



Jerzy TRZCIŃSKI

Ilościowa analiza morfometrycznych i geometrycznych cech mikrostruktur glin zwałowych zlodowacenia Wisły

Szybki rozwój komputerowych technik obliczeniowych i metod cyfrowego opracowania obrazów doprowadził do powstania zautomatyzowanej analizy obrazów ze skaningowych mikroskopów elektronowych (SEM). W trakcie takich badań można otrzymać wiele morfometrycznych i geometrycznych wskaźników mikrostruktury próbki. Należy podkreślić wysoką wydajność i szerokie możliwości dla określania dowolnych parametrów mikrobudowy skał i gruntów.

WSTĘP

Niniejszy artykuł przedstawia ilościową analizę mikrostrukturalną glin zwałowych zlodowacenia wisły. Z próbek pobranych w 30 punktach badawczych (po 15 dla fazy leszczyńskiej i pomorskiej) wytypowano reprezentatywne przykłady do badań w zestawie SEM-IBM. W sumie wykonano 16 analiz, po 8 dla każdej fazy. Prace prowadzono równolegle do badań właściwości fizyczno-mechanicznych tych glin, a lokalizacja punktów badawczych jest zbieżna z fig. 1 w publikacji R. Kaczyńskiego, J. Trzcieskiego (1992). Przygotowanie oraz preparatykę wstępną — suszenie przeprowadzono wykorzystując aparaturę z laboratoriów Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego.

Pierwszy etap prac został zakończony w 1990 r. Kontynuacja badań była możliwa dzięki finansowemu wsparciu Komitetu Badań Naukowych oraz Uniwersytetu Warszawskiego.

Drugi etap prac zakończono w październiku 1992 r. w czasie stażu naukowego odbytego w Katedrze Gruntoznawstwa Wydziału Geologii Uniwersytetu Moskiew-

skiego. Analiza ilościowa mikrostruktury glin zwałowych, przeprowadzona za pomocą mikroskopu SEM firmy Hitachi S-800 oraz sprzężonego z nim komputera IBM, pozwoliła na pierwsze tego typu badania gruntów spoistych Polski (W. I. Osipow i in., 1989).

Autor pragnie podziękować wszystkim pracownikom Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW, dzięki którym było możliwe przeprowadzenie badań. Szczególne podziękowania za konsultacje i wskazówki kieruje do Pana Prof. W. N. Sokołowa z Katedry Gruntoznawstwa Uniwersytetu Moskiewskiego.

METODYKA ILOŚCIOWEJ ANALIZY MIKROSTRUKTUR

Aby prawidłowo przeprowadzić analizę ilościową mikrostruktury, należy zwrócić szczególną uwagę na:

— metodykę przygotowania próbek, która nie powinna zniekształcać rzeczywistej mikrostruktury;

— wybór takich warunków pracy SEM, aby otrzymany obraz był dwuskładnikowy (czarno-biały), z dokładnymi granicami między twardymi elementami struktury a przestrzenią porową;

— opracowanie algorytmu ilościowych wskaźników uwzględniających specyfikę analizowanych próbek.

Otrzymanie preparatu do ilościowej analizy cech mikrostruktur z nienaruszoną strukturą i wysoką jakością obrazów SEM zależy od wyboru poprawnej metodyki suszenia próbek. Gwarancję, że struktura nie ulegnie naruszeniu, daje metoda zwana liofilizacją (stosowana do odwadniania preparatów biologicznych). Podstawą metody jest zasada szybkiego zamrażania, a następnie usunięcia z porów lodu drogą jego sublimacji w próżni. Przy szybkim zamrażaniu w temperaturze poniżej -40°C woda nie tworzy grubych kryształków lodu, zdolnych zniszczyć strukturę gruntu. Aby otrzymać maksymalną szybkość schładzania stosuje się ciekły azot o temperaturze wrzenia -196°C , a optymalna wielkość próbki może wynieść $1 \times 1 \times 2 \text{ cm}$, czyli około 2 cm^3 . W procesie sublimacji w próżni należy podtrzymać niską temperaturę wykluczającą rekrytalizację lodu.

Eksperymentalne dane otrzymane przez P. Smarta i K. Toveya (1981, 1982) i potwierdzone przez W. I. Osipowa i in. (1989) dowodzą, że metoda próżniowej sublimacji zamrożonych gruntów ilastych jest najbardziej efektywna. Dlatego też w przygotowaniu wilgotnych próbek ilastych do ilościowej analizy morfometrycznych i geometrycznych cech mikrostruktur należy stosować tylko tę metodę.

W celu prawidłowej interpretacji danych o rozmiarach, formach oraz orientacji w przestrzeni elementów strukturalnych i porów przebadano przekroje prostopadłe do uwarstwienia gruntów. Przekroje równoległe natomiast służyły do oceny rozmiarów płaskich cząstek i mikroagregatów. Częste wzajemne pokrywanie się tych elementów utrudniało określenie ich rzeczywistych rozmiarów.

Powierzchnia próbki, na której przeprowadzano analizę ilościową, była równa i pozbawiona wystających części i wyszczerbień mikroreliefu. Tylko w takim przypadku można otrzymać obraz SEM z wyraźnymi granicami między cząstkami i porami.

Morfometryczne i geometryczne parametry mikrostruktur glin zwałowych fazy leszczyńskiej zlodowacenia wisty

Parametr	Numer próbki (według R. Kaczyńskiego, J. Trzcńskiego, 1992, fig. 1)									
	13 Ujście I k. Piły	14 Ujście II k. Piły	18 Brzezie k. Sulechowa	19 Świebodzin	20 Wielka Turza	26 Strzelno	27 Nakło	28 Chojnice	Przedział zmiennosci R	Średnia arytmetycz- na \bar{X}
Liczba porów w płaszczyźnie obrazu N	138 752	77 298	352 958	337 152	60 767	313 457	286 124	37 529	37 529– –352 958	218 105
Porowatość n [%]	34,87	30,75	38,28	34,41	33,16	41,01	38,34	34,78	33,16– –41,01	36,41
Całkowita powierzchnia porów w płaszczyźnie obrazu S [μm^2]	27 548	20 332	30 996	25 485	18 668	29 571	28 718	24 950	18 668– –30 996	26 562
Całkowity obwód porów w płaszczyźnie obrazu P [μm]	243 665	144 994	380 703	374 244	133 371	346 676	372 978	123 238	123 238– –380 703	282 125
Średnia średnica porów d_{sr} [μm]	0,215	0,230	0,122	0,126	0,248	0,125	0,147	0,397	0,122– –0,397	0,197
Średnia powierzchnia porów S_{sr} [μm^2]	0,199	0,263	0,088	0,076	0,307	0,094	0,100	0,665	0,076– –0,665	0,218
Średni obwód porów P_{sr} [μm]	1,756	1,876	1,079	1,110	2,195	1,106	1,304	3,284	1,079– –3,284	1,690
Współczynnik formy porów K_f	0,559	0,541	0,568	0,547	0,381	0,503	0,469	0,516	0,381– –0,568	0,504
Współczynnik anizotropii mikrostruktury K_a [%]	8,1	5,8	12,1	8,5	0,4	4,8	15,1	4,7	0,4–15,1	7,7

Morfometryczne i geometryczne parametry mikrostruktur glin zwalowych fazy pomorskiej zlodowacenia wisty

Parametr	Numer próbki (według R. Kaczyńskiego, J. Trzczińskiego, 1992, fig. 1)									
	1 Puńsk	2 Ranty	8 Stargard Szczeciński	10 Włodarka k. Trzebia- towa	17 Władysła- wowo	23 Wólka Majdańska k. Ostródy	24 Elbląg	29 Bytów	Przedział zmienności R	Średnia arytmetycz- na \bar{X}
Liczba porów w płaszczyźnie obrazu N	269 082	423 182	308 471	175 986	90 193	378 234	226 699	97 441	90 193– –423 182	246 161
Porowatość n [%]	40,92	45,79	35,23	42,11	42,38	44,11	40,04	43,68	35,23– –45,79	41,78
Całkowita powierzchnia porów w płaszczyźnie obrazu S [μm^2]	34 383	37 616	27 176	28 647	32 618	27 441	29 318	31 713	27 176– –37 616	31 151
Całkowity obwód porów w płaszczyźnie obrazu P [μm]	348 648	474 887	452 832	272 749	169 942	470 086	282 811	239 903	169 942– –474 887	326 482
Średnia średnica porów d_{sr} [μm]	0,153	0,130	0,157	0,185	0,237	0,142	0,149	0,264	0,130– –0,264	0,177
Średnia powierzchnia porów S_{sr} [μm^2]	0,128	0,089	0,088	0,163	0,362	0,073	0,129	0,325	0,088– –0,362	0,170
Średni obwód porów P_{sr} [μm]	1,296	1,122	1,468	1,550	1,884	1,243	1,248	2,462	1,122– –2,462	1,534
Współczynnik formy porów K_f	0,511	0,514	0,489	0,595	0,603	0,522	0,505	0,423	0,423– –0,603	0,520
Współczynnik anizotropii mikrostruktury K_a [%]	16,5	3,7	13,7	9,2	8,5	8,4	13,5	14,9	3,7– –16,5	11,05

Analizie w mikroskopie skaningowym poddawano powierzchnie próbki o wymiarach 1 x 1 cm. Cyfrową obróbkę obrazów SEM przeprowadzono w kilku punktach tej powierzchni przy 7 różnych powiększeniach obrazu, a dane wyjściowe były uśredniane.

MORFOMETRYCZNE I GEOMETRYCZNE WSKAŹNIKI MIKROSTRUKTUR GLIN ZWAŁOWYCH ZŁODOWACENIA WISŁY

Najbardziej rozpowszechnionym morfometrycznym wskaźnikiem mikrostruktury jest średnica porów. Przy przeprowadzaniu ilościowej analizy według płaskich obrazów SEM średnica porów określana jest wzorem:

$$d = \sqrt{4S/\pi}$$

gdzie: S — powierzchnia danej pory.

Dla glin fazy leszczyńskiej średnia średnica wynosi 0,197 μm , a dla glin fazy pomorskiej 0,177 μm , przy przedziale zmienności odpowiednio 0,122–0,397 i 0,130–0,264 μm (tab. 1, 2).

Im większa anizotropia form elementów strukturalnych, z tym mniejszą dokładnością określa się rzeczywisty ich rozmiar. Dlatego bardziej wiarygodnymi parametrami, które mierzone są bezpośrednio w ilościowej analizie SEM, są powierzchnia S i obwód P . Całkowita średnia powierzchnia porów obliczona z płaskich obrazów elektronomikroskopowych przy zmiennych powiększeniach dla glin fazy leszczyńskiej wynosi 26 562 μm^2 z przedziałem zmienności od 18 668 do 30 996 μm^2 , a dla glin fazy pomorskiej 31 616 μm^2 z przedziałem zmienności od 27 176 do 37 616 μm^2 .

Oprócz całkowitej powierzchni i całkowitego obwodu bardzo ważne są średnie rozmiary średnic, obwodów i powierzchni. Wszystkie wyniki wymienionych wyżej parametrów dla glin obu faz złodowacenia wisły przedstawia tab. 1 i 2.

Wiele mówią także dwa inne parametry, a mianowicie: całkowita liczba porów (N) oraz porowatość (n). Średnia porowatość dla glin fazy leszczyńskiej wynosi 36,41% z przedziałem zmienności 33,16–41,01%, a liczba porów waha się od 37,5 do 353 tys. Średnia porowatość dla glin fazy pomorskiej wynosi 41,78%, przy przedziale zmienności 35,23–45,79%, a liczba porów waha się od 90 do 423 tys. Uzyskane wyniki porowatości dość dobrze pokrywają się z badaniami laboratoryjnymi przedstawionymi w publikacji R. Kaczyńskiego i J. Trzcíńskiego (1992, tab. 2). Średnia porowatość glin zwałowych fazy pomorskiej z tych badań jest tylko o 1% niższa i wynosi 40,7%, a przedział zmienności nieco większy, od 32,8 do 44,6%. Dla glin fazy leszczyńskiej średnia porowatość prawie pokrywa się z wynikami badań komputerowych i wynosi 36,6% z przedziałem zmienności od 31,4 do 41,4%.

Dla oceny formy porów (kształtu) wykorzystuje się współczynnik formy porów określony wzorem:

$$K_f = 3,545\sqrt{S/P}$$

gdzie: S — powierzchnia porów, P — obwód porów.

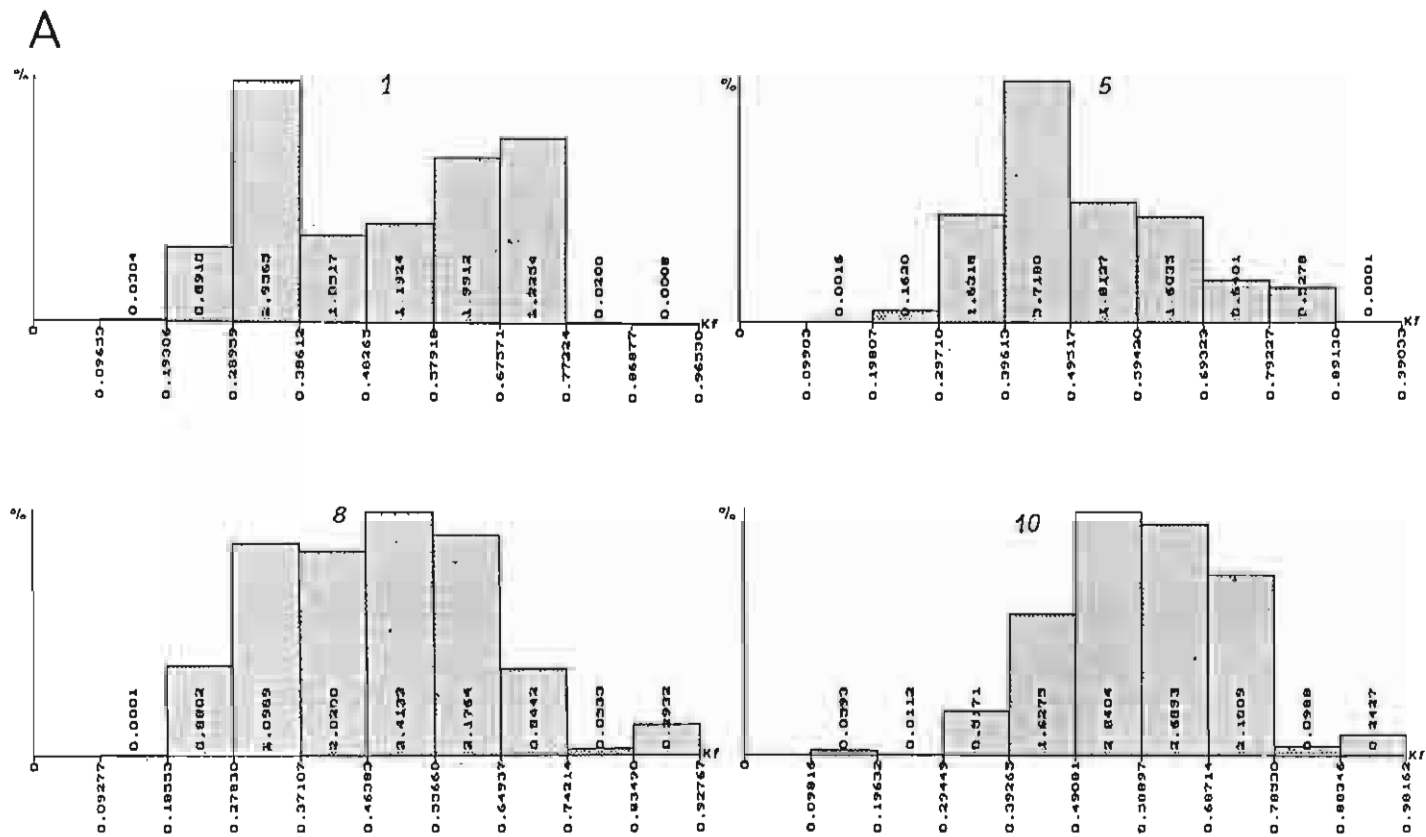
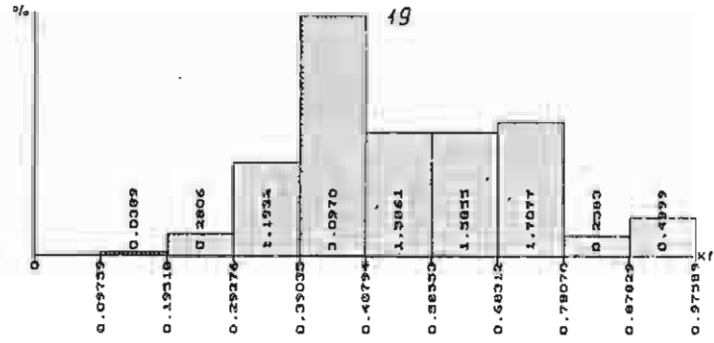
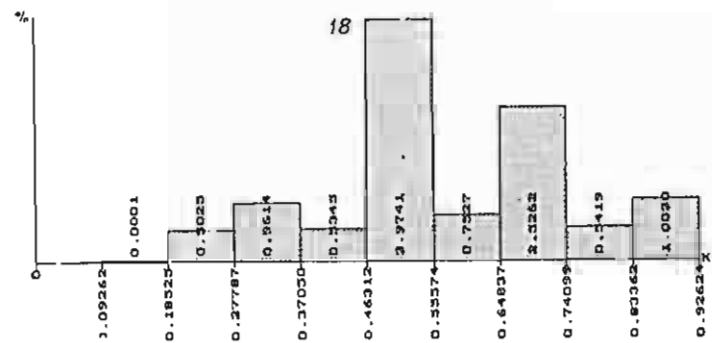
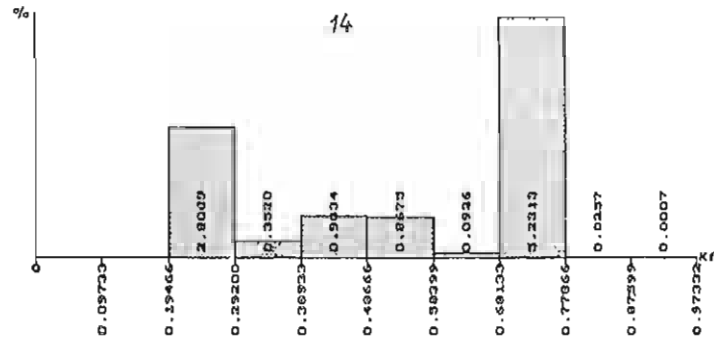
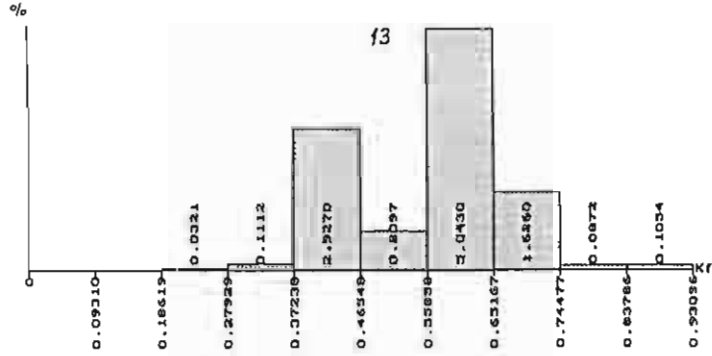


Fig. 1. Ilościowy rozkład współczynnika formy K_f dla glin zwalowych zlodowacenia wisty: A — fazy pomorskiej, B — fazy leszczyńskiej

K_f — współczynnik formy porów; oś pionowa — procentowa zawartość porów; 13, 14, 18 itd. — numery punktów badawczych zgodne z fig. 1 w publikacji R. Kaczyńskiego, J. Trzcinskiego (1992)

B



Quantitative distribution of the form coefficient K_f for boulder clays of Vistula Glaciation: A — Pomeranian Phase, B — Leszno Phase
 K_f — form coefficient of the pores; vertical axis — content of pores in %; 13,14,18 etc. — code numbers of test points according to Fig.1 in the publication of R. Kaczyński and J. Trzcicki (1992)

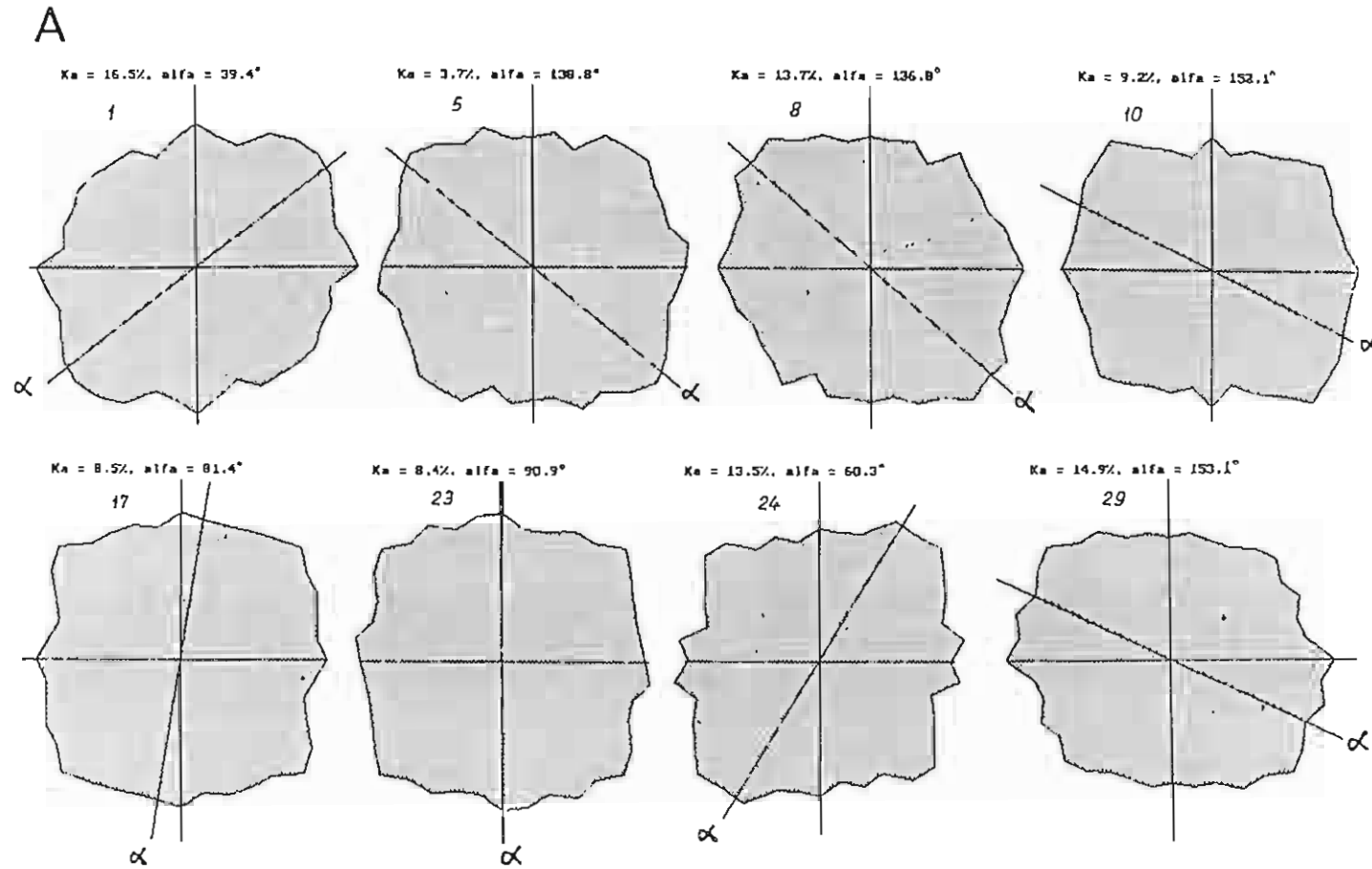
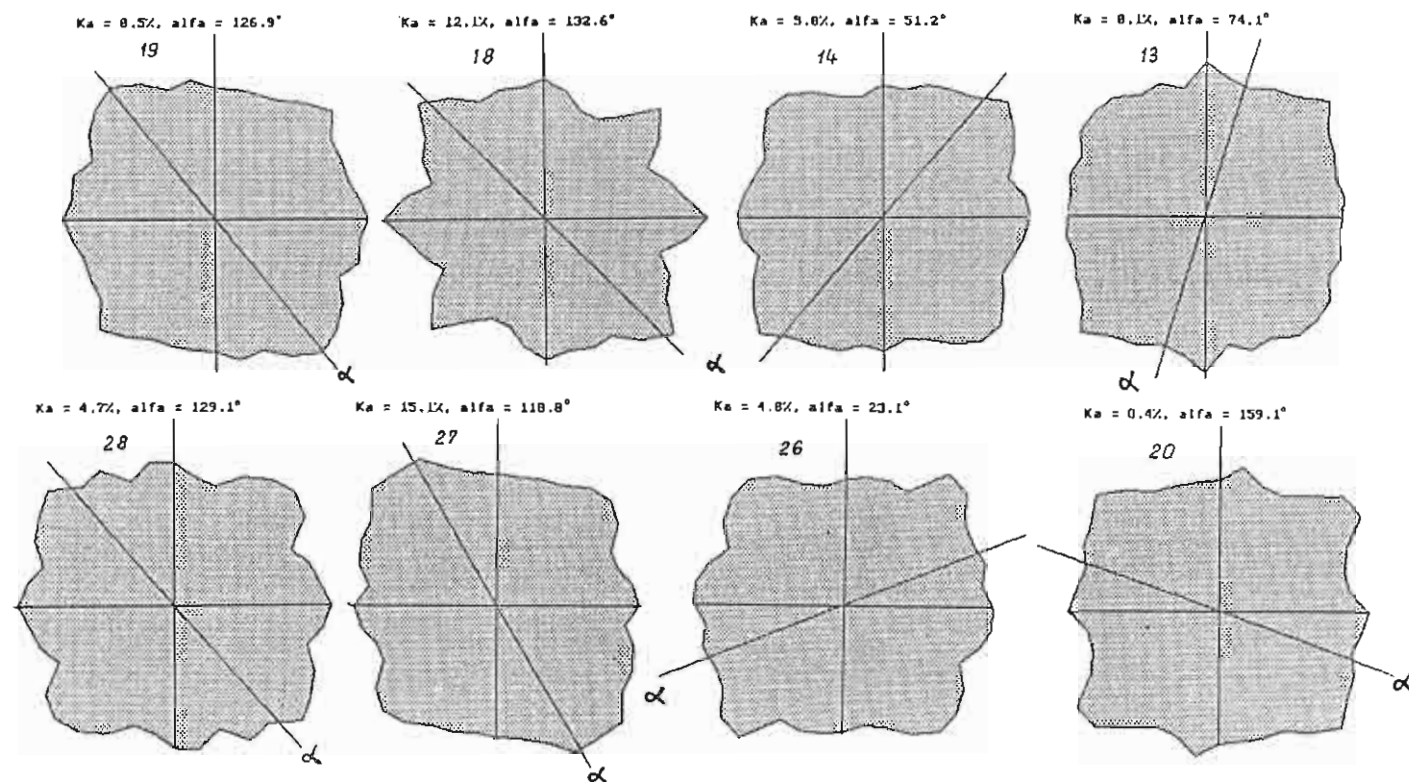


Fig.2. Różne orientacji porów dla glin zwalowych zlodowacenia wisty: A — fazy pomorskiej, B — fazy leszczyńskiej

K_a — współczynnik anizotropii mikrostruktury; α — przeważający kierunek orientacji elementów strukturalnych w płaszczyźnie obrazu; 1, 5, 8 itd. — numery punktów badawczych zgodne z fig. 1 w publikacji R. Kaczyńskiego, J. Trzcńskiego (1992)

B



The diagrams of orientation of the pores in boulder clays of Vistula Glaciation: A — Pomeranian Phase, B — Leszno Phase

K_a — anisotropy coefficient of microstructure; α — prevailing direction of orientation of the structural elements in the plane of the image; 1, 5, 8 etc. — code numbers of test points according to Fig. 1 in the publication of R. Kaczyński and J. Trzciński (1992)

Ten wskaźnik określony jest jako stosunek powierzchni (S) obserwowanego elementu strukturalnego obrazu na wybranej płaszczyźnie do obwodu (P) tego elementu (pory, cząstki). Na przykład, dla różnych figur płaskich współczynnik K_f wynosi: dla kwadratu 0,886, dla sześciokąta prawidłowego 0,953, dla trójkąta prawidłowego 0,777, a dla okręgu 1, czyli pory podobne do okręgu (izometryczne) będą miały współczynnik formy bliski 1. Im kształt elementów strukturalnych będzie bardziej anizometryczny, np. wydłużony, spłaszczony, czyli zbliżony do kształtu elipsy, tym wartość K_f będzie bliższa 0.

Analizując wartość tego parametru dla glin obu faz można zauważyć, że pory glin fazy pomorskiej generalnie mają kształt bardziej izometryczny, $K_f = 0,520$, z przedziałem zmienności od 0,423 do 0,603. K_f dla glin fazy leszczyńskiej wynosi 0,504 z przedziałem zmienności od 0,381 do 0,568. Przykłady rozkładu K_f dla glin obu faz ilustruje fig. 1A, B.

Oprócz opisanych morfometrycznych wskaźników można analizować krzywe rozkładu każdego z wymienionych parametrów, co często ujawnia polimodalny ich charakter.

Dla oceny cech geometrycznych mikrostruktury opracowano metodę spadku intensywności sygnału. Na podstawie wyników analizy powstaje róża orientacji. Kierunek maksymalnej osi odpowiada przeważającemu kierunkowi orientacji elementów strukturalnych w płaszczyźnie obrazu. Z otrzymanej róży orientacji oblicza się parametr stopnia orientacji — współczynnik anizotropii (K_a), którego wzór przedstawia się następująco:

$$K_a = \left(1 - \frac{S_1 + S'_1}{S_2 + S'_2}\right) 100\%$$

gdzie: $S_1 + S'_1$ i $S_2 + S'_2$ — powierzchnie segmentów róży orientacji.

Badania eksperymentalne na dużej grupie próbek skał ilastych (W. I. Osipow i in., 1989) posłużyły do podziału stopnia orientacji, czyli współczynnika anizotropii K_a , na trzy klasy. Dla K_a od 0 do 7% mikrostruktura jest słabo zorientowana, od 7 do 22% średnio zorientowana, a od 22 do 78% wysoko zorientowana.

Średni współczynnik anizotropii K_a dla glin fazy leszczyńskiej wynosi 7,7%, przy przedziale zmienności 0,4–15,1%, a dla glin fazy pomorskiej 11,05%, przy przedziale zmienności od 3,7 do 16,5% (fig. 2A, B). Wartość średnia K_a klasyfikuje strukturę gliny obu faz jako średnio zorientowaną.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione wyniki ilościowej analizy morfometrycznych i geometrycznych wskaźników mikrostruktur glin zwałowych złodowacenia wisty prowadzą do następujących wniosków:

1. Porównując porowatość (n) i całkowitą liczbę porów (N), gliny zwałowe fazy pomorskiej mają dużo większe parametry.

2. Dla całkowitej powierzchni porów (S) i całkowitego obwodu porów (P) widzimy podobną tendencję, choć w mniejszym stopniu.

3. W parametrach średniej średnicy (d_{sr}), średniej powierzchni (S_{sr}) i średniego obwodu (P_{sr}) tendencja jest odwrotna, ale tylko minimalnie.

4. Współczynnik formy porów (K_f) jest nieco wyższy dla glin fazy pomorskiej, co wskazuje na bardziej izometryczny kształt porów.

5. Współczynnik anizotropii (K_a) jest wyższy dla glin fazy pomorskiej, jednak dla obu wartości średnich mieści się w przedziale mikrostruktury średniozorientowanej (V. N. Sokolov, 1990)

6. Większy współczynnik anizotropii mikrostruktury (K_a) dla glin fazy pomorskiej świadczy o lepszym zorientowaniu młodszych osadów zlodowacenia wisły.

Zaprezentowane wyniki ujawniają wyraźną tendencję większych wartości parametrów dla fazy pomorskiej, co wskazuje na luźniejszy charakter mikrostruktur glin zwałowych tej fazy. Pozwala to postawić tezę o mniejszym stopniu konsolidacji tych glin.

Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej
Uniwersytetu Warszawskiego
Warszawa, al. Żwirki i Wigury 93
Nadesłano dnia 8 grudnia 1992 r.

PIŚMIENNICTWO

- KACZYŃSKI R., TRZCIŃSKI J. (1992) — The physical-mechanical and structural properties of boulder clays of the Vistula Glaciation in the area of Poland. *Kwart. Geol.*, 36, p. 481-508, nr 4.
- OSIPOW W. I., SOKOŁOW W. N., RUMIANCEWA N. A. (1989) — Mikrostruktura glinistych parod. Izd. Niedra. Moskwa.
- SMART P., TOVEY K. (1981) — *Electronmicroscopy of soils and sediments: examples*. Clarendon Press. Oxford.
- SMART P., TOVEY K. (1982) — *Electronmicroscopy of soils and sediments: techniques*. Clarendon Press. Oxford.
- SOKOLOV V. N. (1990) — Engineering-geological classification of clay microstructures. *Proc. 6th Inter. IAEG Congr. Rotterdam*, 1, p. 753-760.

Jerzy TRZCIŃSKI

THE QUANTITATIVE SEM-COMPUTER ANALYSIS OF MORPHOMETRIC
AND GEOMETRIC FEATURES OF MICROSTRUCTURES IN BOULDER CLAYS
OF THE VISTULA GLACIATION IN THE AREA OF POLAND

S u m m a r y

The paper presents the results of quantitative microstructural analysis of boulder clays of the Vistula Glaciation. Totally 16 tests have been carried out in two series of eight for Pomernian Phase and Leszno Phase. The results of the analysis are shown in the Table 1 and 2, which present morphometric and geometric parameters of microstructures in the boulder clays. The results reveal clear tendency of bigger values of the parameters in Leszno Phase which indicates looser character of the microstructures in the boulder clays of this phase. This allows to submit a proposition about less degree of consolidation of these soils. On the other hand a little higher anisotropy coefficient of the microstructures (K_a) for Pomernian Phase testifies better orientation of younger deposits.

Translated by the Author