

Loïc Le RIBAULT

Egzoskopia – metoda określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych

W artykule przedstawiono wyniki badań powierzchni ziarn kwarców detrytycznych — zarówno współczesnych, jak i starszych — pochodzących z różnych środowisk: rzecznych, morskich, eolicznych i złożonych. Badania te były możliwe do przeprowadzenia dzięki zastosowaniu mikroskopu elektronowego typu *Scanning*. Autor odtworzył poszczególne etapy ewolucji badanych ziarn kwarcu i dla tej metody badań wprowadził nowy termin — egzoskopia, czyli badanie wyglądu powierzchni ziarn kwarcu.

WSTĘP

Badania osadów piaszczystych budzą od dawna duże zainteresowanie, ponieważ osady te zajmują znaczne obszary powierzchni Ziemi i mają poważne znaczenie ekonomiczne.

Badania powierzchni ziarn kwarców detrytycznych datują się głównie od r. 1942, dzięki pracom A. Cailleux, twórcy morfoskopii klasycznej. Badania Ph. H. Kuenena (1959, 1960) nad połyskiem i chemicznym matowieniem ziarn, a zwłaszcza doświadczenia D. H. Krinsleya — stosujące mikroskop elektronowy do badań ewolucji powierzchni ziarn kwarcu w osadach polodowcowych, przybrzeżnych i pustynnych — posunęły naprzód wiedzę o wyglądzie powierzchni ziarn piasku oraz o procesach, które go kształtują (D. H. Krinsley, T. Takahashi, 1962; D. H. Krinsley, 1965; D. H. Krinsley, J. Donahue, 1968a, b).

Przegląd podstawowych prac z tego zakresu, a szczególnie badania przy zastosowaniu mikroskopu elektronowego wskazują, że rozwiązania zagadnienia przeszłości geologicznej kwarców detrytycznych szukano w różny sposób. Zauważa się dwie szkoły: Ph. H. Kuenena i D. H. Krinsleya. Przedstawiciele szkoły Kuenena uważają, że kształtowanie ziarn spowodowane jest głównie chemicznym działaniem środowiska, szkoły

Krinsleya natomiast — czynnikami mechanicznymi. Tymczasem przyjęcie tylko jednego kryterium rozróżniania następcza trudności, które są właściwe każdemu z dwóch kryteriów. Ślady działalności mechanicznej zlokalizowane są zawsze na krawędziach i płaskich powierzchniach ziarn, z wyjątkiem zagłębień na powierzchniach. Badania tych śladów można przeprowadzić dwoma sposobami: 1 — badanie liczby śladów znajdujących się na $1 \mu^2$; 2 — badanie kształtów śladów działalności mechanicznej.

Badanie liczby śladów na $1 \mu^2$. Im bardziej czynne i ruchliwe jest środowisko, tym większa będzie liczba uderzeń po upływie danego czasu na danym rodzaju ziarna. S. V. Margolis i J. P. Kennett podają, że liczba śladów uderzeń na $1 \mu^2$ jest większa w momencie przejścia ze środowiska rzecznoego do środowiska potokowego oraz ze środowiska potokowego do morskiego — przybrzeżnego.

Takie kryterium analizy może jednak doprowadzić do poważnych błędów diagnostycznych, ponieważ zmusza do założenia, że każde badane środowisko ewolucji ziarn posiada jakąś stałą średnią energię. Przyjmuje się np., że badane ziarno kwarcu było niszczone w osłoniętej, spokojnej zatoce morskiej, wtedy policzone ślady uderzeń wskażą na ewolucję rzecznoą jako ewolucję końcową. Jeśli zaś ziarno uległo w ostatecznym stadium obróbki krótkotrwałej i słabej działalności eolicznej, gęstość śladów uderzeń będzie równa gęstości uderzeń na ziarnach kwarcu rzecznoego. Scementowany kwarc morski, uniesiony przez powolnie działającą rzekę będzie nosił znamię poprzedniej ewolucji i zostanie zaliczony do kwarców morskich. Można zatem przytoczyć liczne przykłady, w których klasyfikacja oparta na gęstości śladów uderzeń okazuje się niewłaściwa, szczególnie w przypadku niewielkiej zmienności.

Badania kształtu śladów działalności mechanicznej. Prace D. H. Krinsleya wskazują, że morfologia śladów uderzeń mechanicznych może pozwolić na określenie niektórych typów ewolucji, którą przeszły ziarna kwarcu wyraźnie wykształconego.

W przypadku ziarn kształtujących się w środowisku o słabym działaniu mechanicznym oraz w przypadku, gdy ziarna znajdują się zaledwie we wstępnym stadium ewolucji nawet w środowisku o dużej lub średniej energii, zagadnienie to jest trudne do rozwiązania. Nie ulega wątpliwości, że kształt śladów uderzeń zależy również, obok innych czynników, od kąta uderzenia oraz od rozmiarów ciała uderzającego w stosunku do ziarna, a więc od ogólnej granulacji badanego osadu.

Rozmiary zniszczeń widoczne na ziarnie kwarcu nie zależą też wyłącznie od intensywności działania mechanicznego panującego w danym środowisku ewolucji, lecz także od znamion pochodzenia badanego kryształu: w tym samym ośrodku kwarc zasobny w inkluzje, mający zatem w budowie krystalicznej strefy osłabionej struktury, rozłupie się o wiele łatwiej niż kwarc bez inkluzji. Płaszczyzny inkluzji uwidocznione przez rozłupanie (P. Lofoli, 1971, 1973) nadają ziarnom wygląd mniej lub bardziej nierówny, na który tylko pośrednio wpływa intensywność uderzenia mechanicznego. Niektóre kształty półkieszykowate lub miseczkowate spowodowane są bez wątpienia przez inkluzje. Dla badań wewnętrznej struktury kryształu kwarcu wprowadzam termin — endoskopia.

Działanie chemiczne, podobnie jak działanie mechaniczne zachodzi w większości środowisk ewolucji osadu. Działanie chemiczne można po-

dzielić na dwa typy zależnie od zachowania się krzemionki. Do pierwszego typu zalicza się zjawiska rozpuszczania, do drugiego — zjawiska wytrącania. W zależności od głębokości samej ławicy piaszczystej oraz jej otoczenia (morskiego czy rzecznego) zjawisko wytrącania i rozpuszczania może zachodzić równocześnie lub może następować w pewnej kolejności. Otóż zjawiska rozpuszczania na powierzchni kwarcu wykazują zawsze ten sam kształt, niezależnie czy powstały na ziarnach pochodzenia morskiego, czy kontynentalnego; dotyczy to również groniastych wytrąceń krzemionki. Powstaje zatem pytanie jak rozróżnić środowiska ewolucji ziarn kwarcu, czy uwzględniając jedynie kryteria wyglądu form rozpuszczania i wtórnego wytrącania?

Stwierdziliśmy wyżej, że badania samych tylko śladów działania mechanicznego bądź wyłącznie śladów działania chemicznego nie dają całkowitej pewności odtworzenia pełnej lub nawet częściowej historii geologicznej kwarców detrytycznych. Każde bowiem środowisko charakteryzuje się wpływami zarówno czynników mechanicznych jak i chemicznych, zachodzącymi równocześnie. A zatem, aby rozpoznać ewolucję nawet we wstępnym stadium, należy badać oba te czynniki jednocześnie, ustalić ich wzajemne zależności oraz sposób, w jaki zaznaczyły się na ziarnach w określonym środowisku. Same te czynniki są oczywiście niewystarczające do zmiany kształtu ziarn, dlatego też nie używam tu określenia „morfoskopia”, lecz wprowadzam termin „egzoskopia”, czyli badanie wyglądu powierzchni ziarn kwarcu. Morfoskopia jest bowiem całkowicie użyteczna przy badaniu osadów już wykształconych.

W prezentowanym artykule przedstawiam wyniki badań 600 próbek kwarców zarówno współczesnych jak i starszych, kwarców, które nie przeszły ewolucji, kwarców pochodzących ze zwietrzelin oraz kwarców rzecznych, morskich i eolicznych (L. Le Ribault, 1971a, b, 1972a-c, 1973, 1974).

EWOLUCJE PROSTE

KWARCE NIEROZWINIĘTE

Za kwarcie nierozwinięte uważam te, które nie uległy ani wpływowi wietrzenia, ani transportu, ani jakiegokolwiek ewolucji, a więc kwarcie pobrane ze zdrowej skały macierzystej lub kwarcie nowo powstające, w trakcie wzrostu.

Kształt ziarn tych kwarców jest różny, w zależności od ich genezy i typu badanej skały. Jednakże z punktu widzenia analizy egzoskopowej kwarcie nierozwinięte bez względu na ich pochodzenie charakteryzują się przede wszystkim:

— całkowitym brakiem śladów działania mechanicznego, spowodowanych zewnętrznymi czynnikami ewolucji, np. eolizacją, obracaniem, mieszaniem, uderzeniami itp.;

— „czystymi” powierzchniami, zupełnie pozbawionymi wytrąceń lub śladów korozji.

KWARCE ZWIETRZAŁE I KWARCE GLEBOWE

Rozróżnienie, które wprowadzam między kwarcem zwietrzałym i kwarcem glebowym może wydać się sztuczne. Jest ono jednakże konieczne dla przejrzystości przedstawianego zagadnienia oraz przy interpretacji analiz egzoskopowych.

Kwarcem zwietrzałym nazywam kwarc, który ulega zmianom we wnętrzu skały macierzystej, a więc kwarc nie objęty jeszcze transportem. Kwarcem glebowym natomiast określam kwarc, który ulegał już transportowi, a tym samym doznał jednego lub wielu przekształceń mniej lub bardziej złożonych, a następnie w pewnym momencie został unieruchomiony. Unieruchomienie to wyrazi się wpływem pochodzenia glebowego (wtórne wytrącanie na powierzchni lub korozja powierzchni), nakładającego się na cechy odziedziczone dawniej.

NATURALNA OTOCZKA KRZEMIONKOWA NA KWARCACH ZWIETRZAŁYCH I GLEBOWYCH

Różnego typu działania fizyczne i chemiczne (np.: dawkowanie kolometryczne na wyodrębnioną krzemionkę, po uprzednim działaniu alkaloïdów, czy też klisze radiokrystalograficzne w komorze typu Guinier-Dewolf, itp.) oraz liczne obserwacje w mikroskopie elektronowym kwarców zwietrzałych i glebowych ujawniły, że na ziarnach tych kwarców istnieje warstewka — otoczka — krzemionki bardzo łatwo rozpuszczalnej. Otoczka ta nie jest przypadkowa, znajduje się na kwarcach zwietrzałych i glebowych zawsze, niezależnie od ich cech geomorfologicznych, np. kształtu, rozmiarów i in. (L. Le Ribault, 1971).

Przy dużym powiększeniu (od 5000 do 30 000 \times) otoczka przyjmuje charakterystyczny „łuskowaty” wygląd, mniej lub bardziej wyrazisty (tabl. II, fig. 4; tabl. III, fig. 6). Jej grubość na ziarnach kwarcu o średnicy 0,5 mm mieści się w granicach 0,01—1 μ m (milimikrona); przeciętna grubość wynosi 0,08 μ m, przeciętna średnica łusek — około 0,5 μ m.

W większości przypadków otoczka nie jest wyraźnie oddzielona od kryształu kwarcu, na którym się znajduje, lecz przechodzi stopniowo w kwarc za pośrednictwem tzw. strefy przejściowej, kilkadziesiąt milimikronów grubości. Strefa ta może być mniej lub bardziej wykrystalizowana i występuje pod dwiema postaciami: 1 — jako naturalne przejście między kwarcem i krzemionką amorficzną powtarzające dokładnie kształt kryształu; 2 — jako forma nacieku (zjawisko wytrącania). Te dwie postacie przedstawiają w istocie dwa bardzo zróżnicowane zjawiska.

Amorfizacja kwarcu. Działanie rozpuszczające, różnorodnego pochodzenia, zachodzi w pewnych poziomach większości profilów glebowych, powodując łuszczenie się pierwotnej powierzchni kwarcu, który rozpada się w formie łusek. W tym przypadku otoczka jest zbliżona genezą do otoczki utworzonej sztucznie i następuje tu stopniowa amorfizacja pierwotnej powierzchni kryształów. Nie ma wtedy wyraźnej granicy pomiędzy warstewką krzemionki i kwarcowym podłożem (P. B. Dempster, P. D. Richtie, 1952, 1953; J. G. Gibb, P. D. Richtie, J. W. Sharpe, 1953; G. Negelschmidt, R. L. Gordon, O. G. Griffin, 1952).

Zjawiska wytrącania, czyli osadzania się otoczki krzemionkowej są charakterystyczne dla tych poziomów glebowych, w których

krążą lub gromadzą się roztwory, bogate w krzemionkę. Proces ten rozpoczyna się w momencie ukazania się rozproszonego, kuleczkowego osadu. Kiedy wytrącanie krzemionki jest duże (lub zwiększa się) otoczka staje się zwarta i przybiera właściwy kształt. Morfologia otoczki wiernie odtwarza położenie kryształu, czyli podłoża swego otoczenia; na powierzchniach poziomych otoczka tworzy prostą mozaikę otaczającą wszystkie formy kryształu, podczas gdy na pochyłych powierzchniach ziarn powstają „nacieki ukierunkowane”, bez żadnego związku z krystaliczną strukturą kwarcu. Średnia grubość tych nacieków na ziarnach o średnicy 0,5 mm mieści się w granicach 1—10 μ .

Otoczka niezależnie od swej morfologii stopniowo gęstnieje i najstarsza jej część przejawia tendencje przekształcenia się w „strefę przejściową”, która właściwie jest strefą krystalizacji. Strefa ta różni się od strefy powstałej w procesie amorfizacji, ponieważ granica otoczki z podłożem kwarcowym jest tu bardzo wyraźna.

Wskaźnikami krystalizacji osadu krzemionki są tzw. kwiaty krzemionki (L. Le Ribault, 1971, 1972). Można zaobserwować wszystkie przejścia od kuleczkowych osadów krzemionki do dobrze wykryształizowanych kwiatów kwarcu, wyrażone przez stopniowo wzrastającą strukturę promienistą (tabl. IV, fig. 7). Na związek między wzrastającą strukturą promienistą a zwiększeniem się stopnia krystalizacji wskazuje odporność kwiatu na działania alkaliów, która wzrasta w miarę utrwalania się struktury krystalicznej. Kwiaty krzemionki, jeśli nie zostały naruszone przez transport czy rozpuszczenie, przedstawiają w przekroju zawsze kształt wypukły. Można je spotkać na tych samych kwarcach, na których wytrąciła się otoczka. O ile otoczka występuje jako osad bardzo rozległy, pokrywający całkowicie daną część powierzchni kwarcu, o tyle kwiaty krzemionki kształtują się głównie na partiach powierzchni „odsłanianych”, gdzie roztwory infiltrujące, które docierają do tych powierzchni, są trudno odnawiane i wykazują skłonność do silnego przesylenia. W tak odosobnionym środowisku przesylenie powoduje krystalizację krzemionki w lepiej lub gorzej wykształcone kwiaty.

Krystalizacja kwiatów może również wiązać się ze zjawiskiem istnienia osadu mniej zasobnego w krzemionkę i jej wytrącania bardziej nieciągłego w czasie niż przy powstawaniu otoczki. Krzemionka polimeryzuje i organizuje się wtedy powoli, ponieważ dopływy jej dla pokrycia całości powierzchni kwarcu są niewystarczające. Ten rodzaj kwiatu jest bardzo rozpowszechniony na kwarcach glebowych.

Znaczenie kwiatów krzemionki w egzoskopowej analizie kwarcu jest wyjątkowo duże, ponieważ kwiaty te zawsze wyrażają czas unieruchomienia ziarna. Ich mały rozmiar sprawia ponadto, że są one bardzo wrażliwe na chemiczne warunki środowiska, w których dokonuje się ewolucja kwarcu. Kwiaty krzemionki są wobec tego znakomitymi wskaźnikami „ekologicznymi” (P. Hubschman, L. Le Ribault, 1972).

Z rozważań tych wynika wniosek, że ziarna kwarcu niezależnie od tego czy pochodzą ze skał zwietrzałych, czy z profilów glebowych noszą znamię swego pochodzenia w postaci rozpuszczalnej warstewki krzemionki, z kwiatami lub bez kwiatów krzemionki. Warstewka ta, dzięki swej czułości na warunki środowiska, będzie podlegać różnym typom ewolucji w zależności od różnorodnych cech środowiska, w którym się znajdzie.

ZIARNA KWARCU POCHODZENIA LODOWCOWEGO

Badalem stosunkowo małą ilość polodowcowych ziarn kwarcu. Pochodziły one z Alp, z glin czwartorzędowych Basenu Akwitańskiego oraz z Pirenejów. W każdym jednak przypadku interesującym zjawiskiem wydał mi się brak śladów uderzeń w zagłębieniach lub na przełamach muszlowych ziarn typowo lodowcowych. Fakt ten wskazuje wyraźnie, że powstanie ziarn lodowcowych jest rezultatem ciśnień czy pęknięć (wskutek powtarzających się zamarzań i odmarzań) natury fizycznej, nie zaś wynikiem uderzeń pod wpływem wiatru czy wody.

Przyjmując taki punkt widzenia odnalazłem na badanych próbkach tekstury całkowicie podobne do opisanych przez D. H. Krinsleya (D. H. Krinsley i in., 1962, 1964, 1965a, b, 1971). Wyjątek stanowiły duże pęknięcia, które według mnie nie są cechą typowo lodowcową, ponieważ ziarna kwarcu nawet zwietrzałego są często nimi obdarzone.

ZIARNA KWARCU POCHODZENIA RZECZNEGO

Od początku badań nad wyglądem powierzchni ziarn kwarcu głównym zadaniem było uwydatnienie osobliwych cech ziarn pochodzenia rzeczne-

Według A. Cailleux i J. Tricarta (1959) ziarna kwarcu pochodzenia morskiego można odróżnić od ziarn pochodzenia rzeczne- na podstawie kształtu i połysku nawet przy użyciu binokularu. Ziarna rzeczne są na ogół bardziej kanciaste i mniej przezroczyste niż ziarna występujące na plaży. Wnioski te zostały potwierdzone przez D. H. Krinsleya, który w transmisyjnym mikroskopie elektronowym (w świetle przechodzącym) na ziarnach kwarcu pochodzenia rzeczne- nie zaobserwował żadnych typowych cech, z wyjątkiem mniejszego stopnia ich zniszczenia w stosunku do ziarn kwarcu z plaż morskich (D. H. Krinsley, T. Takahashi, 1962).

W 1959 r. Ph. H. Kuénen w wyniku przeprowadzonych badań stwierdził, że ścieranie piasku częściowo obtoczonego przy transporcie wynoszącym 1000 km jest mniejsze od 0,1%. Starcie to w przypadku piasku o gładkiej powierzchni i średnio zaokrąglonego może być praktycznie uważane za równe zero.

Badaniami śladów działania mechanicznego kwarców rzecznych — podobnie jak Ph. H. Kuénen — zainteresowali się S. V. Margolis i J. P. Kennett (1971). Uważają oni, że możliwe jest m. in. odróżnienie piasków plażowych od rzecznych, gdy weźmie się pod uwagę liczbę śladów V-kształtnych, powstałych przy zderzeniach podwodnych. Piaski rzeczne wykazują bowiem mniejszą ilość śladów zderzeń na $1 \mu^2$. Oprócz tego kryterium rozróżnienia ziarna kwarcu rzeczne- wykazują mało cech charakterystycznych, z wyjątkiem zaokrąglenia konturu, słabo zaznaczonego reliefu, nierównomiernie i delikatnie ponakłuwanych powierzchni, śladów diagenetycznej korozji i krystalizacji; te dwie ostatnie cechy zaznaczają się już przed okresem transportu. Należy jednak stwierdzić, że badania omówione wyżej nie rozwiązały ostatecznie problemu charakterystyki ziarn kwarcu pochodzenia rzeczne-.

ŚRODOWISKO RZECZNE

Z obecnych badań składu chemicznego wód rzecznych wynika, że zawartości krzemionki w wodach naturalnych są niższe od rozpuszczalności krzemionki bezpostaciowej, wyższe zaś od rozpuszczalności kwarcu. A więc rzeki są niedosycone w stosunku do krzemionki bezpostaciowej, a nie w stosunku do kwarcu.

Potok wody o średniej lub dużej energii charakteryzuje się silniejszym lub słabszym obracaniem niesionego materiału. Wiadomo, że ścieranie naturalne, czysto mechaniczne jest w środowisku wodnym niewystarczające do przekształcenia ziarn kanciastych kwarcu na ziarna zaokrąglone. Udowodniono, że cząstki kwarcu mogą być rozpuszczone chemicznie szybciej w warunkach ścierania z jednej strony przez unoszenie w niespokojnych strefach przypowierzchniowych, z drugiej zaś — przez powstanie rys i pęknięć spowodowanych zderzeniami, które ułatwiają przenikanie krzemionki (P. B. Dempster, P. D. Ritchie, 1952; G. W. Morey, R. O. Fournier, J. J. Rowe, 1962; R. Siever, 1962; J. A. Van Lier i in., 1960).

W środowisku rzeczonym niedosyconie w stosunku do rozpuszczanej krzemionki bezpostaciowej i ciągłe mieszanie (obracanie materiału) powodują rozpuszczanie otoczki odziedziczonej po etapie wietrzenia, które prowadzi do stopniowego zaniku chropowatości na krawędziach oraz do wyrównania strefy przenikania. Ta ostatnia uzewnętrznia się przez ślady uderzeń w momencie obtaczania, które charakteryzują ewolucję wodną, gdzie zachodzi działanie mechaniczne (tabl. V, fig. 8).

Wykwity krzemionki, najslabiej wykryształizowane, wykazują również stopniowe rozpuszczanie, które odznacza się zatarciem rzeźby i wyrównaniem powierzchni. W przekroju kwiaty krzemionki nie wykazują już wypukłości, lecz skłaniają się raczej do form płaskich. Zdarza się też, że mają także ślady uderzeń.

Środowisko rzeczne o średniej energii. Cała górna część masy piaszczystej w tym środowisku zostaje przeniesiona i równocześnie poddana zderzeniom. Wzajemne ścieranie się ziarn ułatwia przechodzenie w roztwór zarówno krzemionki, jak i kwarcu, ale połączenie wody znajdującej się wewnątrz piaszczystej masy z częścią wody wolnej — występującej powyżej piasku — jest utrudnione. Dlatego też stężenia rozpuszczonej krzemionki mogą miejscami ulegać zagęszczeniu i dawać w rezultacie roztwory przesycone. Zjawisko to prowadzi do wytrącania osadów wtórnej krzemionki na powierzchniach płaskich oraz w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi nawet najbardziej eksponowanych i wystających części ziarn.

Wtórny osadem krzemionki mogą być pokryte także okrzemki (A. Ehrlich, J. Tourenq, 1967). Miejsca na ich skorupkach (wgłębienia, powierzchnie płaskie) stanowią więc doskonale kryterium poznania kwarców, charakterystycznych dla środowiska rzecznoego o średniej energii (tabl. VI, fig. 10). Nigdy bowiem dotychczas nie stwierdziłem obecności okrzemek wśród kwarców pochodzenia potokowego, prawdopodobnie dlatego, że bardzo gwałtowne mieszanie wody i piasków zapobiega zjawisku lokalnego przesyconienia roztworu i uniemożliwia zatrzymanie okrzemek.

Środowisko rzeczne o małej energii. Odnosi się do ziarn kwarcu kształtujących się poza nurtem rzeki. W tym przypadku

obtaczanie jest nikle i większość śladów działania mechanicznego na powierzchni ziarna jest odziedziczona po uprzednim transporcie. Odnowienie powierzchni kwarcu może zaznaczać się nie tylko we wgłębieniach, lecz także na ścianach płaskich. Znajduje się tu bardzo liczne okrzemki.

Na podstawie powyższych rozważań ustalono, że kwarce pochodzenia rzeczne w obu typach środowiska charakteryzuje:

a — obecność śladów działania mechanicznego, z pewnym stopniem wygładzenia;

b — słabe lub silne rozpuszczanie strefy przejściowej powstałej po zwietrzeniu skały macierzystej;

c — zanik łuskowatej, rozpuszczalnej otoczki, utworzonej również w wyniku zwietrzenia;

d — stopniowe rozpuszczanie się kwiatów krzemionki, z jednoczesnym wygładzaniem i wyrównaniem ich powierzchni;

e — wytrącanie się osadów wtórnych na ścianach płaskich oraz w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi;

f — „uwięzienie” okrzemek;

g — odnowienie powierzchni kwarcu we wgłębieniach oraz na ścianach płaskich.

Cechy a, b, f oraz niekiedy g mogą być uwidocznione za pomocą mikroskopu optycznego. Lecz jedynie mikroskop elektronowy ze światłem odbitym (*Scanning*) pozwala na postawienie całkowitej pewnej diagnozy dotyczącej cech b, c, d, które można zaobserwować wyłącznie na ziarnach rzecznych pochodzących bezpośrednio ze skał zwietrzonych lub z kwarców glebowych. Jeśli badany kwarc przeszedł uprzednio złożoną ewolucję, jedynie cechy a, e, f oraz g pozwalają na określenie ewolucji rzecznej, ponieważ okrzemki (cecha f) czy też odnowienie powierzchni (cecha g) nie zawsze są obecne. Ponadto, o ile chodzi o kwarc z potoków — cecha e nie ujawnia się. Nie pozostaje więc nic innego, jak uznać ślady działania mechanicznego z pewnym stopniem wygładzenia (cecha a) — jako kryterium rozróżniania. Ślady te są obecne we wszystkich środowiskach wodnych na lądzie, a także w środowiskach morskich. W tym przypadku jedynie brach cech właściwych ewolucjom morskim pozwoli na postawienie ścisłej diagnozy — będzie to rozróżnienie spowodowane brakiem cech.

Tak więc środowisko rzeczne potwierdza się jako najtrudniejsze do scharakteryzowania przez ziarno kwarcu.

ZIARNA KWARCU POCHODZENIA MORSKIEGO

Głębsze obszary oceanu o najwyższym stopniu stężenia roztworu krzemionki ($4 \cdot 10^{-9}$), są jako niedosyczone, jeżeli chodzi o kwarc, a bardzo niedosyczone w stosunku do krzemionki bezpostaciowej (R. Siever, 1962). Niedosyczenie to jest jeszcze wydatniejsze w strefach przybrzeżnych, gdzie temperatura podnosi się do 25°C , a rozpuszczalność kwarcu jest rzędu od 7 do $14 \cdot 10^{-6}$, podczas gdy rozpuszczalność krzemionki bezpostaciowej wynosi $115 \cdot 10^{-6}$.

Ewolucja kwarców jest bardzo zróżnicowana w zależności od strefy morza, w której się one znajdują. W związku z tym scharakteryzujemy przebieg ewolucji w wewnętrznej i zewnętrznej (przybrzeżnej) strefie pływów (tabl. IX, X).

ZIARNA KWARCU W WEWNĘTRZNEJ STREFIE PŁYWÓW

Kwarce w wewnętrznej strefie pływów, stale zanurzone w wodzie, znajdują się w niedosyconym środowisku rozpuszczonej krzemionki. Otoczka oraz wtórne wytrącenia krzemionki, charakterystyczne dla ewolucji rzecznej i niektórych profilów glebowych, ulegają tu całkowitemu zanikowi. Proces ten jest ułatwiony dzięki możliwości obtaczania piasków przez fale i prądy morskie.

Środowisko wewnętrznej strefy pływów jest również niedosycone w odniesieniu do kwarcu. Konsekwencją tego jest ruch samego ziarna i pojawienie się na nim śladów rozpuszczania (tabl. IX, fig. 16). Ślady te powstają najpierw na krawędziach i w miejscach uszkodzonych (ślady uderzeń po poprzednich ewolucjach, pęknięcia itp.), a następnie stopniowo rozprzestrzeniają się na całą powierzchnię ziarna. Ziarno przybiera w ten sposób charakterystycznie jednolity wygląd, na którym brak jest jakiegokolwiek wskaźnika poprzedniej ewolucji. Zjawisko rozpuszczania stanowi więc ważny czynnik w procesie zaokrąglania kwarców, o czym donosił już w 1919 r. J. J. Galloway.

ZIARNA KWARCÓW W ZEWNĘTRZNEJ STREFIE PŁYWÓW

Nie da się zaprzeczyć, że w przybrzeżnej strefie pływów kształty ziarn opisane przez D. H. Krinsleya i S. V. Margolisa (1971) występują na stosunkowo dużej powierzchni. Często jednak w osłoniętych strefach przybrzeżnych spotyka się kwarcze ze znikomą ilością znaków V-kształtnych, wykluczając oczywiście inne typy śladów działania mechanicznego, właściwe dla strefy przybrzeżnej.

Stałą cechą przybrzeżnej strefy pływów są dwukrotne w ciągu dnia wynurzenia i zanurzenia w środowisku morskim. Cecha ta pozwala na określenie specyficznego kształtu ziarn dla każdego typu badanej plaży (o dużej, średniej lub małej energii).

Podczas zanurzenia proces rozwoju ziarn jest identyczny jak w wewnętrznej strefie pływów. Jednakże na plażach o dużej i średniej energii działania ślady uderzeń są o wiele liczniejsze lub przynajmniej bardziej wyraziste, ponieważ gwałtowne zderzenia ziarn ze sobą zachodzą podczas każdego pływu morskiego. Związki, które zaobserwowałem między śladami działania mechanicznego, kształtami rozpuszczania a energią środowiska ewolucji, potwierdzają wnioski D. H. Krinsleya i S. V. Margolisa (1971).

Podczas wynurzenia stężenie rozpuszczonej krzemionki w wodzie zatrzymanej we wgłębieniach ziarn stopniowo się podwyższa w wyniku parowania. Lokalne przesylenia powodują w końcowym efekcie wytrącenie krzemionki w postaci osadów wtórnych, wyścielających kawerny. Świadectwem tego mechanizmu jest zachowanie się okrzemek, uwieczonych we wgłębieniach powierzchni ziarn (tabl. VII, fig. 13; tabl. VIII, fig. 14, 15). Wtórne osady krzemionki są zlokalizowane dokładnie we wgłębieniach powierzchni ziarn, które chronią je przed mechanicznym ścieraniem i pozwalają na przetrwanie w okresach zanurzenia mimo zachodzącego rozpuszczania.

Z powyższych rozważań wynika, że kwarcze pochodzenia morskiego charakteryzują następujące właściwości:

a — obecność śladów działania mechanicznego (środowiska o dużej

i średniej energii) z pewnym stopniem ogładzenia (polerowania); najstarsze ślady mogą być zniszczone przez rozpuszczanie;

b — zanik łuskowatej, rozpuszczalnej otoczki, odziedziczonej po procesach wietrzenia lub działania czynników glebowych;

c — zanik wykwitów krzemionki, nawet dobrze wykrystalizowanych;

d — rozpuszczanie strefy przenikania (przejściowej);

e — rozpuszczanie samego kwarcu, z ujawnieniem charakteryzujących je kształtów, prowadzące do typowo „czystego” wyglądu ziarna;

f — występowanie wtórnych osadów krzemionki wyłącznie we wkłęsłościach ziarn (środowisko przybrzeżne);

g — zagęszczenie V-kształtnych śladów działania mechanicznego, pozwalające na określenie poziomu energii środowiska przez porównanie ze strefami towarzyszącymi.

Właściwości te wskazują, że ewolucja ziarn w morzu jest o wiele łatwiejsza do rozpoznania niż ewolucja ziarn w środowisku rzeczonym i są wystarczające dla całkowicie pewnego rozpoznania charakteru ewolucji.

ZIARNA KWARCU POCHODZENIA EOLICZNEGO

We wcześniejszych opracowaniach innych autorów można znaleźć wiele danych dotyczących charakteru ziarn eolicznych. A. Cailleux (1942) podaje, że ilość ziarn „RM” (obtoczonych — matowych) wzrasta proporcjonalnie do siły wiatru działającego na piasek. W 1962 r. D. H. Krinsley przy pomocy młynka kulkowego powoduje sztuczną eolizację na ziarnach kwarcu. Ziarna te porównuje z ziarnami naturalnie obtoczonymi przez wiatr i określa w ten sposób ich cechy. Ph. H. Kuenen (1960) stwierdza, że ścieranie wzrasta wraz z siłą i prędkością wiatru oraz kanciastością i chropowatością powierzchni. Ścieranie eoliczne kwarcu jest 100 do 1000 razy skuteczniejsze, przy tej samej odległości, od działania mechanicznego rzeki, słabsze w przypadku małych ziarn i równe zeru dla ziarn o średnicy 0,05 mm.

W 1971 r. D. H. Krinsley i S. V. Margolis podają syntezę swych badań, z której wynika, że ziarna eoliczne charakteryzują 2 podstawowe cechy:

a — krawędzie sinusoidalne wynikające niewątpliwie z przecięcia lekko wygiętych przelamów muszlowych; przelamy te różnią się od przelamów powstałych w środowisku lodowcowym mniejszymi rozmiarami (średnica nie większa niż 10 μm) i mniejszym zróżnicowaniem, a od przelamów spotykanych w piaskach plażowych — wygiętą krawędzią i większą regularnością;

b — łuki ułożone w szeregi, dające wygląd powierzchni utworzonej w wyniku uderzeń.

Działalność eoliczna przebiega w środowisku lądowym. Nie zachodzi więc tu zjawisko osłaniania ziarna podobne do tego, które powoduje film wodny w środowisku wodnym. Ślady uderzeń, nawet najmniejsze, są dobrze zaznaczone, a przede wszystkim mają zawsze bardzo wyraźne, ostre krawędzie (tabl. I, fig. 1, 2) i stanowią przeciwieństwo kształtów powstałych na kwarcach w środowisku wodnym. Rysy najstarsze przecinają rysy po uderzeniach najnowszych i żadna nie wykazuje śladów wygładzenia.

Te rysy o wyraźnych krawędziach, bez względu na jakikolwiek kształt, wskazują jednoznacznie na ewolucję eoliczną, nawet bardzo krótkotrważą. Miałem w ten sposób możliwość rozpoznania warstwy piasku o grubości 5 cm powstałej w wyniku działalności eolicznej, gdzie kwarcy na $1 \mu^2$ miały zaledwie 0,05 eolicznych znaków V-kształtnych (L. Le Ribault, 1972). Gdy ewolucja eoliczna jest dobrze rozwinięta, można zauważyć kształty opisane przez D. H. Krinsleya. Znajdują się one oczywiście tylko na krawędziach i na płaskich ścianach, a brak ich zupełnie we wgłębieniach ziarn, podobnie jak i wszystkich śladów działania mechanicznego, niezależnie od środowiska.

Zauważyłem, że na ziarnach wydm nadbrzeżnych ślady uderzeń (przede wszystkim V-kształtne) wykazują tendencję do ukierunkowania. Potwierdzają to obserwacje W. Schwarzachera (1951) i J. R. Curraya (1956), którzy dowiedli, że w osadach eolicznych ziarna układają się w taki sposób, że oś największego wydłużenia jest równoległa do przeważającego kierunku wiatru (stąd uzyskują największy opór). Należy przy tym uwzględnić jednak możliwość unieruchomienia ziarn wskutek cementacji czy uwięzienia przez rośliny. Świadczą o tym ślady uderzeń na ziarnach niektórych ławic piaszczystych, o kierunku nie wykazującym żadnego związku z najdłuższą osią ziarn.

Ewolucja eoliczna na ziarnach kwarcu jest więc niewątpliwie najłatwiejsza do ustalenia. Pod binokulem widać ślady silnych uderzeń V-kształtnych oraz charakterystyczne kształty półksiężycowate, gdy ewolucja była pełna. Ziarna matowe wskazują ostatnie stadium ewolucji eolicznej. Początkowe stadium ewolucji (ślady uderzeń o wyraźnych ostrych krawędziach) można odczytać przy zastosowaniu mikroskopu elektronowego typu *Scanning*. Ślady uderzeń eolicznych pozostają na ziarnach bardzo długo; odnajdujemy je często na kwarcach o złożonej ewolucji.

EWOLUCJE ZŁOŻONE

Opisane wyżej cechy kwarców dotyczyły ziarn objętych tylko jednym typem ewolucji (morskiej, rzecznej lub eolicznej). Na ogół jednak piaski złożone są z ziarn, których historia przed etapem końcowego osadzenia jest mniej lub bardziej skomplikowana. Wpływ środowisk może tu odegrać bardzo różnorodną rolę. Problem polega na określeniu tych ostatnich etapów, a zarazem na odtworzeniu stopnia zaawansowania ewolucji prostych i ustalenia ich genezy.

HISTORIA ZIARN — EGZOSKOPIA

ZNACZENIE ŚLADÓW DZIAŁANIA MECHANICZNEGO I CHEMICZNEGO

Ślady uderzeń mechanicznych pozwalają na stwierdzenie czy działanie mechaniczne miało miejsce w powietrzu, czy w środowisku wodnym. W procesie zachodzącym w powietrzu krawędzie uderzeń są ostre, wyraźnie zarysowane, ślady dawniejsze są przecięte przez ślady najświeższe. W środowisku wodnym natomiast istnieje pewien stopień wygładzenia.

Gdy kwarc eoliczny dostaje się do środowiska wodnego, wszystkie eoliczne ślady działania mechanicznego mają jednakowy stopień wygładzenia (zwłaszcza półkieszycowate i miseczkowate), na krawędziach narażonych na uderzenia ukażą się nowe rysy, przede wszystkim V-kształtne, o pewnym stopniu wygładzenia. Jeśli zaś ziarna pochodzenia wodnego przechodzą do środowiska eolicznego, zauważyć można ślady z wygładzonymi krawędziami, pocięte przez znaki V-kształtne, zagłębienia mają natomiast zarys półkieszycowaty i miseczkowaty o ostrych brzegach.

Ślady działania chemicznego, w przeciwieństwie do opisanych wyżej, są umiejscowione bardzo różnorodnie na powierzchni ziarna, zależnie od środowiska wykształcenia. Pozwalają one dokładnie oznaczyć typ ewolucji wodnej i wskazują czy ziarno było unieruchomione, czy pozostawało wolne w czasie działania chemicznego.

Wtórne wytrącanie krzemionki zachodzi w ośrodku przesyconym krzemionką. Można wyróżnić dwa rodzaje wytrąceń: nacieki — występujące zawsze na ziarnach unieruchomionych w strukturze ziemistej — i naskorupienia, które mogą się utworzyć albo na strukturach ziemistych, np. w poziomach glebowych, albo w środowisku wodnym.

Formy rozpuszczania zależne są od budowy krystalicznej kwarcu poddanego działaniu chemicznemu. Występują w postaci czworoboków lub częściej trójkątów. Nie należy ich mylić ze znakami V-kształtnymi powstającymi podczas uderzeń. W przeciwieństwie do tych ostatnich, formy rozpuszczania posiadają zawsze na danej powierzchni krystalicznej ziarna ten sam kierunek i stopień otwarcia, niezależnie od wielkości ziarna. Formy te pozwalają na ustalenie różnicy między środowiskami wodnymi niedosyconymi w rozpuszczoną krzemionkę a poziomami glebowymi, w których zachodzi korozja kwarcu. W pierwszym przypadku rozpuszczanie rozpoczyna się zawsze od krawędzi oraz słabych punktów budowy krystalicznej i następnie rozprzestrzenia się na całą powierzchnię ziarna. W drugim przypadku odwrotnie — korozja przez ukierunkowane krążenie roztworów zachodzi najpierw we wklęsłościach, a następnie obejmuje powierzchnie płaskie.

Te dwa rodzaje cech wskazują, że należy starannie badać krawędzie, płaskie powierzchnie oraz wklęsłości ziarn kwarców, by móc odtworzyć ich przeszłość geologiczną.

Można odtworzyć sześć, niekiedy nawet dziesięć kolejnych faz obróbki tego samego ziarna kwarcu. Po określeniu przeszłości poszczególnych ziarn w badanym osadzie wykonuje się zestawienie 100 lub 200 ziarn kwarcu. Wyniki nanosi się na wykres. Na fig. 1 przedstawiono dane otrzymane przy zastosowaniu tej metody. Dzięki analizie egzoskopowej możemy odtworzyć liczbę typów obróbki każdego ziarna kwarcu.

Na pierwszy plan wysuwają się 2 główne typy pochodzenia: 40% — ziarna obtoczone w procesie wietrzenia, 60% — ziarna obtoczone eolicznie. Pośród tych 60% większość kwarców zachowała ślady okresowego unieruchomienia, o cechach pochodzenia glebowego. Następnie ziarna zostały uniesione przez rzekę, gdzie zmieszały się z ziarnami pochodzenia zwietrzelinowego.

Na drugim miejscu znajduje się skład ziarn, który ma inny charakter: 20% ziarn pochodzenia rzecznoego, 50% ziarn oprócz charakteru rzecznoego przejawia cechy wskazujące na następną obróbkę — morską w wewnętrzn-

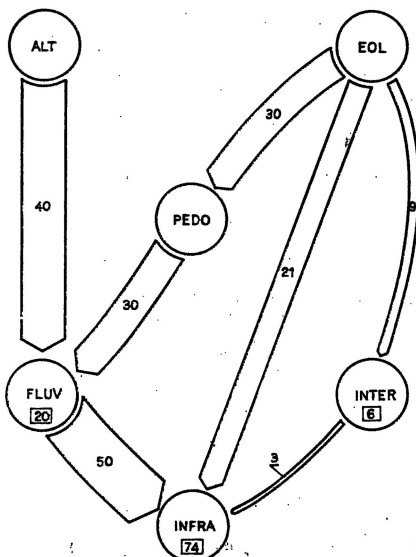


Fig. 1. Wyniki badań egzoskopowych kwarców

Les données de l'exoscopie des quartz

ALT — wietrzenie w skale macierzystej; PEDO — wietrzenie glebowe; FLUV — etap rzeczny; EOL — etap eoliczny; INTER — etap przybrzeżny (morski); INFRA — etap wewnętrznej strefy pływów

Szerokość strzałek przedstawiających przejście ziarna z danego środowiska otoczenia w inne jest proporcjonalna do procentowego udziału tych ziarn; cyfry w kwadratach oznaczają zawartość procentową ziarn charakterystycznych dla danego etapu ewolucji

ALT — altération au sein de la roche-mère; PEDO — altération pédologique; FLUV — épisode fluvial; EOL — épisode éolien; INTER — épisode intertidal; INFRA — épisode infratidal

La largeur des flèches qui représentent le passage des grains d'un environnement à l'autre est proportionnelle au pourcentage des grains ayant subi cette évolution; les chiffres encadrés indiquent le pourcentage de grains qui présentent comme derniers caractères évolutifs inscrits à leur surface ceux qui sont caractéristiques respectivement des épisodes fluvial, infratidal et intertidal

nej strefie pływów, 21% ziarn kwarców przeszło ze środowiska eolicznego bezpośrednio do wewnętrznej strefy pływów morskich, a tylko 9% ziarn pozostało w środowisku bliskim brzegu.

Na trzecim miejscu mamy ziarna charakteryzujące się trzema typami obróbki: 74% ziarn pochodzi z morskiej wewnętrznej strefy pływów, 6% ziarn ze strefy przybrzeżnej, 20% ziarn jest pochodzenia rzecznoego. Mamy więc tu piasek pobrany z zatoki lub delty, pozostający pod silnym oddziaływaniem pływów morskich w pobliżu piaszczystego wybrzeża.

GENEZA ZIARN — ENDOSKOPIA I JEJ ZNACZENIE

Kryształy podczas wzrostu wchłaniają pewne elementy środowiska, umieszczając je w wolnych przestrzeniach struktur. Są to inkluzje pierwotne lub syngenetyczne, dokumentujące środowisko powstania kryształu. Ten prosty model stosuje się do formacji współczesnych, których pojedyncze kryształy nie doznały żadnego ucisku mechanicznego. Natomiast w ska-

łach, gdzie twardnienie powoduje przesunięcie kryształów, tam pęknięcia ułatwiają przenikanie płynów rezydualnych, z których powstają inkluzje posyngeneiczne. W przypadku starych tektonicznie skał — oprócz dwóch opisanych typów inkluzji — znajdują się przestrzenie, wypełnione płynami hydrotermalnymi i gazami. Powstałe z nich inkluzje nazwiemy inkluzjami wtórnymi lub postgenetycznymi.

W zależności od rodzaju inkluzji można wyróżnić wiele typów kwarcu: kwarc wylewne odznaczające się wypełnieniem luk przez szkliwo, kwarc pochodzenia granitowego charakteryzujące się inkluzjami płynnymi, otoczonymi cienkimi igielkami rutyłu, kwarc skał magmowych, pośrednich, zawierające inkluzje płynne z wytrąceniami soli oraz kwarc skał metamorficznych preferujące inkluzje postgenetyczne i kwarc pochodzące z żył i geod, zawierające szczególnie dużo płynów (G. Deicha, 1955).

Kwarc wylewne, jedne z pierwszych znalazły zastosowanie jako wskaźnik sedimentologiczny (E. Roch, G. Deicha, 1966). Dzięki charakterystycznemu kształtowi inkluzji można rzeczywiście wydzielić kryształy pochodzące z różnych prowincji magmatycznych. W ten sposób dzięki kropelkom szkliwa uwiecznionym w kryształach kwarcu odróżniono porfiry permskie z Wogezów od porfirów z Esterel lub od szklistych formacji

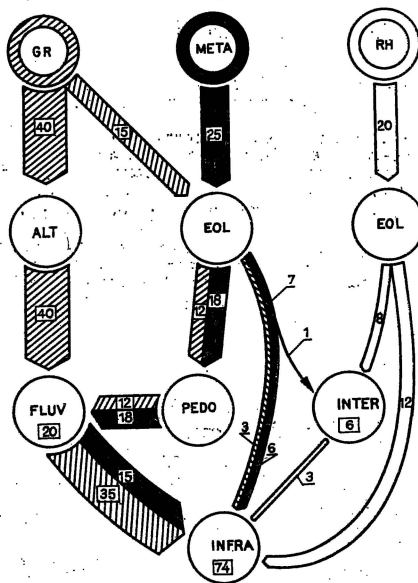


Fig. 2. Wyniki badań endo- i egzoskopowych kwarców

Les donnees de l'endoscopie et de l'exoscopie des quartz

GR — kwarc pochodzenia granitowego; META — kwarc pochodzenia metamorficznego; RH — kwarc pochodzenia rhyolitowego

Zakreskowana powierzchnia oznacza ziarna pochodzenia granitowego, czarna — ziarna pochodzenia metamorficznego, biała — kwarc wylewne; pozostałe oznaczenia jak na fig. 1

GR — quartz d'origine granitique; META — quartz d'origine metamorphique; RH — quartz d'origine rhyolitique

Le figuré tireté présente le grains d'origine granitique, le figuré noir — les grains d'origine metamorphique, l'absence de figuré — le quartz rhyolitiques; autres symboles représente fig. 1

pliocenu z Mont-Doré. Oczywiście rozpoznanie pochodzenia kryształu nie opiera się jedynie na morfologii inkluzji, lecz także na ich wyglądzie i składzie chemicznym (R. Clocchiatti, 1970; R. Clocchiatti, J. Tourenq, 1971).

*
* *

Dzięki analizie egzoskopowej możemy za pomocą mikroskopu elektronowego rozdzielić kwarc różnego pochodzenia. Badając inkluzje w ziarnach kwarcu określamy pochodzenie kwarcu, a więc endoskopia — metoda badania wnętrza struktury kryształu — uzupełnia dane egzoskopii, zajmującej się badaniem wyglądu powierzchni ziarna.

Wyniki otrzymane przez połączenie tych dwóch metod przedstawiono na fig. 2.

Stwierdzamy, że 55% ziarn jest pochodzenia granitowego, 25% pochodzenia metamorficznego, a 20% — pochodzenia wylewnego. Ziarna tych trzech grup przeszły następnie różny typ obróbki. Kwarcie metamorficzne przeszły proces eolizacji, następnie zostały zcementowane, później przeniesione przez rzekę i zmieszane z kwarcami granitowymi pochodzącymi z plaży. Następnie rzeka przeniosła te ziarna do środowiska morskiego, gdzie zmieszały się z kwarcami wylewnymi o cechach ziarn morskich przybrzeżnych, przyniesionych przez prąd.

Podobnie jak w przykładzie przedstawionym na fig. 1, proporcja kwarcu zachowującego cechy strefy przybrzeżnej — 6%, rzecznej — 20%, oraz wewnętrznej strefy pływów — 74% jest charakterystyczna dla piasku pobranego w części zatoki lub delty poddanej silnym pływom morza, w pobliżu piaszczystego wybrzeża.

W konsekwencji określenie środowiska ostatecznego osadzenia piasku kwarcowego zawdzięczamy samej egzoskopii. Opisany przykład wykazuje jednak jak bardzo potrzebna jest endoskopia dla szczegółowego odtworzenia przeszłości próbki. Metoda ta jest ścisłym uzupełnieniem badań egzoskopowych i pozwala odtworzyć etap po etapie historię pochodzenia każdego typu ziarn tworzących próbkę.

Bureau de Recherches Geologiques et Minieres
74, Rue de la Federation, Paris
Nadesłano dnia 28 sierpnia 1975 r.

PIŚMIENNICTWO

- CAILLEUX A. (1942) — Les actions éoliennes périglaciaires en Europe. *Mém. Soc. Géol. France*, **21**, z. 1—2.
- CAILLEUX A., TRICART J. (1959) — Initiation à l'étude des Sables et des Galets, I. Centre Doc. Univ. Paris.
- CLOCCHIATTI R. (1970) — Etude des inclusions vitreuses et de leur altération:

- un exemple régional des Alpes dolomitiques (région de Bolzano, Italie). *Bull. Suisse Minér. Pétrog.*, **50/1**, p. 159—168.
- CLOCCHIATTI R., TOURENQ J. (1971) — Présence de quartz des ponces du Mont-Dore, d'âge Pliocène, dans les argiles sableuses du Bourbonnais. *C. R. Acad. Sc.*, **273**, [D], p. 2453—2455.
- CURRAY J. R. (1956) — Dimensional grain orientation studies of recent coastal sands. *Amer. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **40**, p. 2440—2456.
- DEICHA G. (1955) — Les lacunes des cristaux et leurs inclusions fluides. Masson et Cie éd. Paris.
- DEMPSTER P. B., RITCHIE P. D. (1952) — Surface of finely-ground silica. *Nature*, **169**, p. 538—539.
- DEMPSTER P. B., RITCHIE P. D. (1953) — Physicochemical studies on dusts. V. Examination of finely-ground quartz by differential thermal analysis and other physical methods. *J. Appl. Chem.*, **3**, p. 182—193.
- EHRlich A., TOURENQ J. (1967) — Sur la présence de diatomées épilithes dans les sables actuels de l'Allagnon (Cantal). *C. R. Somm. Soc. Géol. France*, **z. 2**, p. 51—52.
- GALLOWAY J. J. (1919) — The rounding of grains of sand by solution. *Amer. J. Sc.*, **1977**, p. 270—280.
- GIBB J. G., RITCHIE P. D., SHARPE J. W. (1953) — Physicochemical studies on dusts. VI. Electron-optical examination of finely-ground silica. *J. Appl. Chem.*, **3**, p. 213—218.
- HUBSCHMAN J., Le RIBAUT L. (1972) — Détermination, par exoscopie des quartz, de l'origine des limons quaternaires dans le Sud-Est du Bassin Aquitain. *C. R. Acad. Sc.*, **275**, [D], p. 1477—1480.
- INGERSON E., RAMISCH J. L. (1947) — Origin of shapes of quartz sand grains. *Amer. Mineralogists*, **27**, p. 595—606.
- KRINSLEY D. H. (1965a) — Pleistocene Glaciation: A criterion for recognition of its on Set. *Science*, **149**, nr 3682, p. 442—443.
- KRINSLEY D. H., DONAHUE J. (1968a) — Diagenetic surface textures on quartz grains in limestone. *J. Sed. Petr.*, **38**, nr 3, p. 859—862.
- KRINSLEY D. H., DONAHUE J. (1968b) — Methods to study surface textures of sand grains, a discussion. *Sedimentology*, **10**, p. 217—221.
- KRINSLEY D. H., FUNNELL B. H. (1965b) — Environmental history of quartz sand grains from the Lower and Middle Pleistocene of Norfolk, England. *Quart. J. Geol. Soc. London*, **121**, p. 435—461.
- KRINSLEY D. H., MARGOLIS S. V. (1971) — Grain surface textures. **8**, p. 161. In: *Procedures in Sedimentary Petrology*. R. E. Carver éd.
- KRINSLEY D. H., TAKAHASHI T. (1962) — Surface textures of sand grains: An application of electron microscopy. *Science*, **138**, nr 3546, p. 1262—1264.
- KRINSLEY D. H., TAKAHASHI T., SILBERMAN M. L., NEWMAN W. S. (1964) — Transportation of sand grains along the Atlantic Shore of Long Island, New-York: an application of Electron Microscopy. *Marine Geology*, **2**, p. 100—120.
- KUENEN Ph. H. (1959) — Experimental abrasion, 3: Fluvatile action on sand. *Amer. J. Sc.*, **257**, p. 172—190.
- KUENEN Ph. H. (1960) — Experimental abrasion, 4: Eolian action. *J. Geol.*, **68**, p. 427—449.
- LE RIBAUT L. (1971a) — Présence d'une pollicule de silice amorphe à la surface de cristaux de quartz des formations sableuses. *C. R. Acad. Sc.*, **272**, [D], p. 1933—1936.

- LE RIBAUT L. (1971b) — Comportement de la pellicule de silice amorphe sur les cristaux de quartz en fonction des différents milieux évolutifs. C. R. Acad. Sc., **272**, [D], p. 2649—2652.
- LE RIBAUT L. (1972a) — Exoscopie: caractères distinctifs des quartz à évolution fluviatile. C. R. Acad. Sc., **274**, [D], p. 3190—3193.
- LE RIBAUT L. (1972b) — Exoscopie: caractères distinctifs des quartz à évolution marine. C. R. Acad. Sc., **275**, [D], p. 735—738.
- LE RIBAUT L. (1973) — L'exoscopie, méthode de détermination des évolutions subies par les grains de quartz au cours de leur histoire géologique, par l'étude de leurs aspects superficiels au microscope électronique à balayage. Thèse, 29 Juin, Université Paris—Sud.
- LE RIBAUT L. (1974) — L'exoscopie, méthode de détermination de l'évolution subie par les grains de quartz, grâce à l'étude de leurs aspects de surface au m.e.b., Rev. Géog. phys. Géol. dyn., (2), **16**, z. 1, p. 119—130.
- LE RIBAUT L., TOURENQ J. (1972) — Mise en évidence de trois types d'apports détritiques dans les sables et argiles du Bourbonnais d'après l'examen de la surface des grains de quartz au microscope électronique à balayage. C. R. Acad. Sc., **274**, [D], p. 528—531.
- LOFOLI P. (1971) — Fractographie électronique de grains de sable. C. A. Acad. Sc., **273**, [D], p. 462—465.
- LOFOLI-LOBANGA P. (1973) — Contribution à l'endoscopie des quartz détritiques. Thèse. Faculté des Science de Paris, 15 Janvier.
- MARGOLIS S. V., KENNETT J. P. (1971) — Cenozoic Paléoglacial history of Antarctica recorded in subantarctic Deep-Sea Cores. Amer. J. Sc., **271**, p. 1—36.
- MOREY G. W., FOURNIER R. O., ROWE J. J. (1962) — The solubility of quartz in water in the temperature interval from 25°C to 300°C. Geochim. Cosmochim. Acta, **26**, p. 1029—1043.
- MOSS A. J. (1966) — Origin, shaping and significance of quartz sand grains. J. Geol. Soc. Australia, **13**, p. 97—136.
- NAGELSCHEIDT G., GORDON R. L., GRIFFIN O. G. (1952) — Surface of finely-ground Silica. Nature, **169**, p. 539—540.
- ROCH E., DEICHA G. (1966) — Sur des "argilites" de la région de Draguignan (Var). C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., z. 4, p. 145—146.
- SCHWARZACHER W. (1951) — Grain orientation in sands and sandstones. J. Sed. Petr., **21**, p. 162—172.
- SIEVER R. (1962) — Silica solubility, 0°—200°C, and the diagenesis of siliceous sediments. J. Geol., **70**, n. 2, p. 127—150.
- SMALLEY I. J. (1966) — Formation of quartz sand. Nature, **211**, p. 476—479.
- Van LIER J. A., De BRUYN P. L., OVERBEEK Th. G. (1960) — The solubility of quartz. J. Phys. Chem., **64**, p. 1675—1682.

Лойк Ле РИБО

ЭКЗОСКОПИЯ — МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОШЛОГО ОБЛОМОЧНЫХ КВАРЦЕВ

Резюме

Величина и форма зерен кварца обычно определяются средой, в которой они образовались. Исследования под бинокляром, проводившиеся до настоящего времени, не могли дать такого количества информации, какое дает наблюдение самих следов механического или химического воздействия под электронным микроскопом. Следы ударов или осадков выпавшего кремнезема, или формы коррозии на зернах имеют необыкновенно малые размеры (порядка микрона) и только под электронным микроскопом можно наблюдать эти изменения в их начальной стадии.

1. Если происхождение зерен кварца связано с выветренными породами или с почвенными профилями, то признаком их происхождения является небольшой слой (оболочка) растворимого кремнезема, с выцветами или без выцветов кремнезема. Эта оболочка, благодаря своей чувствительности к окружающей среде, будет эволюционировать различным образом, в зависимости от различных свойств среды, в которой она находится.

2. С самого начала изучения вида поверхности кварцевых зерен, главной задачей являлось выделение особенных характерных черт зерен речного происхождения. Характерными чертами отличающими эти зерна являются:

- наличие следов механического воздействия и в некоторой степени сглаживания;
- сильная или слабая растворенность переходной зоны, образовавшейся в результате выветривания материнской породы;
- исчезновение чешуйчатой, растворимой оболочки, образовавшейся также в результате выветривания;
- постепенное растворение выцветов кремнезема с одновременным сглаживанием и выравниванием их поверхности;
- осаждение вторичных осадков на плоских стенках и непосредственно вблизи краев;
- обновление поверхности кварца в углублениях и на плоских стенках.

3. Определены также следующие характерные черты, отличающие зерна кварца морского происхождения:

- наличие следов механического воздействия с некоторой степенью сглаживания (самые ранние следы могут быть уничтожены вследствие растворения);
- исчезновение чешуйчатой, растворимой оболочки, образовавшейся как результат процессов выветривания или действия почвенных факторов;
- исчезновение выцветов кремнезема, даже хорошо кристаллизованного;
- растворение зоны проникновения (переходной);
- растворение самого кварца с проявлением характерных его форм, приводящие к тому, что зерно приобретает типично „чистый“ вид.

4. Несомненно, что легче всего обнаружить на зернах кварца следы золотой деятельности. Под бинокляром видны V-образные следы ударов и характерные следы в форме полумесяца, когда эволюция была полной. Матовые зерна говорят о последней стадии золотой эволюции. Признаки начальной стадии эволюции (следы ударов с четкими острыми краями) можно наблюдать только под электронным микроскопом.

Loïc Le RIBAUT

L'EXOSCOPIE — MÉTHODE DE DETERMINATION DE L'HISTOIRE GÉOLOGIQUE DES QUARTZ DÉTRITIQUES

Resumé

La taille et la forme des grains de quartz sont largement déterminées dans le milieu où ils prennent naissance. On obtient ainsi à la loupe binoculaire davantage d'informations que n'en donne l'étude des seules traces d'actions mécaniques ou d'actions chimiques au microscope électronique. Les traces d'actions mécaniques, les dépôts de la silice et les figures de corrosion pouvant atteindre des tailles extrêmement petites (fraction de micron), seul le microscope électronique à balayage (*Scanning*) permet une fois encore de déceler une évolution à son début.

1. Que les quartz proviennent de roches altérées ou de profiles pédologiques, ils en portent le témoignage sous forme d'une pellicule soluble, avec ou sans fleurs de silice. Celle-ci à sa sensibilité aux conditions de milieu va évoluer différemment selon les divers environnements auxquels elle sera soumise.

2. Depuis les débuts des études sur les aspects de surface des quartz, la mise en évidence de caractères particuliers aux grains fluviatiles est apparue comme le problème majeur. Les caractères distinctifs des quartz fluviatiles sont les suivants:

- apparition de traces d'actions mécaniques avec un gradient de polissage;
- légère ou forte dissolution de la zone de transition héritée de l'altération de la roche-mère;
- disparition de la pellicule écailleuse soluble héritée de l'altération;
- dissolution progressives des fleurs de silice avec polissage et égalisation de la surface de ces dernières;
- formation de dépôts secondaires sur les faces planes à proximité immédiate des arêtes;

— néogénèse de quartz dans les dépressions et sur les faces planes.

3. Les caractères distinctifs des quartz marins sont les suivants:

- apparition des traces d'actions mécaniques avec un gradient de polissage, les plus anciennes pouvant être exploitées par la dissolution;
- disparition de la pellicule écailleuse soluble héritée de l'altération ou de facteurs pédogénétiques;
- disparition des fleurs de silice, même bien organisées;
- dissolution de la zone de transition;
- dissolution du quartz lui-même, avec apparition des figures qui caractérisent celles-ci (le grain acquiert un aspect "propre" typique).

4. L'évolution éolienne est sans doute celle que est la plus facile à diagnostiquer sur un quartz: au microscope optique, quand l'évolution est déjà importante, apparaissent des "V" de chocs importants et des croissants caractéristiques, en outre, les grains sont généralement mats quand l'éolisation représente le dernier stade évolutif. Au microscope électronique à balayage (m.e.b.), les traces de chocs à bords trachants et nets permettent de diagnostiquer même évolution à son début.

TABLICA I

Ślady uderzeń na powierzchni ziarn kwarcu

Les traces de chocs

Fig. 1. Typowe rogalikowate ślady uderzeń eolicznych (o) ostrych brzegach, bez śladów wygładzania). Próbka z Haute-Plage, Montmartin, Manche — Francja; pow. 2000 ×

Croissant de choc typiquement éolien (bordure aigue, sans la moindre trace de polissage). Echantillon de Haute-Plage, Montmartin, Manche — France; grand. 2000 ×

Fig. 2. Typowy V-kształtny ślad uderzenia eolicznego, przecinający starsze ślady o odmiennych kierunkach. Porównaj z tabl. II, fig. 3, na której ślady rozpuszczania są całkowicie różne. Ślady V-kształtne występują na kwarcach eolicznych, rzecznych, morskich i lodowcowych. Próbka z Haute-Plage, Montmartin, Manche — Francja; pow. 2000 ×

“V” de choc typiquement éolien, recoupant une trace de choc plus ancienne. L'orientation très variable des “V” de choc permet de les différencier de figures de dissolution (tabl. II, fig. 3), qui suivent l'édifice cristallin du quartz. Les “V” de choc existent sur le quartz éoliens, fluviatiles, marins et glaciaires. Echantillon de Haute-Plage, Montmartin, Manche — France; grand. 2000 ×

TABLICA II

Kwarcze zwietrzałe i kwarcze glebowe

Les quartz d'alterité et les quartz pédologiques

Fig. 3. Typowe kształty rozpuszczania: kierunki i odpowiadające kąty oraz średnice każdej z tych figur są takie same. Próbka piasków z lasów Kamerunu; pow. 10 000 ×

Figures de dissolution typiques: l'orientation et les angles homologues sont identiques d'une figure à l'autre, quelle que soit la dimension de ces dernières. Echantillon de sable forestier, Cameroun; grand. 10 000 ×

Fig. 4. Warstewka naciekowej krzemionki na kwarcu pochodzenia glebowego, w strefie nagromadzenia krzemionki. Drobnę rysy pochodzą od zadrapań narożami kwarcu, który ulegał niedalekiemu transportowi. Próbka riolitów z l'Estérel — Francja; pow. 10 000 ×

Pellicule de silice soluble “en coulées” sur un quartz ayant subi une évolution pédologique dans une zone où s'accumulait la silice. Les écailles qui apparaissent sur ce cliché disparaissent sur les arêtes du quartz dès que celui-ci subit le plus léger transport. Echantillon des rhyolites de l'Estérel — France; grand. 10 000 ×

TABLICA III

Kwarcze zwietrzałe i kwarcze glebowe

Les quartz d'alterité et les quartz pédologiques

Fig. 5. Inny wygląd warstewki naciekowej krzemionki na kwarcach pochodzących z piasków granitowych. Próbka z Athis (Normandia) — Francja; pow. 10 000 ×
Autres aspect d'une pellicule siliceuse “en coulées” sur un quartz en provenance d'une arène granitique. Echantillon en provenance d'Athis (Normandie) — France; grand. 10 000 ×

Fig. 6. Umieszczenie rozpuszczalnej krzemionki na kwarcu ze złoza piasków. Bardzo dobrze widoczne rysy z prawej strony zdjęcia. Pow. 10 000 ×
Placage de silice soluble sur un quartz en provenance d'une arène. Les écailles sont très visibles à droite de cliché. Grand. 10 000 ×

TABLICA IV

Kwarce zwietrzałe i kwarce glebowe

Les quartz d'alterité et les quartz pédologiques

Fig. 7. Piękne wykwitły (kwiaty) krzemionki na kwarcu zwietrzałej geody. Widać dwie kolejne generacje: bardzo duże kwiaty dobrze wykrystalizowanej krzemionki w ośrodku, otoczone dużo mniejszymi, źle wykrystalizowanymi kwiatami krzemionki. Kwiaty te powstały przez krystalizację osadu krzemionki na dnie okrągłych zagłębień, która zaznacza się jeszcze na obwodzie. Saint-Prix i Morvan — Francja;

pow. 3000 X

Très bel ensemble de fleurs de silice sur un quartz de géode altérée. On distingue deux générations successives: la très grande fleur bien cristallisée du centre est en effet entourée de fleurs beaucoup plus petites et mal cristallisées. Ces fleurs se sont formées par cristallisation d'un dépôt de silice au fond d'une dépression circulaire, dont on discerne encore le contour. Saint-Prix et Morvan — France; grand.

3000 X

TABLICA V

Kwarce rzeczne

Les quartz fluviatiles

Fig. 8. Ślady uderzeń wykazujące pewien stopień ogładzenia (otarcia), charakterystyczny dla kwarcu środowiska wodnego. Rysy najstarsze (1) są najbardziej wygładzone, najmłodsze (świeże) mają dobrze zaznaczone kontury (3), średnio wygładzone (2) mają wiek pośredni. Nord de Jenzat — Francja. Pow. 3000 X

Traces de chocs présentant un gradient d'émoussé caractéristique des quartz ayant évolué en milieu aquatique: les traces les plus anciennes (1) sont les plus polies, les traces les plus récentes ont un contour bien marqué (3), en (2) "V" de choc moyennement poli, donc d'âge intermédiaire entre celui des traces. Nord de Jenzat — France, grand. 3000 X

Fig. 9. Grupa kwiatów krzemionki. Zaznacza się okrągłe zagłębienie w kwarcu, w którym wykształciły się te kwiaty w czasie jego wietrzenia. Dwa kwiaty na dole nie wykazują żadnych zmian w naturalnych kształtach, natomiast kwiat na górze wykazuje zaawansowany stopień rozpuszczania. Gronowaty osad krzemionki pochodzenia wodnego pokrywa całą powierzchnię kwarcu. Finistère — Francja. Pow. 3000 X

3000 X

Groupe de fleurs de silice. On distingue nettement la dépression circulaire (ancienne cavité géomorphique) dans laquelle elles se sont organisées au cours de l'altération du quartz qui les porte. Les deux fleurs du bas ne montrent guère de modifications par rapport à leur aspect originel. Par contre, la fleur du haut montre des indices caractéristiques d'une dissolution déjà avancée. Des dépôts siliceux globuleux d'origine fluvatile parsèment en outre la surface du quartz. Finistère — France. Grand. 3000 X

TABLICA VI

Kwarce rzeczne

Les quartz fluviatiles

Fig. 10. Okrzemki odsłonięte z osadów krzemionki na płaskiej powierzchni kwarcu pochodzenia rzecznoego o średniej energii. Marnay-Sur-Seine, Aube — Francja.

Pow. 3000 X

Diatomée recouverte de dépôts siliceux, sur une face plane de quartz évoluant en milieu fluviatile où règne une agitation moyenne. Marnay-Sur-Seine, Aube — France. Grand. 3000 X

Fig. 11. Neogeneza (odnowienie) kwarcu w niewielkim zagłębieniu powstałym na powierzchni kwarcu rzecznoego. Marnay-Sur-Seine, Aube — Francja. Pow. 10 000 X
Néogénèse des quartz dans une dépression très peu profonde affectant la surface d'un grain de quartz fluviatile. Marnay-Sur-Seine, Aube — France. Grand. 10 000 X

TABLICA VII

Kwarce strefy przybrzeżnej

Les quartz intertidaux

Fig. 12. Rozpuszczające się kwiaty krzemionki. Pozostały tylko „szkielety” dobrze wykrystalizowane. Pow. 4000 X

Fleur de silice en voie de dissolution. Il ne reste plus ici que le “squelette” d'une fleur bien cristallisée. Grand. 4000 X

Fig. 13. Typowy wygląd kwarcu przybrzeżnego. Powierzchnie i krawędzie ziarn są czyste, pozbawione nalotu krzemionki. Natomiast liczne okrzemki są uwięzione w krzemionce wytrąconej na dnie zagłębienia, środkowa część zdjęcia. Martynika.

Pow. 4000 X

Aspect typique d'un quartz intertidal: les arêtes et les faces planes du grain sont propres, dépourvues de dépôts siliceux. Par contre, de nombreuses diatomées sont piégées par la précipitation de silice au fond de la dépression qui apparaît au centre de la photo. Grand. 4000 X

TABLICA VIII

Kwarce strefy przybrzeżnej

Les quartz intertidaux

Fig. 14. Resztki szkliwa wulkanicznego na dnie zagłębienia — wskazane strzałką. Jest to dawna inkluzja szklista w kwarcu riolitycznym. Szczegół z fig. 13. Pow. 1000 X

Détail de la photo précédente. On distingue (flèche) des restes de verre volcanique au fond de la dépression: celle-ci est une ancienne inclusion vitreuse de quartz rhyolitique. Grand. 1000 X

Fig. 15. Na tym samym kwarcu (fig. 12, 13) widać jak okrzemki są scementowane przez wytrąconą krzemionkę w warunkach przybrzeżnych. Pod okrzemkami widać szkliwo wulkaniczne. Pow. 2000 X

Toujours sur le même quartz, ce cliché montre (flèches) comment les diatomées sont cimentées par les dépôts siliceux intertidaux. Sous les diatomées, on distingue le verre volcanique. Grand. 2000 X

TABLICA IX

Kwarce morskie

Les quartz marines

Fig. 16. Kwarc o powierzchni bardzo czystej, także w zagłębieniach, z wewnętrznej strefy pływów. Kształty rozpuszczania pojawiają się na krawędziach — strzałka — i stąd zaczynają atakować powierzchnię. Somme — Francja. Pow. 10 000 X

Les quartz infratidaux se caractérisent par une surface très propre, y compris au fond des dépressions qui affectent leur surface. Des figures de dissolution (flèche) apparaissent sur les arêtes, puis s'étendent à toute la surface du grain. Somme — France. Grand. 10 000 X

Fig. 17. Kwarc morski. Na krawędziach kwarcu ślady uderzeń z pewnym stopniem wygładzenia wskazują na transport wodny. Okrzemki w zagłębieniach świadczą o poprzedniej ewolucji w środowisku morskim, przybrzeżnym. Martynika. Pow. 1000 X

Le quartz marin. Sur les arêtes de ce quartz, les traces de choc à gradient de polissage prouvent un transport aquatique. Dans les dépressions, des diatomées indiquent que ce quartz a subi une évolution intertidale. Martinique. Grand. 1000 X

TABLICA X

Kwarcze morskie

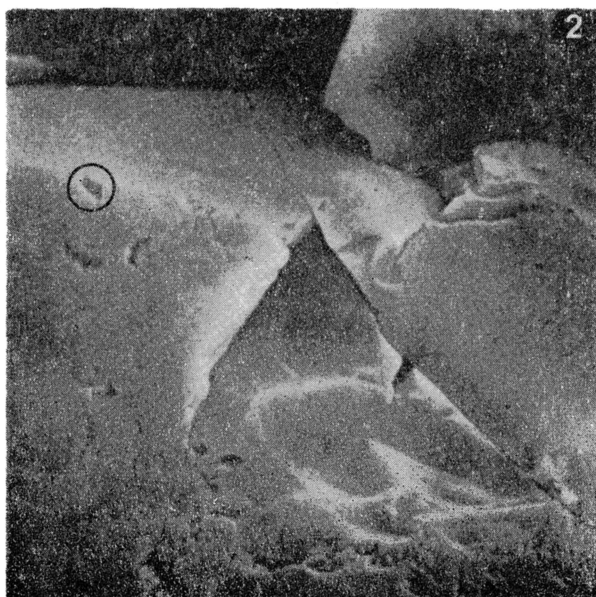
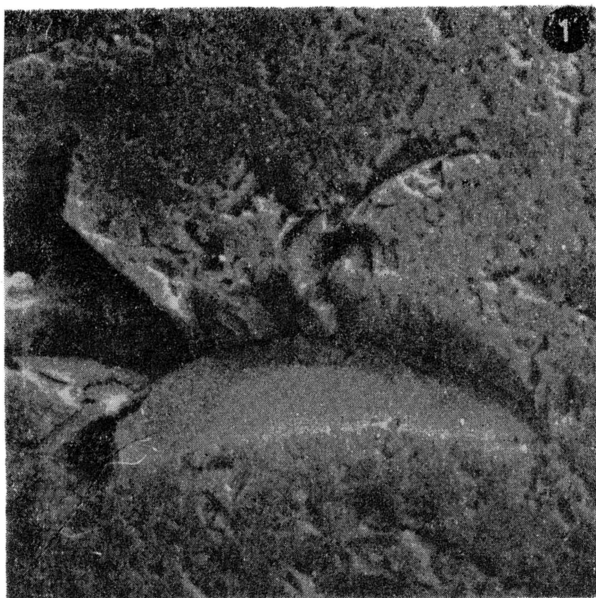
Les quartz marines

Fig. 18. Na kwarcu z fig. 17 przy znaczniejszym powiększeniu (10 000 \times) widać ślady rozpuszczania krzemionki — strzałką — cementującej okrzemki, brak też osadów świeżych. Znaczy to, że kwarc ze strefy morskiej przybrzeżnej dostał się do wewnętrznej strefy pływów. Pow. 10 000 \times

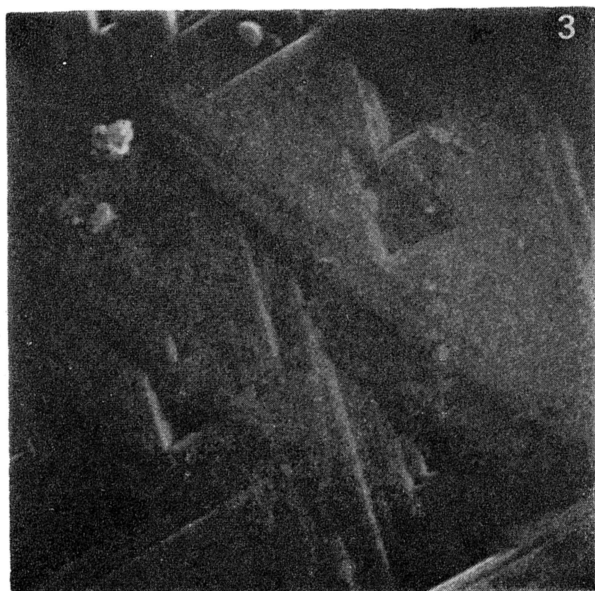
Sur le même quartz que celui présenté figure 17, un grandissement plus élevé révèle que les diatomées présentent (flèche) une dissolution de leur revêtement de dépôts siliceux d'origine intertidale. En outre, on ne distingue aucun dépôts frais. Par conséquent, le quartz a subi d'abord une évolution intertidale, puis est descendu dans la zone infratidale. Grand. 10 000 \times

Fig. 19. Widać liczne ślady rozpuszczania na całej powierzchni ziarna. Jest to więc ewolucja w wewnętrznej strefie pływów. Lecz na dnie form rozpuszczania widać okrzemki cementowane świeżym nalotem krzemionki. Ziarno dostało się więc do strefy przybrzeżnej. Plaża de Pirou, Manche — Francja. Pow. 5000 \times

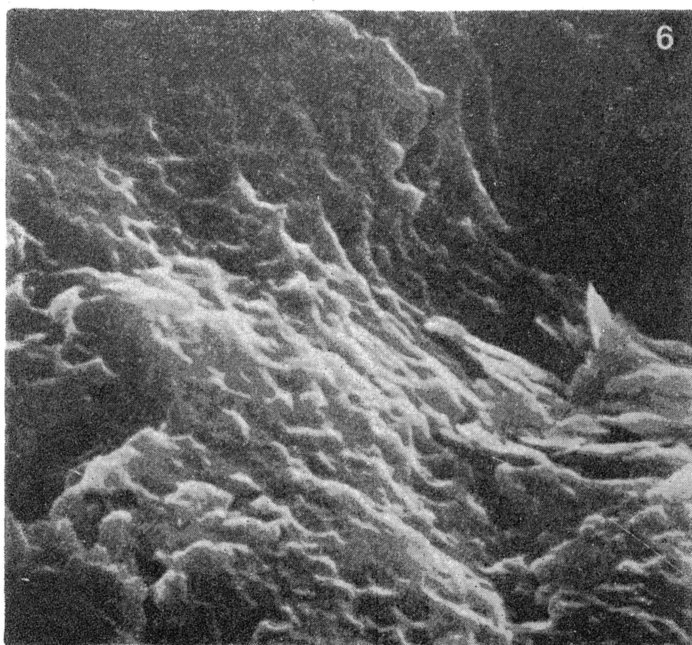
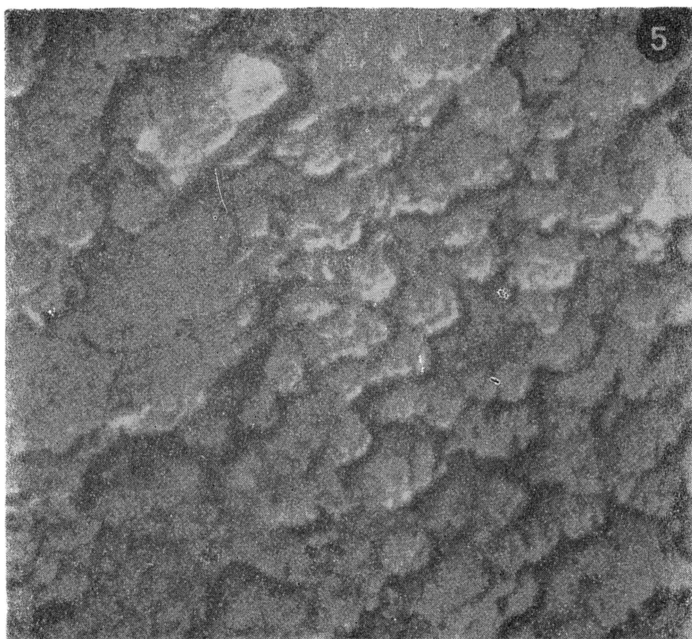
On reconnaît ici de nombreuses figures de dissolution; celles-ci affectent toute la surface du grain de quartz: il a donc subi une évolution infratidale. Mais au fond des figures de dissolution les plus profondes, des diatomées sont cimentées par des dépôts siliceux frais: le grain de quartz, après avoir évolué dans la zone infratidale, est donc remonté dans la zone intertidale. Plage de Pirou, Manche — France. Grand. 5000 \times



Loïc Le RIBAUT — Egzoskopia — metoda określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych



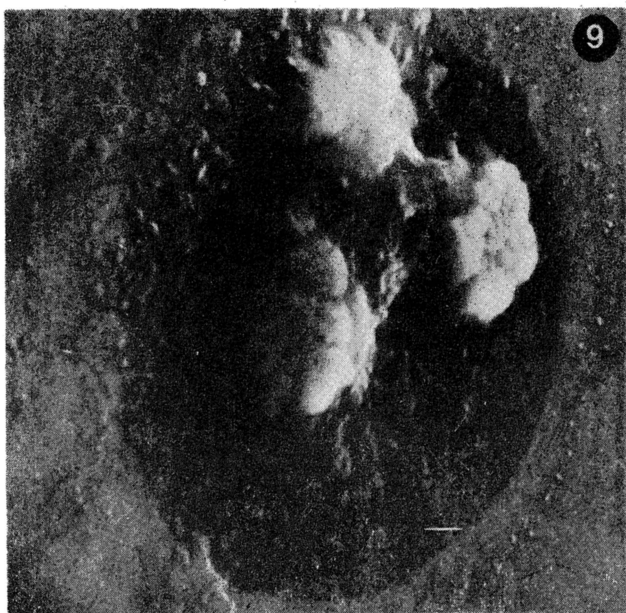
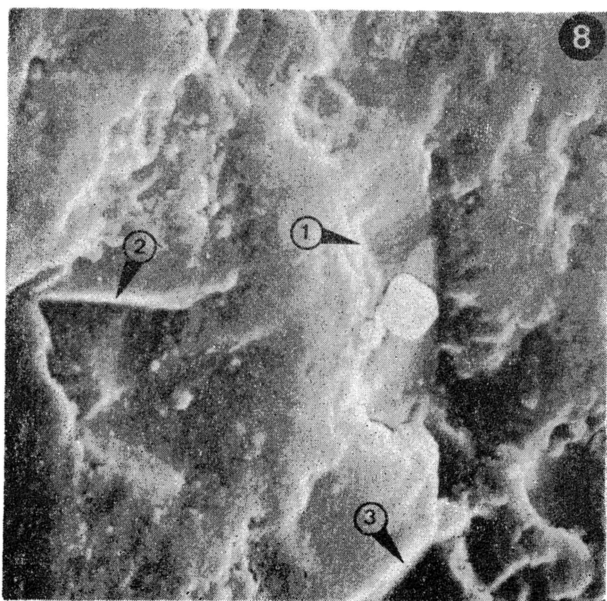
Loïc Le RIBAULT — Egzoskopia — metod określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych



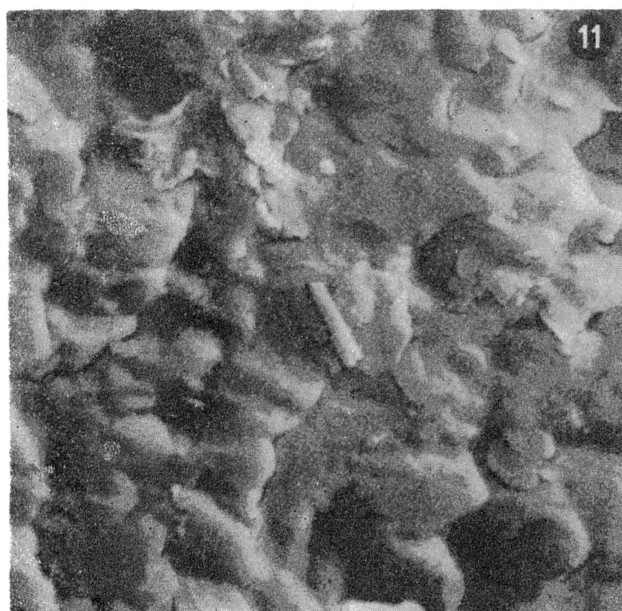
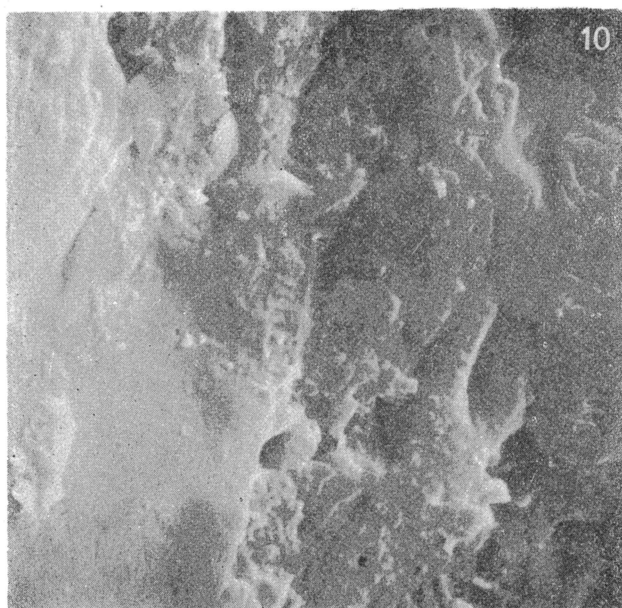
Łoïc Le RIBAULT — Egzoskopia — metod określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych



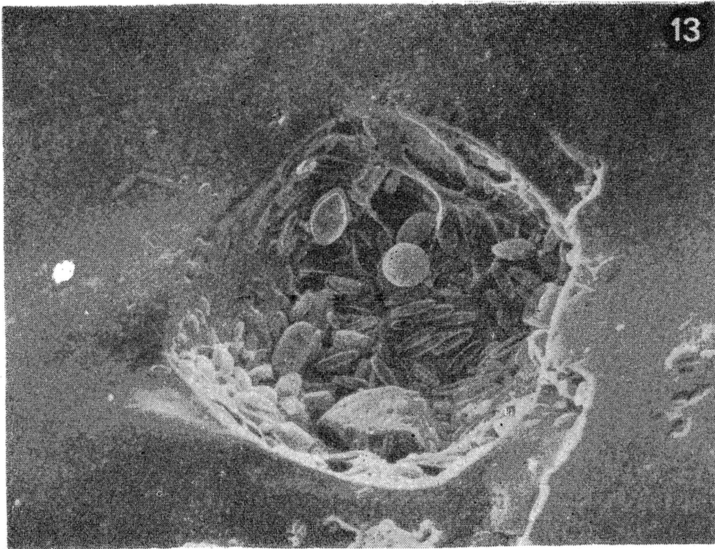
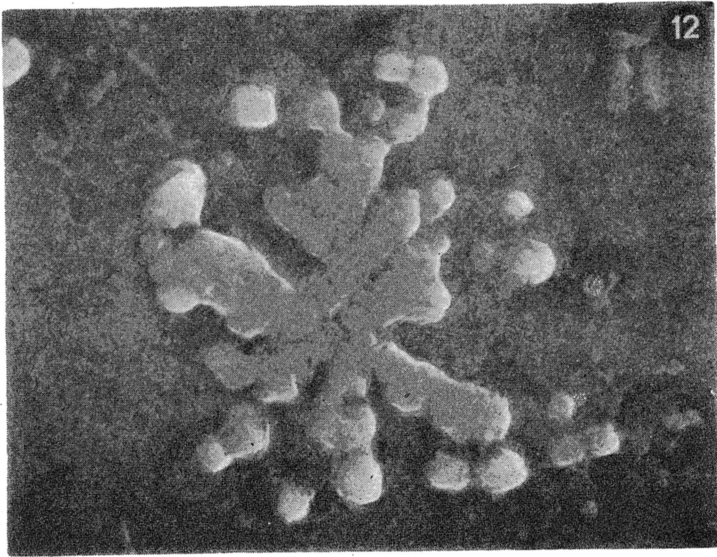
Łoic Le RIBAUT — Egzoskopia — metoda określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych



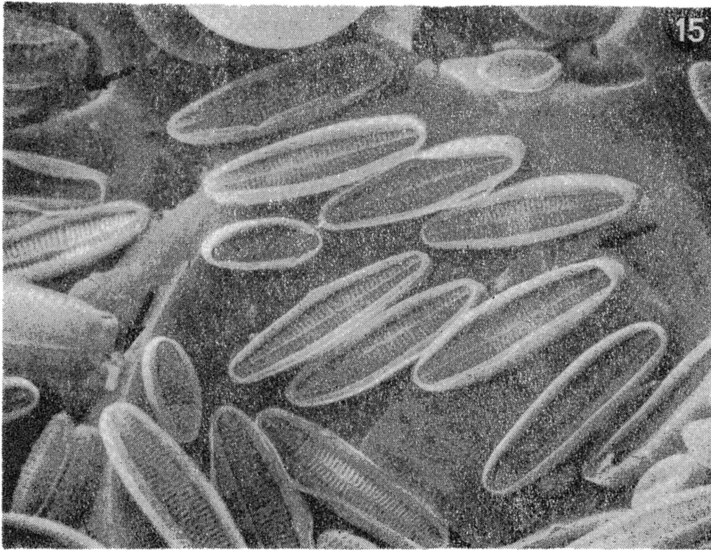
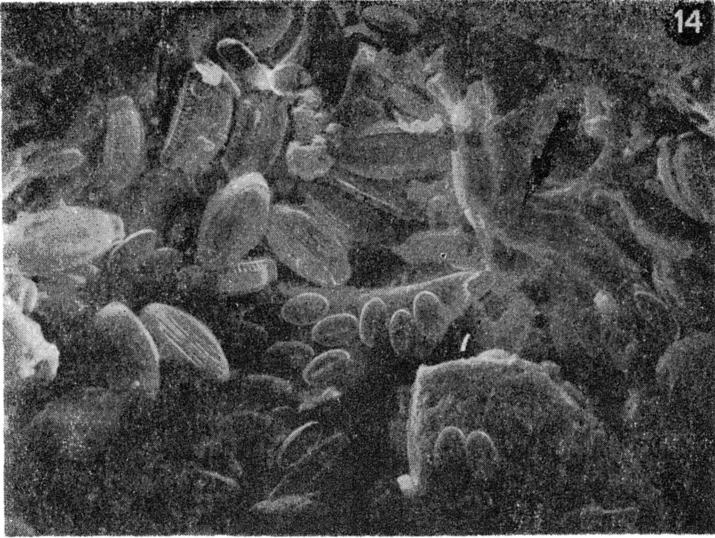
Łoic Le RIBAULT — Egzoskopia — metoda określenia geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych



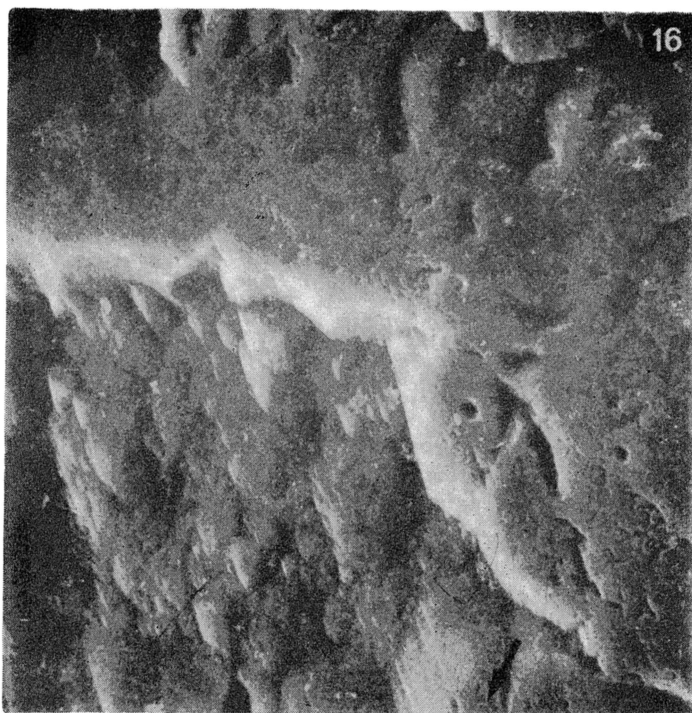
Loïc Le RIBAULT — Egzoskopia — metod określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych



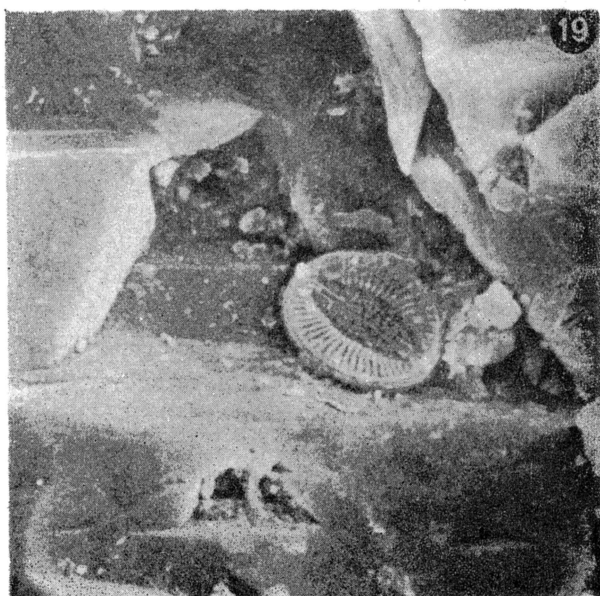
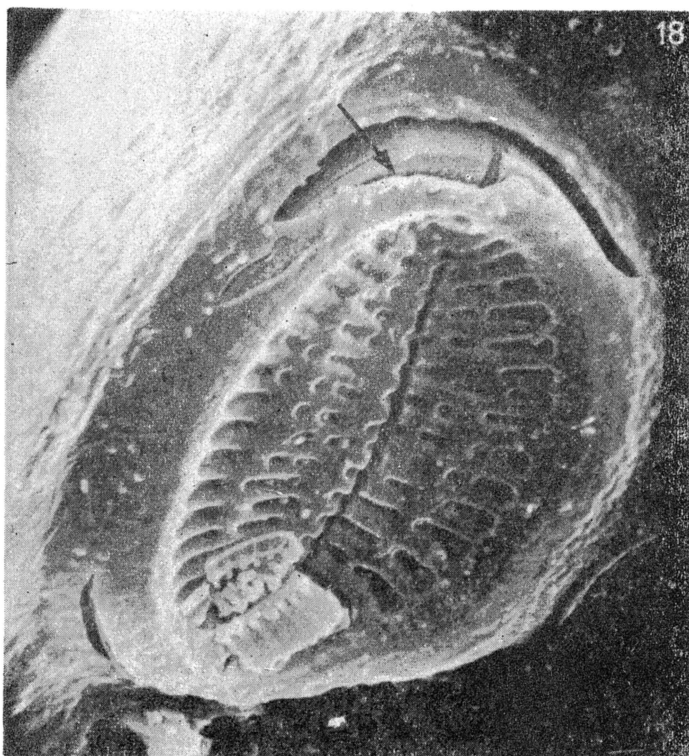
Loïc Le RIBAULT — Egzoskopia — metod określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych



ŁoŃc Le RIBAUT — Egzoskopia — metoda okreŃlania geologicznej przeszłości kwarców de-
trytycznych



Loïc Le RIBAULT — Egzoskopia — metod określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych



Łoic Le RIBAUT — Egzoskopia — metoda określania geologicznej przeszłości kwarców detrytycznych