BOGUMIŁ KRYGOWSKI
Uniwersytet im. A. Mickiewicza

O PRZYDATNOŚCI METODY MECHANICZNEGO OZNACZANIA OBRÓBKI ZIARNA PIASKU LUB ŻWIRU

METODY sedymentologiczne w badaniach procesów morfotwórczych mają podstawowe znaczenie. Jest to chyba powszechna opinia. Obecnie każde niemal badanie utworu klastycznego zaczyna się m. in. od analizy składu mechanicznego, który, jak wiadomo, mówi wiele o środowisku, w jakim dany utwór powstawał.

Drugim obok uziarnienia (składu mechanicznego) elementem w badaniach granulometrycznych, ocenianym coraz wyżej, jest kształt i obtoczenie lub ogólniej tzw. obróbka ziarna.

Podstawowe prace z tego zakresu: Cailleux (2), Kuenena (12), Tricarta (2), Wadella (14, 15), Wentwortha (16, 17) i in. dowiodły, iż poszczególne środowiska sedymentacyjne takie, jak: pustynne, rzeczne, morskie, jeziorne, glacjalne, peryglacjalne i in. znalazły swe odzwierciedlenie w kształcie ziarna oraz w stopniu jego obróbki.

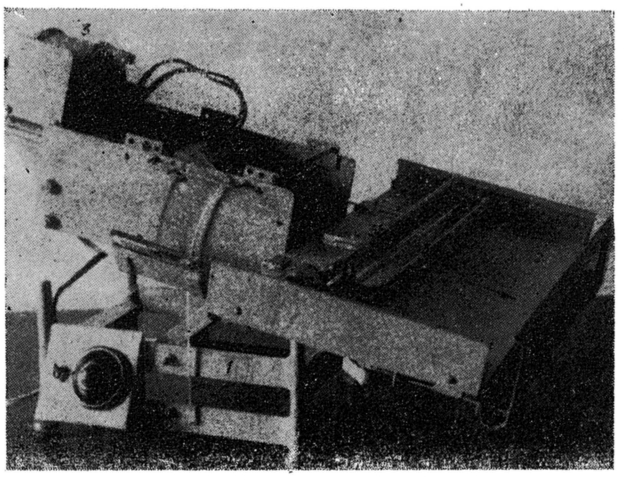
Wyniki te zostały uzyskane za pomocą metod optyczno-pomiarowych, ściślej geometrycznych. Np. metoda Cailleux podobnie jak i inne metody tego typu dają dobre wyniki, ale są bardzo żmudne, zatem bardzo kosztowne i w pewnym stopniu subiektywne.

W związku z tym już w 1937 r. (3) zaproponowano metodę mechanicznego określania stopnia obróbki ziarna piasku lub żwiru, która jest dużo szybsza, a więc bardziej ekonomiczna i daje wyniki, co jest godne podkreślenia, niemal absolutnie obiektywne.

Metoda ta, którą doskonalono w ciągu wielu lat (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13) opiera się na rozdziale (segregacji) ziarna za pomocą równi pochyłej, będącej podstawowym elementem tzw. graniformametrów (5, 6), tj. aparatów do mechanicznego mierzenia, określania kształtu ziarna (ryc. 1).

Przy małym nachyleniu równi stacza się ziarno okrągłe, obtoczone (dobrze obrobione) oddzielając się od badanej na graniformametrze próbki, przy coraz to większym nachyleniu — ziarno bardziej graniaste, nieobtoczone (nieobrobione) pozostaje. Doświadczenia wykazały, iż rozdział (segregacja) dokonuje się w granicach od 0° do maksymalnie 26°. Jest to skrajne nachylenie, powyżej którego ziarno na równi pochyłej już się nie utrzymuje.

Obraz rozdziału próbki ziarna według stopnia obróbki może być wyrażony, np. za pomocą histogramu (ryc. 3 i 4), na którym poszczególne słupki ozna-



Ryc. 1. Jeden z typów graniformametrów pomysłu B. Krygowskiego i T. Krygowskiego (konstrukcji inż. B. Jungermanna), na którym uzyskano przedstawione w niniejszym artykule wyniki.

Aparat składa się z następujących głównych części: 1) statywu, 2) równi pochyłej (szklanej zmatowionej płyty), 3) suwaka (spychacza) przesuwającego ziarno po płycie, 4) silniczka elektrycznego, który uruchamia suwak.
Obsługa aparatu jest następująca: ziarno wsypuje się między listwy suwaka 3a i 3b i nastawia się równię na odpowiedni kąt. Uruchomiony suwak spycha ziarno w dół płyty (jak to pokazuje strzałka), tj. w kierunku rynienki 2a. Przy małym nachyleniu równi zroluje się ziarno okrągłe i wpadnie w rynienkę, z której wybieramy go i przeliczamy (lub ważymy). To samo powtarzamy przy coraz to silniejszym nachyleniu równi, aż do całkowitego rozsegregowania nań badanej próbki (tj. do momentu, gdy z równi stoczy się ostatnie ziarno).

Fot. T. Sporakowski

czają % ziarna, jaki stoczył się przy danym nachyleniu równi pochyłej.

Z załączonych krzywych (ryc. 2), przedstawiających odchylenie standartowe w klasach kątowych dla dwóch próbek żwirów rzeki Bóbr (Sudety) wynika, że rozdział ziarna przy mniejszych nachyleniach, tj. mniej więcej do 12°, jest dokładniejszy (stąd mniejsze odchylenie standartowe), a powyżej 12° mniej dokładny. Dlatego w tych klasach kątowych notujemy większe odchylenie standartowe.

Ogólnie jak to z doświadczeń wynika, a zgodnie z prawem Amontona (1) mniej więcej przy nachyleniu równi pochyłej od 0° — 12° (skrajnie do 14°) ziarno stacza się (roluje), zaś powyżej 12° ześlizguje się.

Mimo tej niejednorodności w sposobie rozdziału (segregacji) ziarna przy różnym nachyleniu równi pochyłej, rzetelność (powtarzalność) wykonywanych analiz na graniformametrach jest bardzo dobra i osiąga, jak z załączonych wykresów (ryc. 3) wynika ok. 100% identyczności. Współczynnik korelacji bowiem między poszczególnymi wykresami, przedstawiającymi obróbkę tej samej próbki, waha się w granicach od 0,987 do 0,997*, co oznacza, iż korelacja jest niemal doskonała.

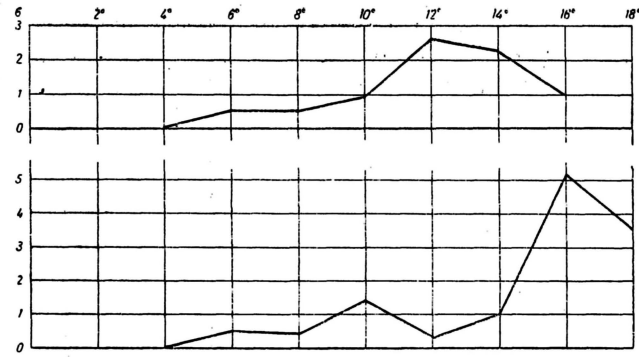
Ze względów praktycznych przyjęliśmy opis liczbowy (rachunkowy) wykresów (krzywych) rozdziału ziarna, wyrażony dwoma wzorami:

$$1)\qquad W_0 = \frac{\Sigma(n \cdot k)}{N}\,100 \text{ dla } \quad k = 1°,\ 3°,\ 5°, \ldots 25°$$

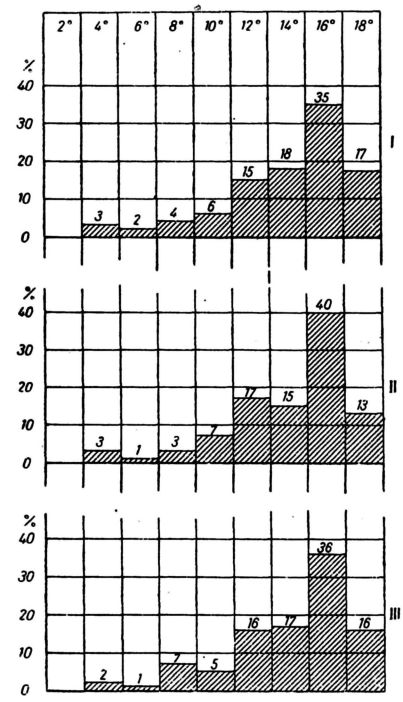
gdzie W_0 — wskaźnik stopnia obróbki, wyrażający średni stopień obróbki ziarna badanej próbki,
n — ilość ziarna wydzielona przy kącie k,
k — liczbowa wartość kąta, której są przyporządkowane poszczególne wartości n,
N — ilość ziarna w próbce.

$$2)\qquad N_m = \frac{\sqrt{N(\Sigma nk^2) - (\Sigma nk)^2}}{\Sigma nk}\,100$$

* Obliczono według wzoru Pearsona.



Ryc. 2. Krzywe odchyleń standardowych σ (sigma) w klasach kątowych dla próbek żwiru o średnicy 1—1,25 mm rzeki Bobru (Sudety), rozdzielonych na graniformametrze suwakowym.



Ryc. 3. Ilustracja rzetelności (reproduktywności) analiz wykonanych za pomocą graniformametru suwakowego na przykładzie próbki sandru z okolicy Gniezna. Rozdzielono próbę 100 ziarn o średnicy 1—1,25 mm. Histogramy (wykresy): I, II, III obróbki tej samej próbki sandru są niemal identyczne. Współczynnik korelacji r jest bardzo wysoki: r(I/II) = 0.987, r (II/III) = 0,992, r (I/III) = 0,997.

gdzie N_m — współczynnik (względnej) niejednorodności ziarna jest miarą niejednorodności ziarna względem wskaźnika obróbka W_0 danej próbki. Inne symbole literowe jak we wzorze 1.

W_0 określając średni stopień obróbki ziarna danej próbki, a N_m stopień niejednorodności obróbki, tj. wartość skośności krzywej rozdziału ziarna, dają wespół pełniejszą charakterystykę obróbki piasku danej próbki.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że rozpiętość wartości wskaźnikowych obróbki jest raczej znaczna. I tak, jeśli założyć, że próbka licząca 200 ziarn ma wyłącznie ziarno okrągłe**, obrobione, staczające się na graniformametrze przy nachyleniu od 0° — 2°, to według wyżej podanego wzoru (wzór 1) otrzymany wskaźnik wyniesie:

$$W_0 = \frac{200 \cdot 1}{200} \cdot 100 = 100$$

** Próbkę przygotowano sztucznie.

i przeciwnie, zakładając, iż próbka zawiera tylko bardzo graniaste ziarno, staczające się (ześlizgujące się) dopiero przy 26° otrzymamy wskaźnik

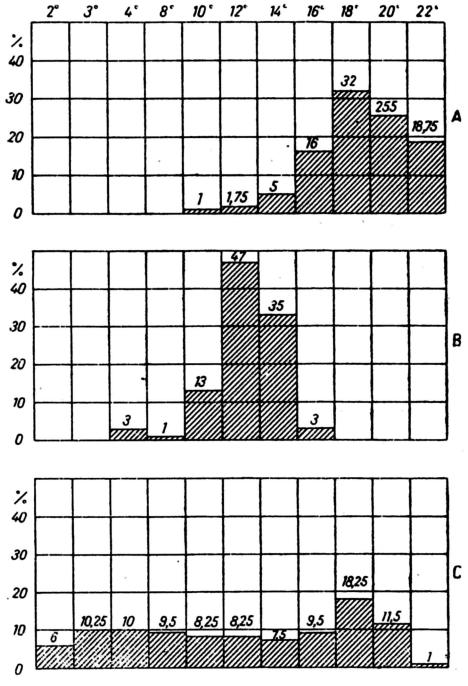
$$W_0 = \frac{200 \cdot 25}{200} \cdot 100 = 2500$$

Są więc podstawy do liczenia się z tym, iż wskaźniki obróbki ziarna próbek piasku różnych środowisk będą oscylowały w tych właśnie granicach, tj. od 100 do 2500. Częściowo potwierdza to załączone niżej zestawienie kilku wartości wskaźnikowych obróbki ziarna niektórych środowisk.

WARTOŚCI: A) WSKAŹNIKA STOPNIA OBRÓBKI W_0 ZIARNA KWARCOWEGO O ŚREDNICY 1 — 1,25 MM ORAZ
B) WSPÓŁCZYNNIKA NIEJEDNORODNOŚCI TEJ OBRÓBKI N_m

środowisko, z którego pobrano próbkę	W_0	N_m
A) żwir i piasek rzeki Kwisy, Sudety (próbka nr 58)	1755,5	14,43
B) glina morenowa bałtyckiego zlodowacenia z Naramowic k. Poznania	1130	16,48
C) piasek wydmowy z okolic Kalisza	1108	53,22

Z zestawienia wynika, iż duża różnica w wartościach wskaźnikowych zachodzi między ziarnem piasków Kwisy (A) a ziarnem gliny morenowej (B) i wydmy (C). Różnica ta osiąga wartość do 647,5, natomiast między gliną a wydmą jest minimalna i wynosi tylko 22, mimo iż, jak to widać z histogramów (ryc. 4), figury (histogramy) gliny i wydmy są zupełnie inne, co ujmuje N_m.



Ryc. 4. Wykresy obróbki ziarna kwarcu 1—1,25 mm niektórych środowisk, określonej za pomocą graniformametru suwakowego: A — żwir i piasek rzeki Kwisy (Sudety, $W_0 = 1755,5$, $N_m = 14,43$, B — glina morenowa z Naramowic koło Poznania, $W_0 = 1130$, $N_m = 16,48$, C — piasek wydmowy z okolicy Kalisza, $W_0 = 1108$, $N_m = 53,22$. Widoczne znaczne różnice w obróbce ziarna poszczególnych środowisk.

Same więc wartości W_0 są zawodne i właściwą „pozycję" stopnia obróbki określają łącznie, jak to już podano wyżej, wskaźnik obróbki W_0 oraz współczynnik niejednorodności tej obróbki N_m.

Na przytoczonym zestawieniu widzimy zatem, iż wprawdzie wartości W_0 gliny morenowej i wydmy są do siebie bardzo zbliżone, ale za to ich wartości współczynnika niejednorodności obróbki są zupełnie różne (16,48 i 53,22). Gdy więc glina bałtycka charakteryzuje się dość wysoką jednorodnością (duża skośność krzywej kumulacyjnej), to wydma przeciwnie, reprezentuje niemal skrajną niejednorodność (minimalna skośność).

II

Kolejne zagadnienie obok przedstawionych wyżej zasad graniformametrii mechanicznej, to korelacja między uzyskanymi wynikami za pomocą metod geometrycznych oraz mechanicznych.

Wskaźniki obtoczenia czy sferyczności, uzyskane za pomocą np. metod geometrycznych Cailleux czy Kuenena, określają tylko obtoczenie lub tylko sferyczność, a więc jedną cechę dotyczącą kształtu ziarna, gdy wskaźnik obróbki, uzyskany za pomocą metody mechanicznej, ujmuje łącznie szereg cech badanego ziarna: sferyczność, obtoczenie, a nawet w pewnym stopniu zmatowienie. Daje więc jakiś syntetyczny obraz ziarna jego powierzchni.

Mimo tej istotnej różnicy w ujmowaniu cech ziarna w obu metodach obraz graficzny obróbki ziarna tych samych próbek, skonstruowany na podstawie wartości liczbowych wskaźnika obróbki lub obtoczenia, uzyskany tymi dwoma metodami, jest, co godne podkreślenia, zadziwiająco podobny.

Demonstrują to załączone niżej krzywe (ryc. 5). Przedstawiają one obtoczenie (krzywe Cailleux i Kuenena) oraz obróbkę (krzywe Krygowskiego) 18 próbek piasków rzecznych potoku Główna, prawego dopływu Warty na obszarze Poznania, pobranych mniej więcej co 1 km na całej długości cieku ***.

Z krzywych tych łatwo wywnioskować następującą prawidłowość; bardziej graniaste ziarno źródłowej części potoku ulega, w miarę przesuwania go w dół cieku, stopniowemu obtoczeniu (obróbce) i zapewne selekcji. Analogiczny proces stwierdzamy poniżej każdego jeziorka (potok przepływa przez kilka jeziorek), gdzie świeżo pobrane z dna koryta (żłobionego w sandrze bądź glinie morenowej) ziarno jest bardziej graniaste, podobnie jak w partii źródłowej potoku. Ziarno w drodze do następnego jeziorka ulega obtoczeniu i zatrzymaniu przez nie. Dlatego ziarna tego, tj. ziarna bardziej obtoczonego (obrobionego) brak w początkowych odcinkach cieku poniżej jezior. Odcinki te mają w związku z tym przewagę ziarna bardziej graniastego, analogicznie jak źródłowy odcinek cieku.

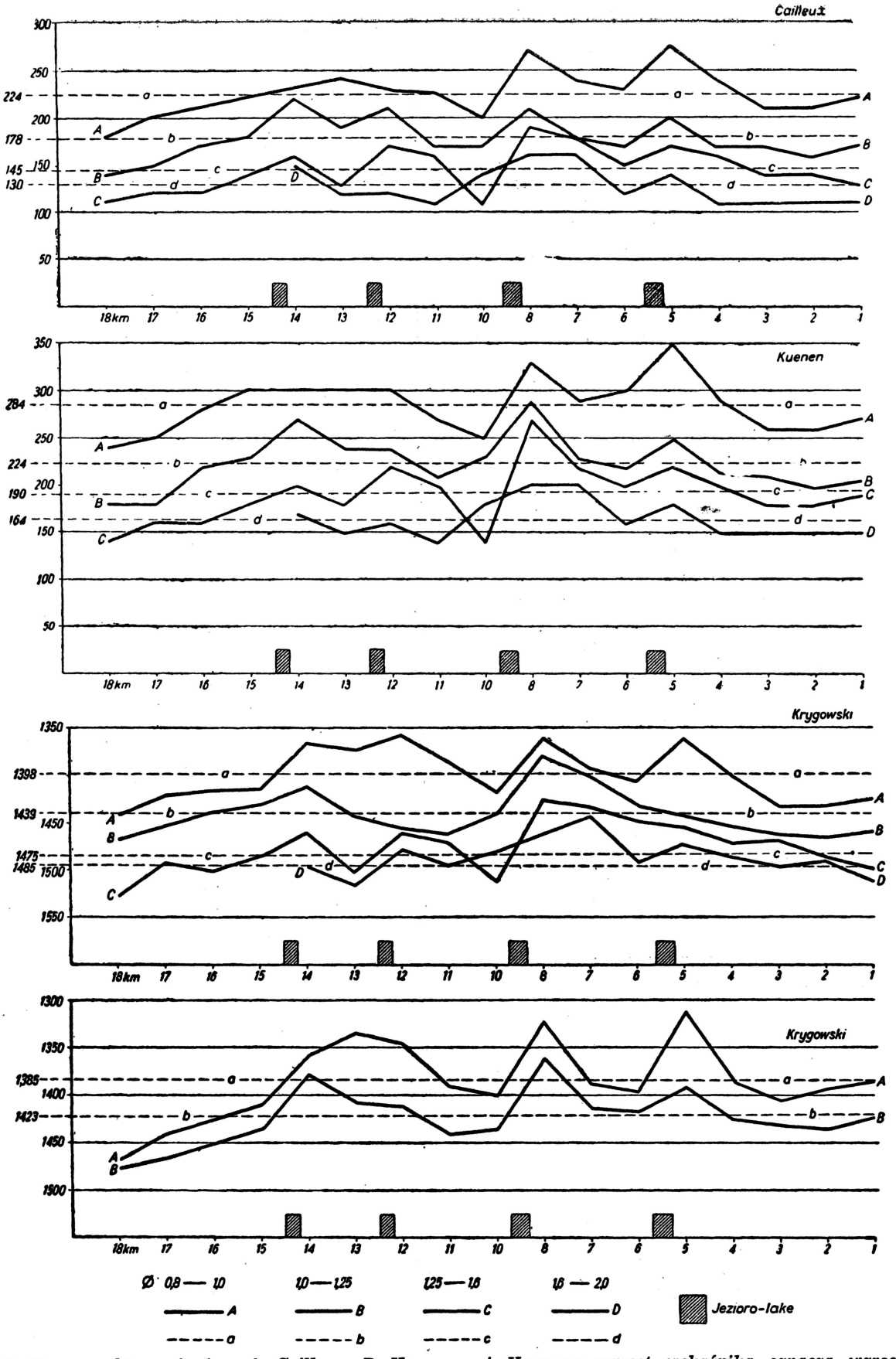
Z krzywych wyraźnie widać, iż stopień obróbki piasku omawianego potoku jest zróżnicowany i waha się w granicach:

od 170 — 275 (dif. 195) ... obtoczenie wg Cailleux (wartość wskaźnikowa dla ziarna o średnicy 0,8—1,0 mm),
od 240 — 350 (dif. 110) ... obtoczenie wg Kuenena,
od 1440 — 1366 (dif. 74) ... obróbka wg Krygowskiego.

Skala zróżnicowania obtoczenia czy obróbki piasku potoku, określona różnicą wartości skrajnych, jest więc na ogół mała, zwłaszcza, jeśli wziąć pod uwagę fakt, że w przypadku np. wskaźnika obróbki owo zróżnicowanie może osiągnąć teoretycznie wartość do 2500. Tyle bowiem wynosi różnica między skrajnymi wartościami tego wskaźnika.

W przedstawionych krzywych uderza jedno, i to należy podkreślić, mianowicie, że ich przebieg jest zdumiewająco zbliżony do siebie, mimo iż nie reprezentują one tej samej treści. Ta widoczna zgodność

*** Krzywe zostały wykreślone w ramach prac magisterskich przez E. Kościółek (1961 r.).



Ryc. 5. Krzywe obtoczenia (wg A. Cailleux, P. Kuenena) i obróbki (wg B. Krygowskiego) piasków rzeki Głównej (prawego dopływu Warty pod Poznaniem). Na rzędnej poziomej zaznaczono cokilometrowe odstępy (punkty poboru próbek) oraz miejsca występowania jeziorek (stawów). Na rzędnej pionowej zaznaczono wartości wskaźnikowe. U Cailleux i Kuenena wzrost wskaźnika oznacza wzrost obtoczenia, u autora (Krygowskiego) przeciwnie, wzrost wskaźnika oznacza mniejszy stopień obróbki. Dlatego też ze względów korelacyjnych skalę autora (Krygowskiego) odwrócono.

A — krzywa piasku o średnicy 0,8—1,0 mm, B — 1,0—1,25 mm, C — 1,25—1,6 mm, D — 1,6—2,0 mm.
a, b, c, d — średnie wartości wskaźnikowe dla całej rzeki.

krzywych znajduje pełne potwierdzenie w wartościach liczbowych współczynnika korelacji, obliczonych według wzoru Pearsona:

$$r = \frac{\Sigma xy}{\sqrt{\Sigma x^2 \cdot \Sigma y^2}} \text{ gdzie}$$

r — współczynnik korelacji,
x — wartości wskaźnikowe np. obróbki wg Krygowskiego,
y — wartości wskaźnikowe np. obtoczenia wg Cailleux.

Okazuje się bowiem, że współczynnik korelacji krzywych Cailleux i Krygowskiego $r = 0{,}992$. Jest zatem bardzo wysoki, stąd niemal identyczność graficzna obu krzywych. Podobnie jest z krzywymi Kuenena i Krygowskiego. I w tym przypadku współczynnik korelacji jest bardzo wysoki $r = 0{,}996$.

Z powyższego wynika, że wszystkie przedstawione metody odzwierciedlają różnorodność obróbki sedymentu danego środowiska, chociaż nie ujmują one tych samych cech.

Na zakończenie należy dodać, że poza tym zachodzi poważna różnica czasowa w posługiwaniu się poszczególnymi metodami, co ujmuje poniższe zestawienie.

NIEZBĘDNY CZAS DO OKREŚLANIA WSKAŹNIKA OBTOCZENIA (OBRÓBKI) PRÓBKI LICZĄCEJ 200 ZIARN

metodą optyczno-pomiarową (geometryczną)	czas
1) wg Cailleux	4 — 6 godzin
2) wg Kuenena	6 — 8 godzin
metodą mechaniczną	
1) na segregatorze B. Krygowskiego z 1937 r.	30 — 60 minut
2) na graniformametrze suwakowym B. Krygowskiego i T. Krygowskiego	15 — 30 minut
3) na graniformametrze wahadłowo-suwakowym B. Krygowskiego i T. Krygowskiego	3 — 6 minut

Nie trzeba szeroko uzasadniać, że masy gromadzonych ciągle próbek idące w tysiące, wymagają od nas przejścia do szybszych metod określania morfologii ziarna poszczególnych środowisk, metod bardziej ekonomicznych. Dlatego uważałem za stosowne przypomieć o metodzie, powstałej u nas w kraju i istniejącej już od 1937 r. (3).

LITERATURA

1. Amantons M. — De la résistance causeé dans les mechine. „Memoires de l'Academie Royale" 1699, str. 206—222 (wg Rozwitie nauki otrenii, I.B. Krogielskij, W.S. Szczedrow, Izdatielstwo Ak. Nauk SSSR, Moskwa 1956, str. 5—19).
2. Cailleux A., Tricart J. — Initiation a l'etûde des sables et des galets. Wyd. Uniwers. Sorbońskiego. Paryż 1959.
3. Krygowski B. — Bericht über eine neue Methode der Selektion der Sandkörner nach ihrer Gestalt. „Archiwum Mineralogiczne", Tow. Nauk. Warszawskie, 1937.
4. Krygowski B. — Untersuchungen klastischer quartärer Materiale mittels geologisch-petrographischer Methoden. Acad. Pol. Sci. Math. et Nat. Bull. Intern. Ser. A, Kraków 1938.
5. Krygowski B. — An attempt to the mechanise of the graniformameter — a device for the seperation of the gravel grains according to the rounding grade. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences. Cl. III, Vol. III, No. 2, 1955.
6. Krygowski B. — Granulometria w badaniach czwartorzędowych w Polsce. Biul. IG 70. 1955.
7. Krygowski B. — Z badań granulometrycznych nad utworami plejstoceńskimi w Polsce zachodniej. Biul. IG 100. 1956.
8. Krygowski B. — O rozwoju metod mechanicznego oznaczania kształtu ziarna (piasku, żwiru). (On the development of methods of mechanical designation of grain shape). Spraw. P.T.P.N. za II półr. 1959, nr 3, og. zbioru nr 57.
9. Krygowski T. — O nowym aparacie do selekcji ziarna piasku według stopnia sferyczności (A new apparatus to the selection of sand grains according to the sphericity grade). Spraw. P.T.P.N. za II półr. 1959, nr 3, og. zbioru nr 57.
10. Krygowski T. — Graniformametr walcowy — nowy typ aparatu do oznaczania stopnia otoczenia ziarn piasku (The cylinder graniformametr — the new type of apparatus denoting the rounding grade of grain of sand). Spraw. P.T.P.N. za III i IV kw. 1960, nr 5, og. zbioru nr 62.
11. Krygowski B., Krygowski T. — Patent Polski, numer P 99474 (z dnia 9 VIII 1962).
12. Kuenen Ph. — Experimental abrasion of pebbels rolling by current. "The Journ. Geol.", vol. 64. No 4. 1956.
13. Preobrażenskij I. A. — O formach ziaren. Inst. Geol. Nauk. Tr. Wyp. 21, Pietrograficzeskaja ser., nr 7. AN SSSR, Moskwa 1940.
14. Wadell H. — Volume, shape and roundness of rock particles. „Jour. Geology", vol. XL, s. 443—451, July-August, 1932.
15. Wadell H. — Sphericity and roundness of rock particles. „Jour. Geology", vol. XLI, s. 310—331. April-May. 1933.
16. Wentworth C. K. — The shape of rock particles (a discussion), „Jour. Geology", vol. XLI. s. 30(—309), April-May, 1933.
17. Wentworth C. K. — The shapes of pebbles. „U.S. Geol. Surv., Bull." 730 — C, 1922.