyników w warunkach aluwiołów dennych Wisły. Ibidem, 1961, t. VIII, z. 2, PWN Warszawa.
19. Kozerski B. — Zależność współczynnika odsączalności od uziarnienia skał sypkich. Biul. geol. U. W., t. 9. Warszawa, 1967.
20. Kozerski B. — Determination of the Specific Yield in Water-bearing Rocks on the Basis of their Granulation. Bull. Acad. Pol. Sc. Sér. Sc. géol. géogr., 1966, vol. XIV, nr 3.
21. Köster E. — Mechanische Gesteins- und Bodenanalyse. Leitfaden der Granulometrie und Morphometrie. Carl Hanser Verlag München 1960.
22. Köster E. — Granulometrische und morphometrische Messmethoden an Mineralkörnern, Stein und sonstigen Stoffen, Ferdinand Enke Stuttgart 1964.
23. Krumbein W. C. — A history of the principles and methods of mechanical analysis. Jour. Sed. Petr., 1932, vol. 2, nr 2.
24. Krumbein W. C. — Size frequency distribution of sediments, Ibidem. 1934, vol. 4, nr 2.
25. Krumbein W. C. — Application of logarithmic moments to size frequency distribution of sediments. Ibidem, 1936, vol. 6, nr 1.
26. Krumbein W. C. — The use of quartile measures in describing and comparing sediments. Amer. Jour. Science, 1936, vol. 32, nr 188.
27. Krumbein W. C. — Korngrösseinteilungen und statistische Analyse. Neues Jahrb. f. M., etc., Beil.-Bd 73, Abt. A., 1938.



28. Krumbein W. C. — Size frequency distributions of sediments and the normal phi curve. *Jour. Sed. Petr.*, 1938, vol. 8, nr 3.
29. Krumbein W. C. — I. Sampling Preparation for Analysis, Mechanical Analysis and Statistical Analysis. In Krumbein W. C. i Pettijohn F. J. „Manual of Sedimentary Petrography”. Appleton — Century Crofts, Inc. New York London, 1938.
30. Krumbein W. C. i Graybill F. A. — An introduction to statistical models in geology. McGraw — Hill Book Co., New York — St. Louis — San Francisco — Toronto — London — Sydney, 1955.
31. Kukul Z. — Geologie recentnich sedimentu: Nahl. Cslov. Akad. Véd, Praha, 1964.
32. Lohse E. A. — A theoretical curve for statistical analysis of sediments. *Jour. Sed. Petr.*, 1955, vol. 25, nr 4.
33. Luthin J. N. — Drainage engineering. John Wiley Son, Inc. New York — London — Sydney 1966.
34. Otto G. H. — A modified logarithmic probability graph for the interpretation of mechanical analyses of sediments. *Jour. Sed. Petr.*, 1939, vol. 9, nr 2.
35. Page H. G. — Phi-millimeter conversion table. *Ibidem*, 1955, vol. 25, nr 4.
36. Petelin W. P. — Uskoriennyj sposob opriedieleniya median i kwantiliej. *Biul. Mosk. Obszcz. Isp. Prirody*, otd. Geol., 1956, XXXI, 1.
37. Pettijohn F. J. — Sedimentary rocks (1st. ed.) Harper Broth, New York, 1949.
38. Pettijohn F. J. — Sedimentary rocks (nd ed.) Harper Broth, New York, 1957.
39. Rivière A. — Sur la représentation graphique de la granulométrie des sédiments meubles. *Interprétation des courbes et applications. Bull. Soc. Geol. France*, 1952, 6-e sér. t. 2, f. 1-3.
40. Rogers J. J. W. — Détection of lognormal size distributions in clastic sediments. *Jour. Sed. Petr.*, 1959, vol. 29, nr 3.
41. Rosfelder A. — Contributions à l'analyse texturale des sédiments. *Publ. Serv. Carte Géol. Algérie*, n. ser. 1961, Bull. 29.
42. Ruchin L. B. — Granulometricheskij metod izuczenija pleskow. Leningrad, 1947.
43. Ruchin L. B. — Osnovy litologii. Gostoptiechizdat. Moskwa—Leningrad, 1953.
44. Sahu B. K. — Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. *Jour. Sed. Petr.*, 1964, vol. 34, nr 1.
45. Sındowski K. H. — Die synoptische Methode des Kornkurven-Vergleiches zur Ausdeutung fossiler Sedimentationsräume. *Geol. Jb. Bd 73*, 1958.
46. Spencer D. W. — The interpretation of grain size distribution curves of clastic sediments. *Jour. Sed. Petr.*, 1963, vol. 33, nr 1.
47. Stochlak J. — Charakterystyka własności fizyczno-mechanicznych sypkich utworów czwartorzędowych przelomowego odcinka doliny Wisły Środkowej i wyżyn przyległych. *Mat. Symp. Nauk. w Kazmierzu Dln. „Geologiczne problemy zagospodarowania Wisły Środkowej od Sandomierza do Puław”*. 27-29.IX.65 r. NOT Zarz. Gł. SITGórnikowa, Katowice, 1965.
48. Ślącicka A., Unrug R. — Z badań nad strukturami sedymentacyjnymi i petrografią niektórych serii piaskowcowych z łupków menilitowych Karpat. *Rocz. PTGeol.* 1966, t. XXXVI z. 2.
49. Tanner W. F. — The zig-zag nature of type I and type II curves. *Jour. Sed. Petr.*, 1958, vol. 28.
50. Tanner W. F. — Modification of sediment size distributions. *Ibidem*, 1964, vol. 34, nr 1.
51. Teofilak A. — Skład granulometryczny skał okrucowych a ich pochodzenie. *Prz. Geol.*, 1966, r. XIV, nr 3.
52. Trask F. D. — Mechanical analysis of sediments by centrifuge. *Econ. Geology*, 1930, vol. 25.
53. Trask P. D. — Origin and environment of source sediments of petroleum. *Gulf Publ. Co Houston, Texas* 1932.
54. Udden J. A. — Mechanical composition of clastic sediments. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1914, vol. 25.
55. Unrug R. — Warstwy łebniańskie — studium sedymentologiczne. *Rocz. PTGeol.* 1963, t. XXXIII, z. 1.
56. Unrug R., Całikowski A. — Sedymentacja i petrografia warstw poloniskich. *Rocz. PIG*, 1960, t. 30, z. 2.
57. Wentworth C. K. — A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Jour. Geol.*, 1922, vol. 30.
58. Yule G. U. i Kendall M. G. — *Wstęp do teorii statystyki*. PWN Warszawa 1966.

## SUMMARY

A possibility of comparison of the results of studies on various soils from various regions is a base of a wide application of granulometrical analysis in geological researches. An analysis of the rich literature devoted to this problem, made by the present author, illustrates that a considerable inhomogeneity of methods of presenting the results of studies on grain-size distribution of sediments exists. The paper presents numerous statistical indices of grain-size distribution of sediments and gives theoretical bases to examine the grain-size distribution of sediments, definition, main statistical indices of grain-size distribution and methods of determination of these indices. Among the analytical and graphic-analytical methods presented above, the latter is thought by the author to be the better one. The graphic-analytical methods is quicker and simplified one, more useful in calculating the indices characterized by adequate precision for practical purposes and corresponding in this respect to the indices precisely calculated by means of analytical methods (method of moments).

The results of grain-size distribution are presented in the form of grain-size distribution curves in a system: scale of probability — scale phi ( $\phi$ ), (in the graph paper of probability, Fig. 1). The usability of such a system applied to present the results of grain-size distribution can still more be visible when solving the problem of the distribution type that represents the grain-size distribution of genetically various deposits (normal distributions, lognormal distributions a.o.). A comparison of the main statistical indices of grain-size distribution, presented in scale phi, is given in Table I.

Based on the equations of regression and on the diagrams of dependence between the standard deviation  $\sigma\phi$  presented by G. M. Friedman (1962), and the coefficient of sorting of P. D. Trask (1930, 1932), the present author gives a new classification of deposits based on the value of the standard deviation of D. L. Inman (1952), and on the inclusive graphic standard deviation  $\sigma_j$  of R. L. Folk and W. C. Ward (1957), as it can be seen in Table III.

## РЕЗЮМЕ

Возможность широкого применения гранулометрического анализа в геологических исследованиях зависит, между прочим, от возможности сопоставления данных различных (генетически, по возрасту и т. д.) грунтов из разных районов. Проведенный автором анализ богатой литературы по этим проблемам показал, что существует большое разнообразие методов изображения результатов гранулометрических исследований сыпучих грунтов. В статье дается подробное описание статистических показателей гранулометрического состава сыпучих грунтов, теоретических основ гранулометрического исследования грунтов и методов определения показателей. Из всех аналитических и графически-аналитических методов автор дает предпочтение последним. Графически-аналитический метод позволяет значительно быстрее и с практически достаточной точностью определять показатели.

Результаты гранулометрического анализа изображаются в виде кумулятивных кривых в системе шкала вероятности — шкала phi ( $\phi$ ) (Фиг. 1). Пригодность применения такой системы становится еще более очевидной при рассмотрении видов распределения гранулометрического состава разных генетически осадков (нормальные, логнормальные распределения и т. д.). Главные статистические гранулометрические показатели в шкале phi приведены в табл. I.

На основании уравнений регрессии Г. М. Фридмана (1962) и графиков зависимости между стандартным отклонением  $\sigma\phi$  и коэффициентом сортировки П. Д. Траска (1930, 1932) автор составил новую классификацию сортировки осадков, основывающуюся на величине стандартного отклонения Д. Л. Инмана (1952) и графического коэффициента сортировки Р. Л. Фолька и В. Ц. Уорда (1957), что представлено в табл. III.