

RAFAŁ UNRUG

Współczesny transport i sedymentacja żwirów w dolinie Dunajca

TREŚĆ: Wstęp — Teren — Materiał — Charakter transportu — Procesy działające w czasie transportu żwirów: niszczenie transportowanych fragmentów skalnych i selektywny transport; wielkość transportowanych fragmentów skalnych; stopień obtoczenia i kulistość otoczków; orientacja otoczków — Metodyka pobierania prób i pomiarów: jednostka sedymentacyjna; wielkość otoczków; skład petrograficzny żwiru; kulistość i stopień obtoczenia; orientacja otoczków — Wyniki i ich interpretacja: zmienność wielkości transportowanych fragmentów skalnych; zmienność składu petrograficznego żwiru; zmienność kulistości i stopnia obtoczenia; związek kulistości ze stopniem obtoczenia; orientacja otoczków; mechanizm transportu i depozycji żwirów — Wnioski — Literatura cytowana

WSTĘP

Opracowanie zagadnienia współczesnego transportu i sedymentacji żwirów w dolinie Dunajca rozpocząłem w 1954 roku, zachęcony do podjęcia tego tematu przez Prof. M. Książkiewicza i Doc. St. Dżułyńskiego. Prace terenowe, finansowane przez Pracownię Geologiczno-Stratygraficzną PAN, przeprowadziłem w miesiącach letnich 1954 i 1955 r. Opracowanie kameralne wykonałem w Zakładzie Geologii Fizycznej Akademii Górniczo-Hutniczej. Celem pracy było poznanie zmienności cech żwiru będącej wynikiem procesów działających w czasie transportu przez prąd trakcyjny, oraz orientacji otoczków i jej związku z mechanizmem depozycji. Jest moim miłym obowiązkiem złożyć podziękowanie Prof. M. Książkiewiczowi i Doc. St. Dżułyńskiemu za umożliwienie mi wykonania tej pracy i cenne wskazówki, jakich zechcieli mi udzielić w czasie badań terenowych i prac kameralnych.

TEREN

Dunajec powstaje z połączenia się trzech rzek Podhala: Czarnego Dunajca, Białego Dunajca i Białki, spływających z północnych stoków Tatr. Rzeki te łączą się ze sobą na obszarze Kotliny Nowotarskiej. Po jej

przepłynięciu Dunajec przebija się przez Pieniński Pas Skałkowy, wkracza na obszar Karpat fliszowych, przepływa przez Kotlinę Krościenka i po przebiciu się wąską doliną przez Beskid Sądecki wpływa do Kotliny Sądeckiej. Tu łączy się z Dunajcem największy jego dopływ — Poprad, nio-

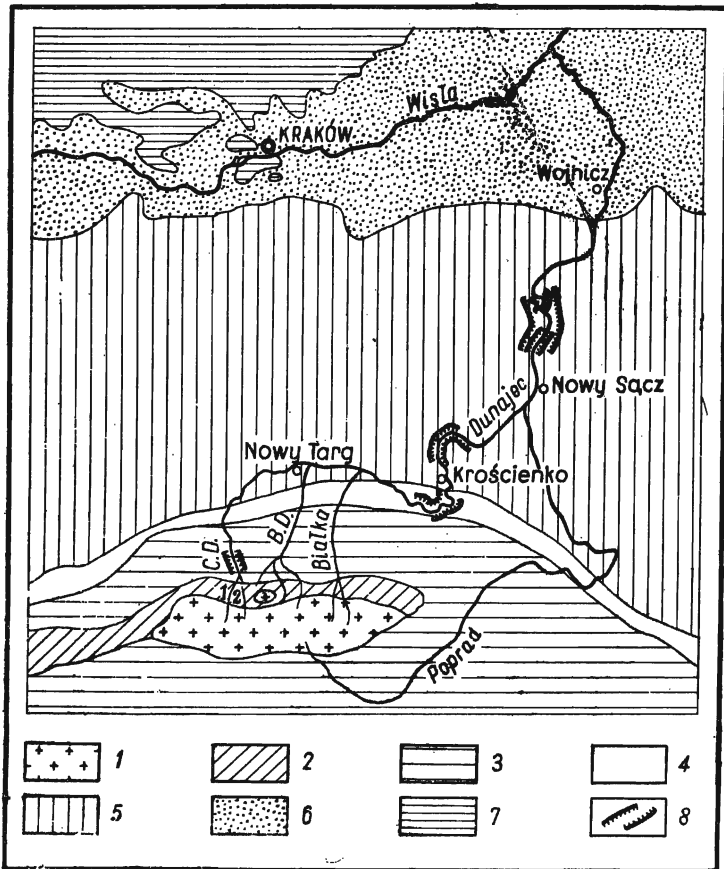


Fig. 1

Mapka geologiczna doliny Dunajca

1 granity i skały metamorficzne, 2 mezozoik tatrzański, 3 flisz podhalański, 4 pieniński pas skałkowy, 5 Karpaty fliszowe, 6 miocen Niziny Podkarpackiej, 7 mezozoik Wyżyny Krakowskiej, 8 odcinki doliny Dunajca o charakterze przełomowym. C. D. Czarny Dunajec. B. D. Biały Dunajec, 1 Potok Chochołowski, 2 Potok Kościeliski

Geological sketch map of the Dunajec Valley

1 granites and metamorphic rocks, 2 Tatra Mesozoic, 3 Podhale Flysch, 4 Pieniny Klippen belt, 5 Flysch Carpathians, 6 Sub-Carpathian Miocene, 7 Mesozoic of the Cracow Upland, 8 gap sectors of the Dunajec Valley, C. D. Czarny Dunajec River, B. D. Biały Dunajec River, 1 Chochołowski Stream, 2 Kościeliski Stream

sący wody spływające z południowych stoków Tatr. Kotlina Sądecka zamknięta jest od północy przez Pogórze Rożnowskie. W przełomie przez to pasmo dolina Dunajca przegrodzona jest zaporami w Rożnowie i Czchowie. Łączna długość obu jezior zaporowych wynosi około 40 km. Poniżej Czchowa Dunajec płynie szeroką doliną przez Pogórze Wiśnickie i koło Wojnicza opuszcza Karpaty fliszowe wpływając na miocen Niziny Podkarpackiej. W Ujściu Jezuickim Dunajec łączy się z Wisłą (fig. 1).

Dolina Dunajca jest terenem szczególnie dogodnym dla prowadzenia badań nad wpływem transportu na zmienność cech osadu. Wśród żwirów niesionych przez Dunajec można łatwo wyróżnić otoczaki skał tatrzańskich, dla których długość transportu może być dokładnie określona. Ponadto na przestrzeni swej 247-kilometrowej doliny Dunajec płynie przez teren o bardzo urozmaiconej morfologii i zmienia silnie swój gradient. Źródłowe potoki Dunajca wypływające z dolin tatrzańskich są typowymi strumieniami górskimi, w swym środkowym biegu Dunajec jest rzeką górską, przebijającą się szeregiem przełomów przez grzbiety oddzielające od siebie śródgórskie kotliny, odcinek zaś pomiędzy brzegiem Karpat a ujściem Dunajca do Wisły ma charakter bystrej wprawdzie, lecz już nizinnej rzeki. Umożliwia to prześledzenie zmienności cech żwirów w ramach zamkniętego, lecz zróżnicowanego wewnątrznie naturalnego środowiska.

Badania nad zmiennością cech otoczków skał tatrzańskich zostały przeprowadzone na całej długości doliny Dunajca. Na obszarze Podhala została opracowana dolina Czarnego Dunajca, gdyż rzeka ta, płynąca z Tatr Zachodnich, których budowa jest pod względem petrograficznym bardziej urozmaicona niż budowa Tatr Wysokich, niesie żwiry bardziej różnorodne, co umożliwiło przeprowadzenie szerszych studiów nad wpływem długości transportu na skład petrograficzny żwiru.

MATERIAŁ

Materiał tatrzański znoszony jest do doliny Dunajca z północnych stoków Tatr przez Czarny Dunajec, Biały Dunajec i Białkę, których długości i gradienty są podobne. Otoczaki skał tatrzańskich pochodzące z południowych stoków Tatr donoszone są przez Poprad, uchodzący do doliny Dunajca pod Starym Sączem. Otoczaki skał tatrzańskich niesione przez Poprad przebywają dłuższą drogę, niż otoczaki niesione przez Dunajec. Żwiry Popradu zawierają jednak zaledwie około 10% otoczków skał tatrzańskich i ta niewielka domieszka nie wpływa zupełnie na przebieg rozpatrywanej zmienności cech otoczków niesionych przez Dunajec.

Potoki uchodzące do Dunajca donoszą do jego łożyska otoczaki skał tatrzańskich pochodzące z wysokich tarasów plejstoceńskich, które powstały w zupełnie innych warunkach klimatycznych i w innych niż dzisiaj

warunkach transportu. Po przejrzaniu stanu zachowania materiału tatrzańskiego w tarasach okazało się jednak, że z tarasów donoszone są wyłącznie otoczaki kwarcytowe. Znajdujące się w wysokich tarasach otoczaki granitu są tak silnie zwietrzałe, że nie wytrzymują nawet krótkiego transportu i ulegają zniszczeniu już w łóżyskach potoków, nie docierając do Dunajca. Otoczaki granitu znajdujące się we współczesnych kamieńcach Dunajca są więc transportowane współcześnie w łóżysku rzeki, bądź też pochodzą z najniższego tarasu, który, jak stwierdza Klimaszewski (1937), jest bieżąco akumulowany.

Otoczaki granitu tatrzańskiego są więc materiałem, którego pochodzenie i długość transportu mogą być dokładnie i jednoznacznie określone. Dlatego też zmienność wielkości, stopnia obtoczenia i kulistości oraz kształtu, zostały zbadane na przykładzie otoczków granitowych.

Na terenie Podhala żwiry Dunajca są bardzo intensywnie eksploatowane. Niezależnie od istniejących żwirowni ludność miejscowa po każdym przyborze wody wybiera wszystkie większe bloki z kamieńców i łóżyska rzeki. Dlatego kamieńce Dunajca obserwować można w ich naturalnej postaci tylko bezpośrednio po opadnięciu wody.

CHARAKTER TRANSPORTU

Stan wód w Dunajcu jest bardzo zmienny (fig. 2). Maksymalne stany wody przypadające na wiosnę związane są z topnieniem śniegów, przybory letnie i jesienne są wynikiem dużych opadów w Karpatach. Charakterystyczny jest bardzo gwałtowny przebieg wezbrań i nieco powolniejsze opadanie wód.

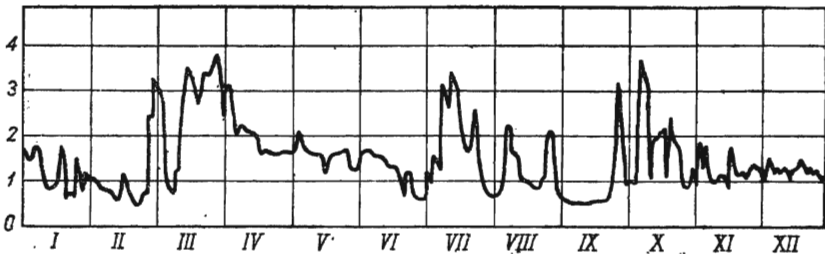


Fig. 2

Zmienność stanów wód w Dunajcu w Zabnie (229 kilometr doliny); na osi odciętych — czas w miesiącach, na osi rzędnych — stan wody w m. Wg Roczn. Hydrogr. 1945

Water level variation in the Dunajec river at Zabno (229th km of valley); time in months (abscissa), water level in metres (ordinate). (Rocznik Hydrograficzny, 1945)

Transport żwiru w łóżysku Dunajca nie jest ciągły, lecz ogranicza się do wysokich stanów wody. Przy niskim stanie wody nie obserwuje się żadnego przemieszczania materiału w łóżysku rzeki. Koryto Dunajca wysłane jest warstwą przemytego żwiru składającego się z dużych otoczków, która opancerza dno chroniąc przed erozją przy niskich stanach wody niżej leżące warstwy niewysortowanego żwiru i piasku.

Swobodny transport żwiru w dolinie Dunajca przerwany został przed dwudziestu laty, z chwilą przegrodzenia doliny zaporą w Rożnowie, a później i w Czchowie. Poniżej zapory w Czchowie ma dziś miejsce intensywne erozja wgłębna i boczna. Dunajec wcina się tutaj w swoje aluwia. Materiał tatrzański niesiony przez Dunajec poniżej zapory w Czchowie pochodzi — z wyjątkiem części otoczków kwarcytowych — z najniższego tarasu. Transport jego podzielić można na dwa etapy: etap pierwszy zakończył się depozycją w holocenijskim tarasie poniżej Czchowa, etap drugi trwa dzisiaj.

Wpływ zapór na warunki transportu w dolnym biegu Dunajca nie jest zbyt duży. Z reguły w czasie silnych przyborów w górnym biegu oba zbiorniki nie wystarczają do zmagazynowania wody i po wypełnieniu ich nadmiar wód jest wypuszczany przez zapory. Panująca w górnym biegu periodyczność i gwałtowność transportu zostaje więc zachowana i poniżej zapór. Współczesny transport żwirów w dolinie Dunajca odbywa się więc na całej długości rzeki w warunkach porównywalnych.

PROCESY DZIAŁAJĄCE W CZASIE TRANSPORTU ŻWIRÓW

Skład petrograficzny żwirów pochodzenia rzecznoego zmienia się w kierunku dolnego biegu rzeki; zmienia się też wielkość otoczków i ich cechy geometryczne: kształt, kulistość i stopień obtoczenia. Zmienność cech żwirów spowodowana jest działającymi w czasie transportu procesami niszczenia otoczków oraz sortowaniem materiału. Zależności istniejące pomiędzy długością transportu a zmiennością cech żwirów poznane są jeszcze słabo. Świadczą o tym duże rozbieżności panujące w poglądach autorów zajmujących się tymi problemami.

Niszczenie transportowanych fragmentów skalnych i selektywny transport

Niszczenie transportowanych fragmentów skalnych polegać może na ścieraniu, rozbijaniu lub rozgniataniu (Marshall 1927/28, fide Pettijohn 1949). Procesy te regulują wielkość, stopień obtoczenia i kulistość otoczków. Ścieranie powoduje powolne zmniejszanie się średnic oraz wzrost stopnia obtoczenia i kulistości otoczków. Rozbijanie prowadzi do szybkiego zmniejszania się średnic oraz spadku stopnia obtoczenia i kulistości.

Ma ono miejsce w materiale niewysortowanym i podlegają mu drobne frakcje żwirowe, które są rozbijane przez większe otoczaki. Ziarna piasku ulegają rozgniataniu przez większe otoczaki. Produktem ścierania i rozgniatania jest materiał pelityczny.

W przypadku żwirów polimiktycznych niszczenie ziarn przebiega selektywnie prowadząc do eliminacji otoczek skał mniej odpornych. Dlatego zmienność wielkości, stopnia obtoczenia i kulistości powinna być badana w odniesieniu do otoczek jednego typu skały, dla uniknięcia wpływu selektywnego niszczenia na zmienność poszczególnych cech.

Selektywny transport różnicuje materiał pod względem wielkości i kształtu otoczek. Tak więc poszczególne cechy otoczek mają różne znaczenie przy analizie przebiegu transportu i sedymentacji żwirów. Stopień obtoczenia związany jest tylko ze ścieraniem w czasie transportu i „odzwierciedla on całą długość transportu niezależnie od warunków sedymentacji panujących w miejscu depozycji“ (Krumbein 1940). Natomiast wielkość, kształt, i związana z nim kulistość otoczek zależą zarówno od procesów niszczenia, jak i od selektywnego transportu. Dlatego, zdaniem Krumbeina, wielkość i kształt otoczek odzwierciedlają warunki sedymentacyjne panujące w miejscu depozycji.

Charakter zmienności składu petrograficznego żwiru o określonym składzie wyjściowym zależy od selektywnego niszczenia otoczek w czasie transportu. Selektywny transport różnicujący materiał o podobnej frakcji ze względu na ciężar właściwy jest możliwy, wydaje się jednak, że w przypadku żwirów Dunajca, złożonych ze skał o zbliżonych ciężarach właściwych, wpływ takiej selekcji można pominąć.

Wielkość transportowanych fragmentów skalnych

Zmniejszanie się wielkości średnic otoczek wskutek ścierania następującego w czasie transportu podlega prawu Sternberga, które wyraża się wzorem:

$$S = S_0 e^{-kx}$$

We wzorze tym S oznacza średnicę otoczaka, S_0 — średnicę początkową otoczaka, e — podstawę logarytmu naturalnego, x — długość drogi transportu, k — współczynnik stały dla danego rodzaju skały, zależny od szybkości transportu i średniej średnicy materiału towarzyszącego (Matakie-wicz 1936, Pettijohn 1949).

Na podstawie doświadczeń nad ścieraniem otoczek w młynach kulowych Krumbein (1941) stwierdził, że wielkość otoczek zmniejsza się podczas transportu z malejącą szybkością, lecz stale. W swej wcześniej-

szej pracy autor ten stwierdza (1940), że przy braku selektywnego transportu średnia wielkość materiału transportowanego i kształt krzywej rozkładu wielkości pozostaje bez zmiany nawet przy silnym ścieraniu. Średnia wielkość nie wykazuje w tym przypadku systematycznych zmian ze zwiększającą się długością drogi transportu. Zmiany średniej wielkości są zatem raczej wynikiem selektywnego transportu niż ścierania ziarn. Plumley (1948) stwierdza, że zmniejszanie się średniej średnicy materiału transportowanego spowodowane jest w 80% selektywnym transportem, a w 20% ścieraniem ziarn.

Stopień obtoczenia i kulistość otoczków

Stopień obtoczenia i kulistość otoczków mogą być wyrażone i mierzone różnymi sposobami. Wyczerpujący przegląd definicji i metod pomiaru stopnia obtoczenia i kulistości podany jest w podręczniku Krumbeina i Pettijohna (1938). W praktyce sedymentologicznej przyjęły się powszechnie definicje tych cech podane przez Wadella, przede wszystkim ze względu na łatwy sposób dokonywania pomiarów wielkości tych cech. Według definicji Wadella (1934, fide Krumbein & Pettijohn 1938), kulistość otoczka jest stosunkiem objętości otoczka do objętości kuli opisanej na otoczku. Po przekształceniu wzoru kulistość można wyrazić jako stosunek średnicy kuli o objętości równej objętości otoczka do średnicy kuli opisanej na otoczku — to jest do najdłuższej osi otoczka. Stopień obtoczenia określony jest jako średni stosunek promieni krzywizn mierzonych na krawędziach otoczka w dowolnym przekroju do promienia koła wpisanego w ten przekrój (Wadell 1932). Tak określone kulistość i stopień obtoczenia są liczbami niemianowanymi i pozornie niezależnymi od siebie. Najwyższa ich wartość wynosić może 1, najniższa 0.

Doświadczenia nad zmiennością kulistości i stopnia obtoczenia wywołaną ścieraniem w czasie transportu wykazały, że wielkości liczbowe tych cech nie rosną nieograniczenie, lecz zbliżają się w sposób asymptotyczny do pewnych wartości granicznych, niższych od absolutnej granicy wynikającej z definicji, to jest jedności. Wartości graniczne dla tych cech są wprost proporcjonalne do wielkości otoczków.

Poglądy na wpływ selektywnego transportu na zmienność kulistości ziarn są bardzo rozbieżne. W literaturze podręcznikowej rozpowszechnione jest zdanie, że transport przez wleczenie prowadzi do koncentracji ziarn o wysokiej kulistości, które są łatwiej toczone niż ziarna o kształcie odbiegającym od kulistego. Transport w zawieszynie prowadzić ma natomiast do koncentracji ziarn o niskiej kulistości, które mają stosunkowo mniejsze szybkości opadania. Pogląd ten został potwierdzony doświadczalnie przez Krumbeina (1942a, fide Pettijohn 1949). Znamienna jest przy

tym stwierdzona różnica w zachowaniu się w czasie transportu otoczków o tej samej kulistości a różnym kształcie.

Z drugiej strony częste są opisy faktów przeczących tym poglądom. Russel i Taylor (1937) stwierdzili w Mississippi spadek kulistości ziarn piasku w kierunku dolnego biegu i przypisywali to zjawisko rozbijaniu ziarn w czasie transportu. Udowodniono jednak (Plumley 1948), że interpretacja ta jest błędna, gdyż w górskich rzekach o dużej szybkości prądu kulistość i stopień obtoczenia ziarn piasku wzrastały z biegiem rzeki, chociaż wobec gwałtowności transportu intensywność rozbijania ziarn powinna być tu większa niż np. w dolnym biegu Mississippi.

Spadek kulistości w kierunku dolnego biegu rzeki we frakcjach żwirowych opisany został przez Petranka (1952). Wyniki Petranka nie mogą być jednak miarodajne, gdyż jak podkreśla Horniš (1953), pomiary zostały dokonane na próbach różniących się składem petrograficznym.

Orientacja otoczków

Otoczaki żwirów złożonych w łożysku rzeki posiadają bardzo charakterystyczną orientację. Poszczególne otoczaki opierają się o siebie, przy czym płaszczyzny ich największego przekroju pochylone są w kierunku przeciwnym do kierunku prądu. Takie ułożenie otoczków spowodowane jest rozkładem sił działających na nie w czasie transportu w łożysku rzeki. Zagadnienie to było szerzej omówione przez Beckera (1893). Dachówkowate ułożenie otoczków z płaszczyznami największego przekroju skierowanymi pod prąd stanowi charakterystyczną cechę żwirów. Otoczaki leżące pojedynczo na piasku ułożone są prawie zupełnie poziomo.

Zależność orientacji otoczków od ich kształtu i wielkości poznana jest jeszcze słabo, chociaż jej istnienie nie budzi wątpliwości. Cailleux (1945) stwierdza, że orientacja otoczków jest funkcją kształtu, oraz podaje, że otoczaki duże mają najsilniej uwydatniające się dachówkowate ułożenie. Krumbein (1940) stwierdził, że orientacja najdłuższych osi jest wyraźniejsza u otoczków o niskiej kulistości.

Interesujące dane o stosowaniu pomiarów orientacji otoczków dla celów rekonstrukcji paleogeograficznych podaje Sarkisjan i Klimowa (1955). Sarkisjan i Szapowałowa (1949) stwierdzili zależność orientacji otoczków od ich kształtu, a doświadczenia Kinda i Kucharenki (1948) wykazały, że orientacja otoczków zależy też od ich położenia w stosunku do brzegu. Otoczaki znajdujące się w środku doświadczalnego koryta miały dłuższe osie ustawione prostopadle do kierunku prądu, a przy obydwóch brzegach uprzywilejowany kierunek dłuższych osi odchylony był od kierunku prądu o około 45°.

METODYKA POBIERANIA PRÓB I POMIARÓW

Jednostka sedymentacyjna

Procesy zachodzące w środowisku sedymentacyjnym odzwierciedlane są przez cechy osadów. Ponieważ zbadanie całości żwirów Dunajca nie jest możliwe, jest rzeczą ogromnie ważną, by stosunkowo rzadko rozrzucone próby były porównywalne. Warunkiem porównywalności prób jest pobranie ich z jednej jednostki sedymentacyjnej, która została określona przez Otto (1938) jako warstwa osadu o pewnej miąższości złożona w zasadniczo stałych warunkach fizycznych. Zastrzeżenie to nie wyłącza istnienia określonej kierunkowej zmienności tych warunków.

Wszystkie próby użyte dla określenia zmienności cech żwirów Dunajca oraz ustalenia związku orientacji otoczków z ich kształtem i wielkością pobrane zostały z warstwy przemytego żwiru pokrywającego powierzchnię kamieńców. Warstwę tę uważać można za przynależną do jednej jednostki sedymentacyjnej. Miejsca pobrania prób starano się usytuować przy brzegu rzeki, jak najbliżej głównego nurtu. Średnia odległość między punktami pobrania prób wynosi około 15 km.

Wielkość otoczków

Zmienność wielkości transportowanych fragmentów skalnych w żwirach Dunajca została zbadana na przykładzie największych bloków i otoczków granitowych znajdujących na powierzchni kamieńców. W miejscu pomiaru przeszukiwano kilkaset metrów kwadratowych kamieńca i na obszarze tym mierzono najdłuższe osie największych bloków lub otoczków granitowych. Do skonstruowania wykresu zmienności maksymalnych średnic otoczków granitowych użyto tylko największych spośród pomierzonych w poszczególnych punktach wartości.

Skład petrograficzny żwiru

Analizę składu petrograficznego żwiru przeprowadzono dla klasy wielkości 64-128 mm, która dominuje ilościowo w żwirach Dunajca i posiada największe rozprzestrzenienie w dolinie rzeki, gdyż można było ją prześledzić w kamieńcach na długości około 230 km. W najwyższym biegu Czarnego Dunajca przeprowadzono analizę dla klasy wielkości 128-256 mm. W dolnym biegu rzeki analizowano również frakcje 32-64 mm i 16-32 mm. Wszystkie próby składały się ze 100 otoczków. Według Krumbeina (1942b) błąd prawdopodobny przy zbiorach tej wielkości wynosi 10,2%. Próby do analizy składu petrograficznego żwiru pobierano w ten sposób, że zbierano wszystkie otoczki mieszczące się w danej klasie wielkości z pewnej powierzchni kamieńca. Następnie liczono ilości otoczków różnych skał.

Kulistość i stopień obtoczenia

Kulistość otoczków mierzona była metodą Wadella (1934). Jak wspomniano wyżej, kulistość zdefiniowana jest jako stosunek objętości otoczaka do objętości opisanej na nim kuli. Objętość otoczaka mierzono zanurzając go w wypełnionym wodą naczyniu zaopatrzonym w umieszczony z boku otwór przelewowy i mierząc objętość uzyskanego nadmiaru wody przy pomocy menzurki. Największą średnicę otoczaka mierzono z dokładnością do 1 mm za pomocą linijki. Wartość liczbową kulistości odczytywano następnie z nomogramu.

Stopień obtoczenia oznaczany był wizualnie na podstawie pięciostopniowego schematu porównawczego połączonego z opisową klasyfikacją Pettijohna (1949).

Stopień obtoczenia i kulistość mierzone były na próbach złożonych z 50 otoczków. Wyniki pomiarów analizowano statystycznie metodą momentów. Dla każdej próby obliczano średnią arytmetyczną, średnią odchyłkę oraz moment trzeciego stopnia, będący współczynnikiem skośności (asymetrii, *skewness* w terminologii anglosaskiej) krzywej rozkładu wielkości mierzonej cechy w próbie.

Średnia arytmetyczna reprezentuje średnią wartość mierzonej cechy w próbie. Średnia odchyłka jest miarą wysortowania żwiru ze względu na daną cechę. Współczynnik skośności informuje o charakterze asymetrii krzywej rozkładu wielkości mierzonej cechy w próbie. Dodatni współczynnik wskazuje, że w próbie przeważają ilościowo otoczaki o wartości mierzonej cechy wyższej od średniej, ujemny — oznacza przewagę materiału o wartościach mierzonej cechy niższych od średniej. Szczegółowe omówienie metody momentów i wzory obliczeniowe znaleźć można w podręcznikach statystyki.

Orientacja otoczków

Orientacja otoczaka wyrażona jest przez wielkość i kierunek nachylenia najdłuższej osi oraz położenie płaszczyzny największego przekroju (Krumbein 1939). Płaszczyzna największego przekroju wyznaczona jest przez najdłuższą i średnią oś otoczaka. Pomiar orientacji sprowadza się więc do pomiaru azymutów i kątów nachyleń dłuższych osi otoczaka.

Bezpośredni pomiar azymutów i kątów nachylenia osi otoczaka tkwiącego w żwirowisku nie jest możliwy. Dla przeprowadzenia takich pomiarów opracowano różne metody oznaczania otoczaka w taki sposób, by położenie jego mogło być odtworzone po wyjęciu z osadu. Najpraktyczniejsza z tych metod została opisana przez Karlstroma (1952).

Postępując według tej metody, oznacza się otoczaki za pomocą płytki zaopatrzonej w dwie szczeliny tworzące krzyż o ramionach wzajemnie prostopadłych. Na płytce umieszczona jest libella górująca przy poziomym położeniu dwóch ramion krzyża. Trzymając płytkę ze spoziomowanym krzyżem równolegle do pionowej ściany odsłonięcia o pomierzonym poprzecznie kierunku, rysuje się na otoczaku krzyż prowadząc ołówkę w wyciętych w płytce szczelinach. Ponieważ, ogólnie biorąc, otoczek ograniczony jest powierzchniami krzywymi, narysowany na nim krzyż ulega deformacji i ma ramiona proste tylko wtedy, gdy posiada takie położenie w stosunku do obserwatora, jakie posiadał w stosunku do płytki w czasie rysowania krzyża. Ponieważ kierunek ściany odsłonięcia, równolegle do której ustawiana była płytka, jest znany, można odtworzyć położenie płytki i położenie otoczaka wyjętego z odsłonięcia. Pomiar azymutów i kątów nachylenia osi wykonać można za pomocą specjalnego goniometru lub w warunkach polowych — kompasem geologicznym.

Aparatura Karlstroma dostosowana jest do pomiaru orientacji otoczków tkwiących w pionowych odsłonięciach. Do pomiaru orientacji otoczków na poziomych powierzchniach kamieńców konieczna więc była pewna modyfikacja aparatury. Płytkę z wyciętym krzyżem służącą do orientowania otoczków została zaopatrzona w listwę umieszczoną równolegle do dwóch ramion krzyża. Przystępując do rysowania krzyża na otoczaku na płytce umieszczano kompas geologiczny przysuwając go dłuższym bokiem do listwy. Płytkę z kompasem obracano następnie tak, by igła kompasu wskazywała kierunek północny i przy górującej libelli kompasu rysowano krzyż na otoczaku. Dla zorientowania tak narysowanego krzyża względem stron świata oznaczano kropką pn.-wschodnią ćwiartkę krzyża (pl. XLII, fig. 1).

Po wyjęciu otoczaka ze żwirowiska umieszczano go na kawałku plasteliny i trzymając nad nim płytkę zorientowaną identycznie jak przy rysowaniu krzyża ustawiano otoczek w ten sposób, by narysowany na nim krzyż ukazał się w szczelinach wyciętych w płytce. Następnie mierzono przy pomocy kompasu azymut, kierunek i wielkość upadu najdłuższej osi oraz kierunek i wielkość upadu osi średniej (pl. XLII, fig. 2). Azymutu średniej osi nie mierzono, gdyż różni się on o 90° od azymutu osi najdłuższej.

WYNIKI I ICH INTERPRETACJA

Zmienność wielkości transportowanych fragmentów skalnych

Zmienność maksymalnych obserwowanych średnic fragmentów skalnych transportowanych w łóżysku Dunajca została prześledzona na przykładzie bloków i otoczków granitowych (fig. 3). W najwyższym biegu

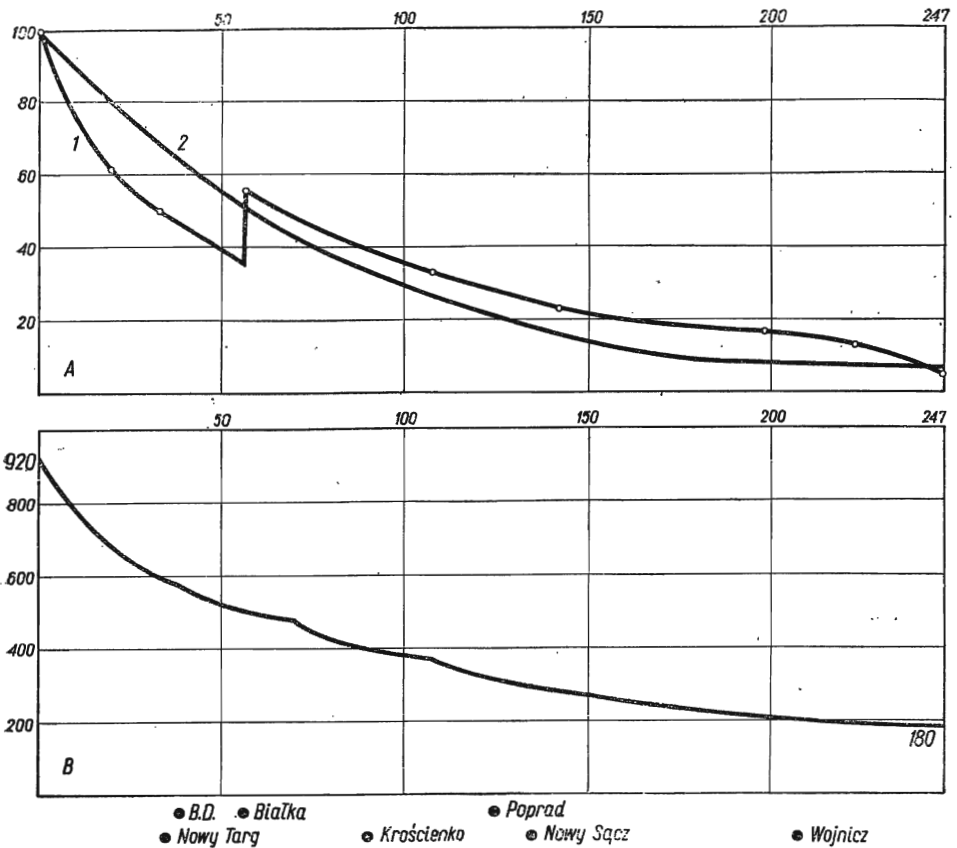


Fig. 3

A zmienność maksymalnych średnic głazów granitowych obserwowanych w dolinie Dunajca. 1 zmienność obserwowana, 2 zmienność obliczona według prawa Sternberga. Na osi rzędnych — średnica głazów w *cm*, na osi odciętych — długość drogi transportu w *km*. B gradient Dunajca. Na osi rzędnych — wysokość bezwzględna w *m*, na osi odciętych — długość doliny w *km*. Pod rysunkiem: miejsca połączenia się z Dunajcem dopływów niosących materiał tatrzański (B. D. Biały Dunajec) oraz położenie ważniejszych miejscowości

A Maximal diameter variation in granite boulders observed within the Dunajec Valley, 1 as measured, 2 as calculated according to Sternberg's law; diameter of boulders in *cm* (ordinate) — length of transport in *km* (abscissa).

B Dunajec river gradient. Absolute altitude in *m* indicated by ordinate; length of valley in *km* by abscissa. Below the drawing: mouths of Dunajec tributaries carrying Tatra material (B. D. Biały Dunajec River) and position of some more important localities

Czarnego Dunajca, około 2 km poniżej wylotów dolin tatrzańskich, spotyka się bloki granitowe o metrowych średnicach. Po 35 kilometrach transportu, koło Nowego Targu, największe bloki spotykane w kamieńcach mają już tylko 0,5 m średnicy. Koło Nowego Sącza (135 km) największe obserwowane średnice wynoszą 25 cm, koło Wojnicza (208 km) 20 cm, przy ujściu Dunajca do Wisły (247 km) 5 cm. Nagły skok krzywej na 55 kilometrze doliny spowodowany jest donoszeniem grubszego materiału przez Białkę.

Wykres maksymalnych obserwowanych średnic bloków i otoczków granitowych porównany został z wykresem zmniejszania się średnic według prawa Sternberga. Jako średnicę początkową przyjęto największą średnicę bloków granitu obserwowaną u początku Czarnego Dunajca, to jest 1 metr, a za współczynnik k — wartość 0.000004, będącą średnią wartości podanych przez Matakiewicza (1936).

Jak wynika z wykresów, maksymalne średnice obserwowane i obliczone ujawniają dobrą zgodność w środkowym biegu Dunajca, natomiast w górnym i najniższym biegu rzeki średnice obserwowane są niższe od obliczonych. Krzywa obliczona według prawa Sternberga przedstawia zmniejszanie się średnic spowodowane działaniem abrazji. Przyspieszenie zmniejszania się obserwowanych średnic spowodowane jest sumowaniem się z działaniem abrazji dodatkowego czynnika, to jest selektywnego transportu związanego ze zmianami gradientu Dunajca. W górnym biegu istnieje duża różnica spadku pomiędzy potokami tatrzańskimi a doliną Czarnego Dunajca. W obrębie Kotliny Nowotarskiej ma więc miejsce bardzo intensywna akumulacja żwirów. W najniższym biegu Dunajca duże nasilenie selektywnego transportu i akumulacji związane jest z różnicą spadku doliny w obrębie Karpat i niziny Podkarpackiej.

Otoczaki, których średnice mierzono dla skonstruowania wykresu, nie wykazują śladów rozbijania. Jest to zgodne z przytoczonym wyżej (str. 221) opisem procesów działających w czasie transportu.

Zmienność składu petrograficznego żwiru

Skład petrograficzny żwirów pochodzenia tatrzańskiego w dolinie Dunajca zmienia się silnie z długością transportu (fig. 4). We frakcji 64-128 mm u wylotu Doliny Kościeliskiej w Tatrach Zachodnich dominują otoczaki skał węglanowych — wapieni i dolomitów — występujące w ilości 47%. Na drugim miejscu znajdują się granity występujące w ilości 20%, dalej kwarcyty 17%, łupki mikowe 6%, gnejsy 5% i amfibolity 5%. Inne skały tatrzańskie — margle, piaskowce i łupki — występują w ilościach kilkunastu pro mille.

W miarę oddalania się od Tatr skład petrograficzny żwiru staje się coraz bardziej monotony. Najszybciej, po 3 kilometrach, znikają z osadu łupki mikowe, po 35 kilometrach — amfibolity, po 50 kilometrach — wapienie, po 90 kilometrach — gnejsy. Proces eliminacji ze żwiru otoczków skał mało odpornych dokonuje się w zasadzie na przestrzeni pierwszych 35 kilometrów transportu. Koło Nowego Targu z materiału tatrzańskiego pozostają niemal wyłącznie otoczaki kwarcytów i granitów. Biały Dunajec i Białka donoszą do doliny Dunajca materiał tatrzański składający się również wyłącznie z granitów i kwarcytów. Otoczaki tych dwóch skał występują na całej długości doliny Dunajca a ich wzajemny stosunek ulega poważnym zmianom.

U wylotu Doliny Kościeliskiej granity przeważają nieznacznie nad kwarcytami. Na pierwszych 10 kilometrach następuje gwałtowny wzrost ilości granitów przy jednoczesnej eliminacji otoczków skał mało odpor-

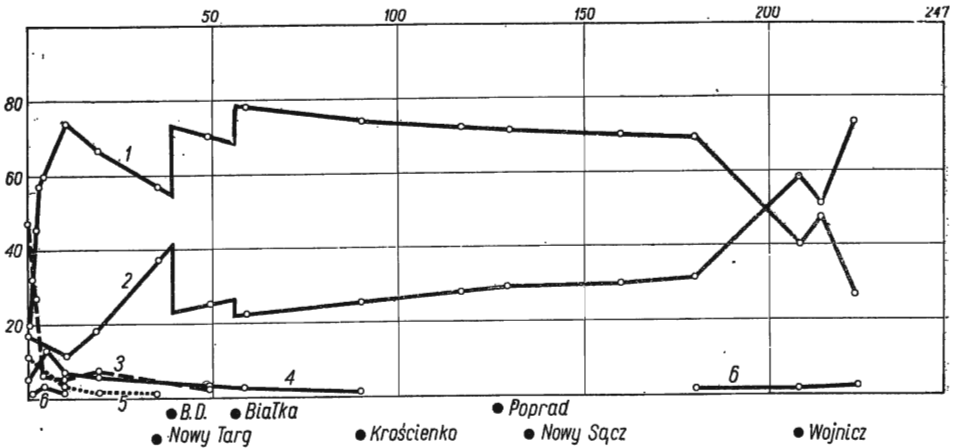


Fig. 4

Zmienność składu petrograficznego żwirów Dunajca w klasie wielkości 64-128 mm (tylko otoczaki skał tatrzańskich). Na osi odciętych — długość drogi transportu w *km*, na osi rzędnych — zawartość otoczków w żwirze w *%*. 1 otoczaki granitu, 2 otoczaki kwarcytu, 3 otoczaki skał węglanowych (wapieni i dolomitów), 4 otoczaki gnejsu, 5 otoczaki amfibolitu i łupków mikowych, 6 otoczaki kwarcu żyłowego. Pod rysunkiem: miejsca połączenia się z Dunajcem dopływów niosących materiał tatrzański (B. D. Biały Dunajec) oraz położenie ważniejszych miejscowości

Variation of petrographic composition within the 64-128 mm grade of Dunajec gravels (pebbles of Tatra rocks only). Length of transport in *km* shown by abscissa; per cent pebble content in gravels by ordinate. 1 granite pebbles, 2 quartzite pebbles, 3 carbonate rock pebbles (of limestones and dolomites), 4 gneiss pebbles, 5 amphibolite and mica schists pebbles, 6 vein quartz pebbles. Below the drawing: mouths of Dunajec tributaries carrying Tatra material (B. D. Biały Dunajec River) and position of some more important localities

nych. Na odcinku pomiędzy Chochołowem a Nowym Targiem zwiększa się znacznie ilość otoczków kwarcytowych przy jednoczesnym spadku ilości granitów. Przy ujściach Białego Dunajca i Białki na odcinku doliny pomiędzy Nowym Targiem a Czorsztynem stosunki ilościowe pomiędzy granitami a kwarcytami zmieniają się skokowo wskutek donoszenia przez te rzeki materiału bogatego w granity. W środkowym biegu rzeki, pomiędzy Czorsztynem a Czchovem, zmniejszanie się ilości granitów i wzrost liczby otoczków kwarcytowych następuje bardzo powoli, natomiast w dolnym biegu Dunajca, poniżej Czchowa, ma miejsce bardzo szybka eliminacja otoczków granitowych ze żwiru.

Wzbogacanie się żwirów Dunajca w otoczki kwarcytowe spowodowane jest kilkoma procesami, których nasilenie jest różne na różnych odcinkach rzeki. Otoczki kwarcytowe mają większą odporność na niszczenie mechaniczne niż otoczki granitowe, ta różnica odporności jest jednak zbyt mała, by mogła wytłumaczyć tak odmienne zachowanie się otoczków granitowych i kwarcytowych, jakie obserwuje się w żwirach Dunajca.

Główną przyczyną szybkiego wzbogacania się żwirów w otoczki kwarcytowe w górnym biegu rzeki jest donoszenie przez dopływy Dunajca otoczków kwarcytowych ze starszych tarasów, które — jak wykazał Halicki (1930, 1947) — są silnie zubożałe w granity. Plejstocénskie tarasy Dunajca są szczególnie dobrze rozwinięte na obszarze Kotliny Nowotarskiej. W środkowym biegu Dunajca, gdzie dolina jego jest przeważnie wąska, tarasy mają znacznie mniejsze rozprzestrzenienie, dlatego donoszenie starych otoczków kwarcytowych do łóżyska rzeki zachodzi tu na znacznie mniejszą skalę. Na zjawisko wzbogacania się żwirów Dunajca w otoczki kwarcytowe pochodzące ze starszych tarasów zwrócił uwagę w odniesieniu do żwirów plejstocénских Klimaszewski (1937).

W dolnym biegu Dunajca przyczyną szybkiego eliminowania ze żwiru otoczków granitowych jest wietrzenie, które powoduje znaczne obniżenie ich wytrzymałości mechanicznej. Otoczki granitowe na tym odcinku doliny ujawniają, po rozbiciu ich młotkiem, istnienie kory wietrzeniowej sięgającej na głębokość około 2 cm. Grubość kory wietrzeniowej można łatwo rozpoznać, gdyż skała zwietrzała jest zabarwiona na kolor brunatny przez wodorotlenki żelaza pochodzące z rozkładu biotyту. Gwałtowne zmniejszanie się ilości otoczków granitowych ma miejsce na tym odcinku rzeki we wszystkich klasach wielkości, lecz prędkość tego procesu jest różna dla różnych klas wielkości.

Na podstawie wykresu składu petrograficznego żwiru dla różnych klas wielkości (fig. 5) proces ten można odtworzyć następująco: otoczki frakcji 64-128 mm rozpadają się najpierw na fragmenty o średnicach mieszczących się w klasie wielkości 16-32 mm, gdyż dla tej frakcji krzy-

wa procentowej zawartości otoczków granitowych w żwirze podnosi się. Z kolei fragmenty te ulegają szybkiemu rozpadowi na okruchy drobniejsze, przechodząc do frakcji piaszczystej.

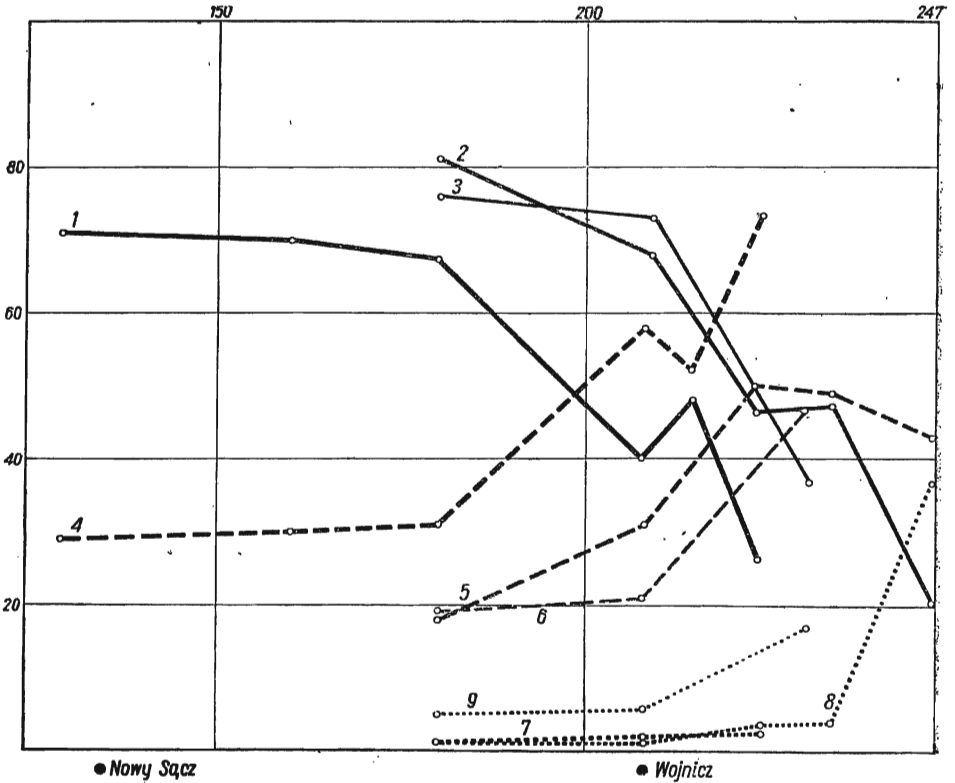


Fig. 5

Zmienność składu petrograficznego żwiru (tylko otoczek skał tatrzańskich) w dolnym biegu Dunajca. Linia ciągła: otoczek granitu, 1 o średnicach 64-128 mm, 2 o średnicach 32-64 mm, 3 o średnicach 16-32 mm. Linia przerywana: otoczek kwarcytu, 4 o średnicach 64-128 mm, 5 o średnicach 32-64 mm, 6 o średnicach 16-32 mm. Linia kropkowana: otoczek kwarcu, 7 o średnicach 64-128 mm, 8 o średnicach 32-64 mm, 9 o średnicach 16-32 mm. Na osi rzędnych — zawartość otoczków w żwirze w %, na osi odciętych — długość drogi transportu w km. Pod rysunkiem: położenie ważniejszych miejscowości

Variation of petrographic composition of gravel along the lower course of the Dunajec (Tatra rock pebbles only). Continuous line: granite pebbles, 1 64-128 mm grade, 2 32-64 mm grade, 3 16-32 mm grade. Broken line: quartzite pebbles, 4 64-128 mm grade, 5 32-64 mm grade, 6 16-32 mm grade. Dotted line: quartz pebbles, 7 64-128 mm grade, 8 32-64 mm grade, 9 16-32 mm grade. Per cent pebble content in gravel shown by ordinate, length of transport in km by abscissa.

Position of some more important localities shown below the drawing

Charakterystyczne jest występowanie w klasie wielkości 64-128 mm otoczków żyłowego kwarcu: pojawiają się one w niewielkiej ilości poniżej połączenia potoków Kościeliskiego (Kirowa Woda) i Chochołowskiego (Siwa Woda), przynoszone przez ten ostatni, a następnie nijkną w masie innego materiału. Jako najtwardsze ze wszystkich skał tatrzańskich, ulegają mechanicznemu wzbogacaniu w czasie transportu i po 180 kilometrach znów pojawiają się w żwirze w ilości ponad 10%, przy czym ilość ich stale wzrasta.

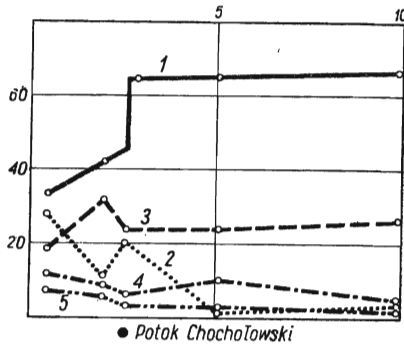


Fig. 6

Zmienność składu petrograficznego żwiru w najwyższym biegu Czarnego Dunajca. Klasa wielkości 128-256 mm. 1 otoczaki granitu, 2 otoczaki skał węglanowych (wapieni i dolomitów), 3 otoczaki kwarcytu, 4 otoczaki gnejsu, 5 otoczaki amfibolitu i łupków mikowych. Na osi rzędnych — zawartość otoczków w żwirze w %, na osi odciętych — długość drogi transportu w km

Variation of petrographic composition of the 128-256 mm grade of gravel in the uppermost course of the Czarny Dunajec River. 1 granite pebbles, 2 carbonate rock pebbles (of limestones and dolomites), 3 quartzite pebbles, 4 gneiss pebbles, 5 amphibolite and mica schists pebbles. Per cent pebble content in gravel indicated by ordinate; length of transport in km by abscissa

W klasie wielkości 128-256 mm analizę składu petrograficznego przeprowadzono tylko dla najwyższych 10 kilometrów biegu Czarnego Dunajca. Niżej ilość otoczków skał tatrzańskich jest w tej klasie wielkości zbyt mała, by można było z dostateczną dokładnością stwierdzić stosunki ilościowe pomiędzy różnymi rodzajami skał (fig. 6). U wylotu Doliny Kościeliskiej skład petrograficzny żwiru jest w tej klasie wielkości nieco inny niż we frakcji 64-128 mm. Najliczniejsze są otoczaki granitowe — 32%, drugie miejsce zajmują wapienie — 31%, dalej kwarcyty 17%, gnejsy 12%, amfibolity 5%, łupki mikowe 3%. W czasie transportu wzrasta ilość otoczków granitowych i kwarcytowych. Pozostałe typy skał są eliminowane, przy czym kolejność szybkości eliminacji jest taka sama, jak w klasie wielkości 64-128 mm.

Dolomity stanowią około 10% otoczków skał węglanowych (fig. 7). Ilość ich wzrasta poniżej połączenia się potoków Kościeliskiego i Chochołowskiego, co jest związane z występowaniem w dolnej części Doliny Chochołowskiej dużego kompleksu dolomitów środkowego triasu płaszczowiny reglowej choczańskiej. Wzrost ilości dolomitów zaznacza się tylko na bardzo krótkim odcinku rzeki. Niewielka ilość otoczków dolomitowych w żwirach Czarnego Dunajca nie jest proporcjonalna do udziału dolomi-

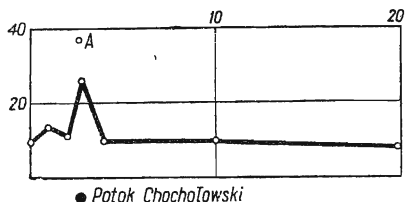


Fig. 7

Zawartość dolomitów w otoczkach skał węglanowych w najwyższym biegu Czarnego Dunajca. Klasa wielkości 16-256 mm. Na osi rzędnych — zawartość dolomitów w otoczkach skał węglanowych w %, na osi odciętych — długość drogi transportu w km. A zawartość dolomitów w otoczkach skał węglanowych w Potoku Chochołowskim

Dolomite content in the 16-256 mm grade of carbonate rock pebbles, along the uppermost course of the Czarny Dunajec River. Per cent dolomite content in carbonate rock pebbles shown by ordinate, length of transport in km by abscissa.

A dolomite content in carbonate rock pebbles from the Chochołowski Stream

tów w budowie osadowych serii tatrzańskich. Spowodowane to jest bardzo silnym zbrekcjowaniem dolomitów, które dostawszy się do łóżyska rzeki rozbijane są na drobny żwirek i szybko rozgniatane.

W górnym biegu Czarnego Dunajca obserwować można wietrzenie chemiczne otoczków skał węglanowych. Na powierzchniach większych bloków wystających nieco ponad poziom wody (przy niskim jej stanie) widoczne są żłobki typowe dla korozji chemicznej. Tworzenie się żłobków zachodzi prawdopodobnie przy wyższych stanach wody, gdy powierzchnie bloków są zalane. Proces ten przebiega zapewne dość szybko, gdyż w czasie dużych przyborów wody, które wprawiają w ruch żwirowisko, powierzchnie bloków są na nowo wygładzane. Proces eliminowania z osadu skał mało odpornych zachodzi przy udziale zarówno niszczenia mechanicznego, jak i chemicznego. W żwirach Dunajca uszeregowanie otoczków według wzrastającej odporności jest takie same dla obu tych procesów, skutki ich sumują się zatem.

Zmienność kulistości i stopnia obtoczenia

Zmienność kulistości otoczków granitowych we współczesnych zwi-
rach Dunajca przedstawiona jest na fig. 8. Średnia kulistość wzrasta
w górnym i środkowym biegu rzeki, natomiast w dolnym biegu wartość

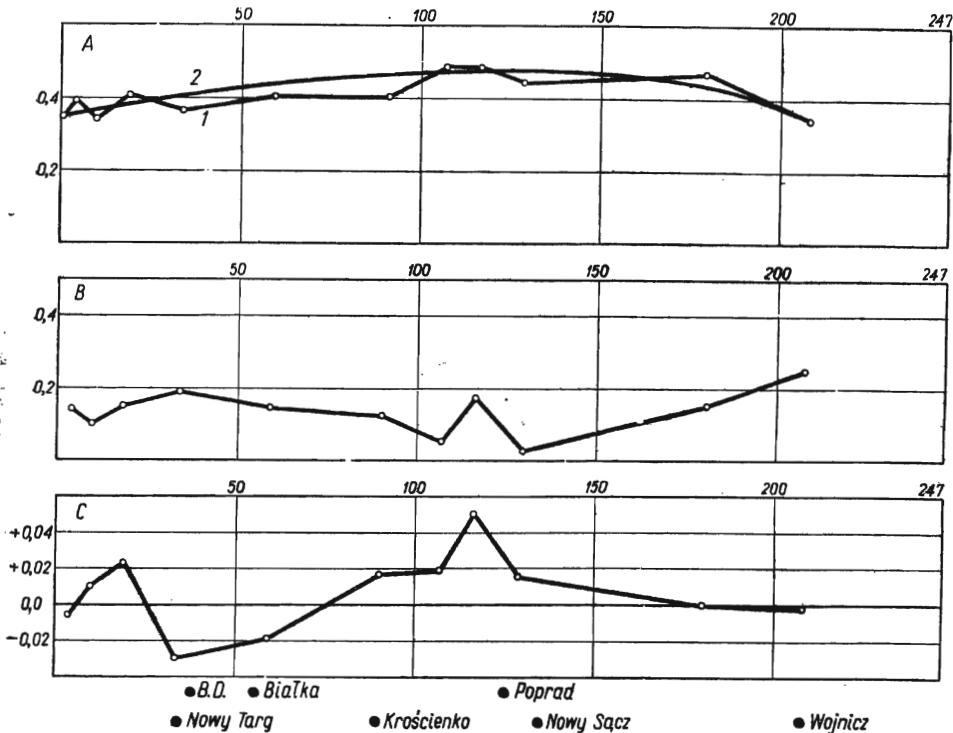


Fig. 8

Zmienność kulistości otoczków granitu w klasie i wielkości 64-128 mm. A średnia kulistość. 1 zmienność pomierzona, 2 wyinterpolowana krzywa zmienności. Na osi rzędnych — średnia kulistość, na osi odciętych — długość drogi transportu w km. B średnia odchyłka kulistości. Na osi rzędnych — wartości średniej odchyłki, na osi odciętych — długość transportu w km. C współczynnik skośności kulistości. Na osi rzędnych — wartości współczynnika skośności, na osi odciętych — długość drogi transportu w km. Pod rysunkiem: miejsca połączenia się z Dunajcem dopływów niosących materiał tatrzański (B. D. Biały Dunajec) oraz położenie ważniejszych miejscowości

Sphericity variation in the 64-128 mm grade of granite pebbles. A mean sphericity. 1 plotted variation curve, 2 interpolated variation curve; mean sphericity shown by ordinate, length of transport in km by abscissa. B mean sphericity deviation. Value of mean sphericity deviation shown by ordinate, length of transport in km by abscissa. C sphericity skewness coefficient. Skewness coefficient values shown by ordinate, length of transport in km by abscissa. Below the drawing: mouths of Dunajec tributaries carrying Tatra material (B. D. Biały Dunajec River) and the position of some more important localities

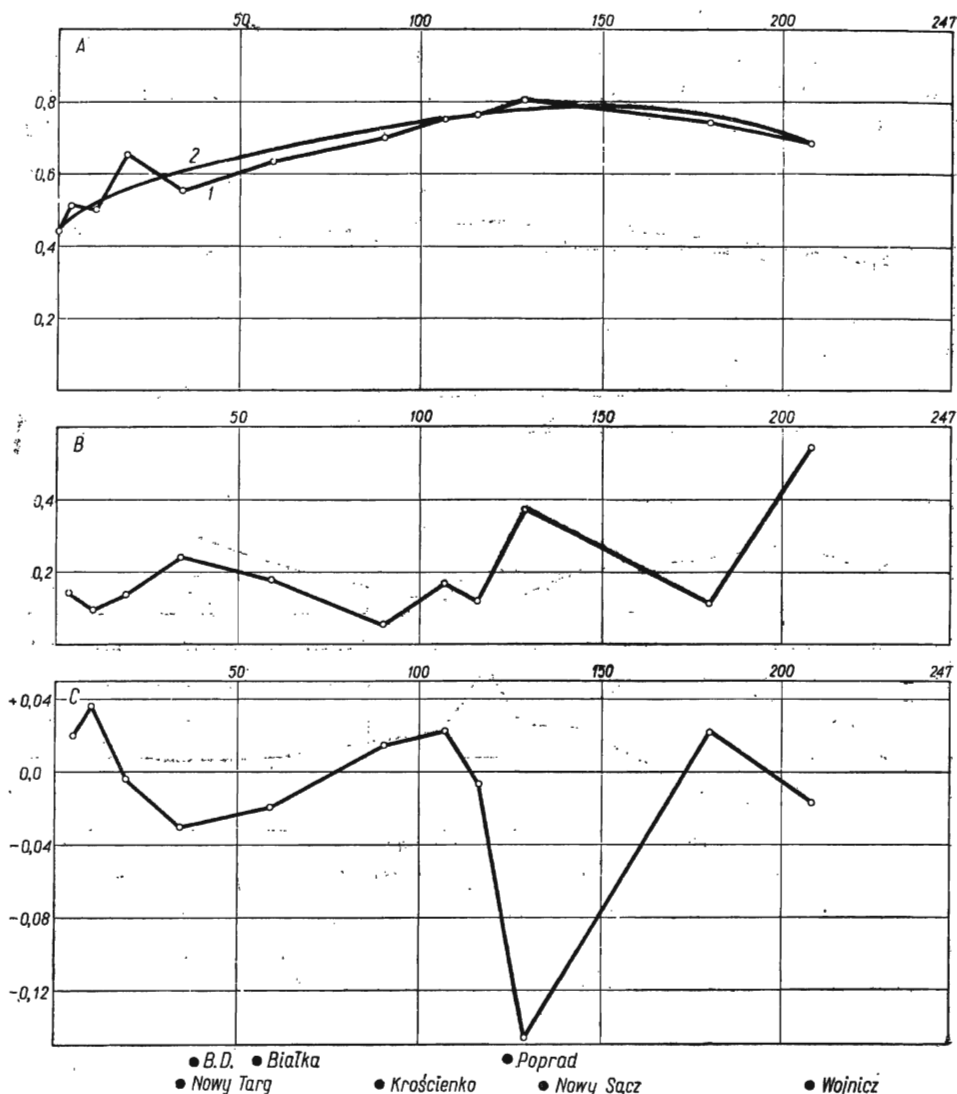


Fig. 9

Zmienność stopnia obtoczenia otoczków granitu w klasie wielkości 64-128 mm. A średni stopień obtoczenia. 1 zmienność pomierzona, 2 wyinterpolowana krzywa zmienności. Na osi rzędnych — wartości stopnia obtoczenia, na osi odciętych — długość drogi transportu w km. B średnia odchyłka stopnia obtoczenia. Na osi rzędnych — wartości średniej odchyłki, na osi odciętych — długość drogi transportu w km. C współczynnik skośności stopnia obtoczenia. Na osi rzędnych — wartości współczynnika skośności, na osi odciętych — długość drogi transportu w km. Pod rysunkiem: miejsce połączenia się z Dunajcem dopływów niosących materiał tatrzański (B. D. Biały Dunajec) oraz położenie ważniejszych miejscowości

jej zmniejsza się znacznie. U wylotu Doliny Kościeliskiej wartość średniej kulistości wynosi 0,34. Wartość najwyższa — 0,48 osiągnięta jest po 107 kilometrach transportu (Łącko). Na 208 kilometrze doliny Dunajca (Wojnicz) wartość średniej kulistości wynosi już tylko 0,34. Średnia odchyłka i współczynnik skośności kulistości nie wykazują systematycznych zmian w czasie transportu.

Fig. 9 przedstawia zmienność stopnia obtoczenia, która przebiega podobnie jak zmienność kulistości. Średni stopień obtoczenia rośnie w górnym i środkowym biegu rzeki, zmniejsza się natomiast w dolnym biegu. U wylotu Doliny Kościeliskiej średni stopień obtoczenia wynosi 0.44. Po 130 kilometrach transportu średni stopień obtoczenia osiąga wartość najwyższą — 0.80, po czym spada do wartości 0.68 na 208 kilometrze doliny. Średnie odchylenie i współczynnik skośności stopnia obtoczenia nie wykazują systematycznych zmian w czasie transportu.

Wartości stopnia obtoczenia i kulistości pomierzone u wylotu Doliny Kościeliskiej nie mogą być uważane za wartości początkowe charakteryzujące świeży rumosz granitowy, gdyż są one wynikiem transportu otoczków granitu w dolinach tatrzańskich na przestrzeni około 8 kilometrów. Dlatego w najwyższym biegu Czarnego Dunajca nie obserwuje się gwałtownego wzrostu stopnia obtoczenia i kulistości. Szczególnie interesujący jest natomiast spadek średniej kulistości i średniego stopnia obtoczenia w dolnym biegu rzeki.

Spadek ten nie może być wynikiem rozbijania otoczków, gdyż w górnym biegu rzeki przy znacznie gwałtowniejszym transporcie kulistość i stopień obtoczenia gwałtownie wzrastają. Podkreślić należy, że przy pomiarach kulistości i stopnia obtoczenia nie brano pod uwagę otoczków zwierzających.

Fig. 10 przedstawia osiowe współczynniki kształtu otoczków granitowych w różnych klasach wielkości. Diagramy osiowych współczynników kształtu, wprowadzone do praktyki sedymentologicznej przez Zinniga (1935), pozwalają na odwzorowanie kształtu otoczaka w postaci jednego punktu, którego rzędna jest miarą stosunku osi średniej do najdłuższej, a odcięta — miarą stosunku osi najkrótszej do średniej. Jak wynika z fig. 10, kulistość otoczków jest odwrotnie proporcjonalna do ich wiel-

Roundness variation within the 64–128 mm grade of granite pebbles. A mean roundness. 1 plotted variation curve, 2 interpolated variation curve. Roundness values shown by ordinate, length of transport in km by abscissa. B mean roundness deviation. Mean deviation values shown by ordinate, length of transport in km by abscissa. C skewness coefficient of roundness. Skewness coefficient values shown by ordinate, length of transport in km by abscissa. Below the drawing: mouths of Dunajec tributaries carrying Tatra material (B. D. Biały Dunajec River) and the position of some more important localities

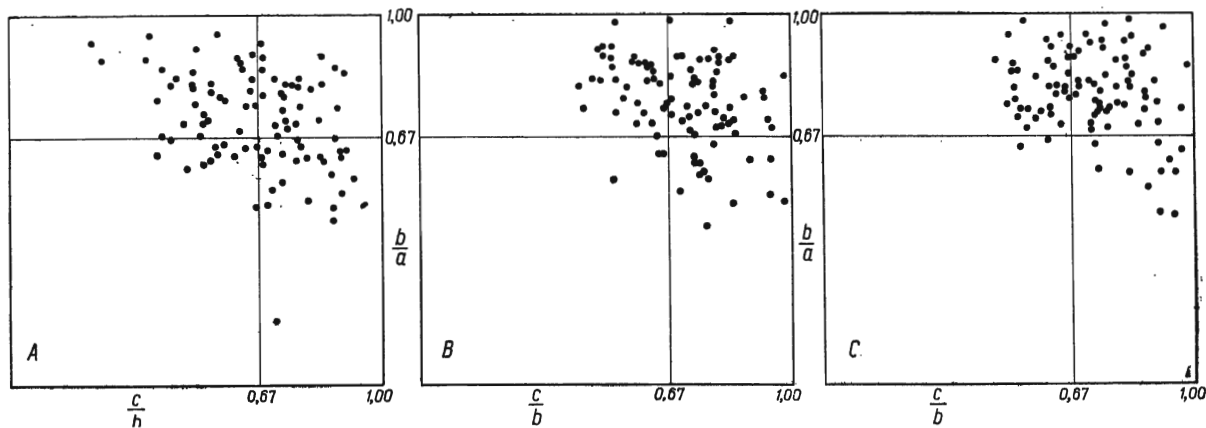


Fig. 10

Osiowe współczynniki kształtu otoczków granitu w trzech klasach wielkości. Pomiar wykonany w Czorsztynie, na 59 kilometrze doliny Dunajca. A klasa wielkości 64-128 mm, B klasa wielkości 32-64 mm, C klasa wielkości 16-32 mm; a oś najdłuższa, b oś średnia, c oś najkrótsza

Axial shape coefficients in the three grades of granite pebbles. Measurements taken at Czorsztyn at the 59th km of the Dunajec Valley, A 64-128 mm grade, B 32-64 mm grade, C 16-32 mm grade; a longest axis, b intermediate axis, c shortest axis

kości. Nie można więc wiązać spadku kulistości w dolnym biegu Dunajca z zanikaniem frakcji 64-128 mm i występowaniem w żwirze otoczków o rozmiarach zbliżonych do dolnej granicy frakcji to jest 64 mm, w przeciwieństwie do środkowego i górnego biegu, gdzie rozkład wielkości otoczków jest w granicach frakcji równomierny lub skupiony przy górnej granicy frakcji to jest 128 mm. Stosunki we frakcjach żwirowych są więc odmienne niż we frakcjach piaszczystych, z których wielokrotnie opisano wprost proporcjonalną zależność kulistości ziarn od ich wielkości.

Brak systematycznej zmienności średniej odchyłki kulistości dowodzi, że w czasie transportu nie następuje sortowanie otoczków pod względem kulistości. Jako wytłumaczenie zmniejszania się kulistości w dolnym biegu rzeki pozostaje więc transport selektywny pod względem kształtu otoczków.

Jak wspomniano wyżej (str. 223), podręczniki sedymentologiczne (na przykład Pettijohn 1949) reprezentują pogląd, że koncentracja ziarn o niskiej kulistości następuje przy transporcie w zawieszynie. Oczywiście transport w zawieszynie otoczków o kilkucentymetrowej średnicy nie jest możliwy. Można natomiast uzasadnić logicznie selekcję ziarn prowadzącą do koncentrowania się w osadzie otoczków o niskiej kulistości w czasie transportu przez wleczenie.

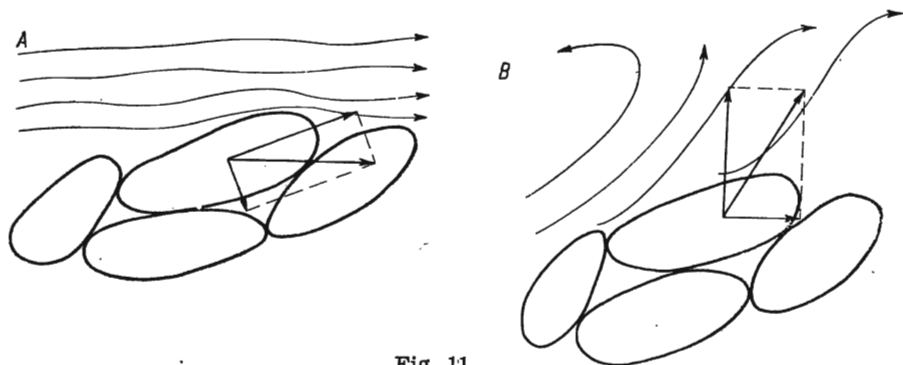


Fig. 11

Rozkład sił działających na otoczek. A przy małej turbulencji, B przy dużej turbulencji

Pattern of forces acting on a pebble. A at weak turbulence, B at strong turbulence

W danej klasie wielkości otoczki o małej kulistości mają mniejszą objętość a co za tym idzie i wagę, niż otoczki o kształcie zbliżonym do kuli. Wynika stąd, że otoczki o małej kulistości powinny być łatwiej transportowane przez prąd. W ten sposób kształt wpływa niejako pośrednio na łatwość transportowania otoczków przez wodę. Istnieje jednak również wpływ bezpośredni.

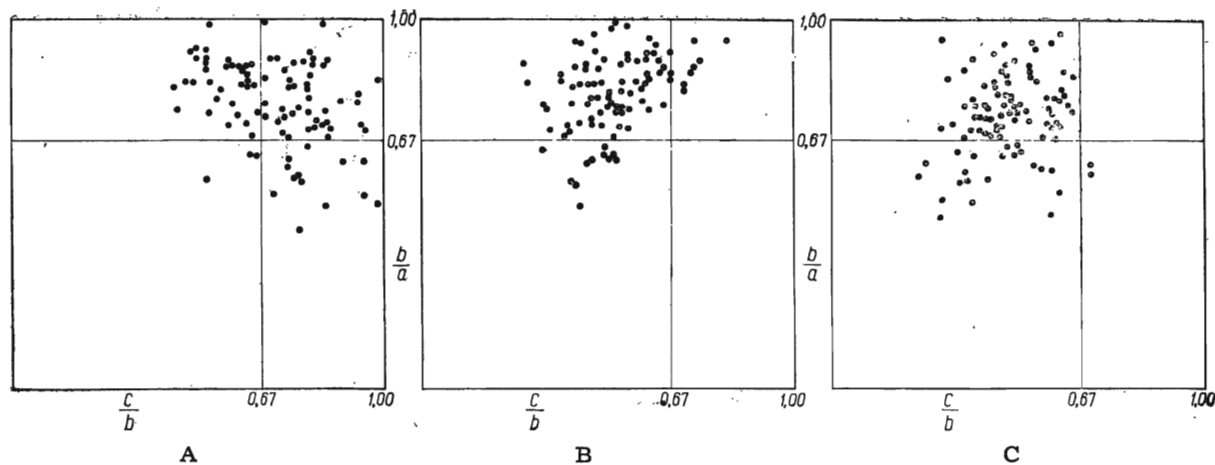


Fig. 12

Osiowe współczynniki kształtu otoczków granitu w klasie wielkości 64-128 mm. A po 59 km transportu, B po 112 km transportu, C po 214 km transportu; a oś najdłuższa, b oś średnia, c oś najkrótsza

Axial shape coefficients in the 64-128 mm grade of granite pebbles. A after 59 km of transport, B after 112 km of transport, C after 214 km of transport; a longest axis, b intermediate axis, c shortest axis

Nevin (1946) zwrócił uwagę na fakt bardzo ważny dla zrozumienia procesów zachodzących w czasie transportu. Stwierdził on, że przy małej turbulencji siła prądu jest przeważnie styczna do dna rzeki, natomiast przy silnej turbulencji jest przeważnie do niego prostopadła. Przy dominującym w żwirach rzecznych dachówkowatym ułożeniu otoczków z płaszczyznami największego przekroju skierowanymi pod prąd, siła działająca stycznie do dna rozkłada się w ten sposób, że jedna ze składowych przyciska otoczek do dna (fig. 11). Dla rozpoczęcia ruchu żwiru konieczne jest działanie siły skierowanej do góry, prostopadle do dna rzeki. Ponieważ otoczki o wysokiej kulistości mają większe szybkości opadania, niż otoczki odbiegające kształtem od kuli, te ostatnie będą łatwiej wprawiane w ruch. Nevin w cytowanej wyżej pracy stwierdza, że kształt odbiegający od kulistego ułatwia transport, przy czym wpływ kształtu na łatwość transportowania przez wodę wzrasta z rosnącą średnicą ziarn. U mułów i drobnoziarnistych piasków można go pominąć, u żwirów dochodzi on do 40%.

W celu stwierdzenia kształtu najłatwiej transportowanych otoczków wykonano pomiary osiowych współczynników kształtu. Porównanie wyników pomiarów wykonanych w trzech różnych punktach doliny Dunajca (fig. 12) pozwala stwierdzić, że w dolnym biegu koncentrują się otoczki płaskie. Spadek kulistości obserwowany w dolnym biegu rzeki jest więc związany z sortowaniem otoczków według kształtu. Należy przy tym podkreślić, że sortowanie według kształtu następuje wcześniej niż selekcja otoczków według ich wielkości wyrażonych największą średnicą.

Kulistość uważana jest często za jednoznaczny wskaźnik kształtu otoczków. Pogląd ten jest jednak niesłuszny, gdyż izolinie kulistości przebiegają ukośnie na diagramie współczynników osiowych przecinając pola różnych klas kształtu. Otoczki o tej samej kulistości mogą więc należeć do różnych klas kształtu i zachowywać się odmiennie w czasie transportu. Różnice w zachowaniu się otoczków o tej samej kulistości lecz różnych kształtach zostały stwierdzone laboratoryjnie przez Krumbeina (1942a). Kulistość nie może więc wyrażać w sposób jednoznaczny kształtu otoczków.

Związek kulistości ze stopniem obtoczenia

Kulistość i stopień obtoczenia są wzajemnie swoimi funkcjami. Stopień obtoczenia jest wprost proporcjonalny do kulistości, przy czym zależność ta ma charakter liniowy (fig. 13). Jak wynika z rysunku, w górnym biegu Dunajca stopień obtoczenia wzrasta znacznie szybciej niż kulistość. Równanie prostej 1 jest: $y = 4,33x + N$. Zaznaczający się w dolnym biegu rzeki spadek stopnia obtoczenia, związany ze spadkiem kulistości, jest znacznie powolniejszy. Równanie prostej 2 odpowiadającej dolnemu biegowi rzeki jest: $y = 0,59x + M$.

Zmiany stopnia obtoczenia w górnym biegu rzeki polegają na ścierniu nierówności otoczków i zaokrągłaniu ich naroży. Zmniejszanie się stopnia obtoczenia w dolnym biegu Dunajca nie oznacza pojawiania się

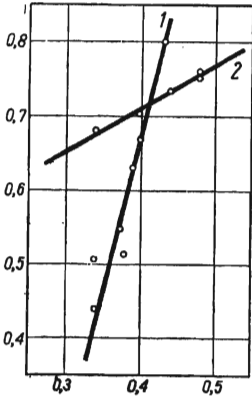


Fig. 13

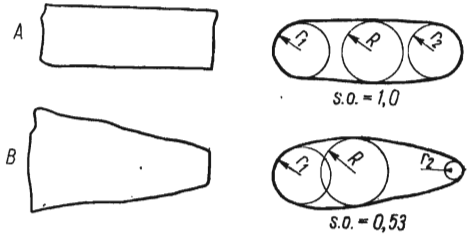
Współzależność stopnia obtoczenia i kulistości otoczków granitu w klasie wielkości 64-128 mm. 1 dla rosnącej kulistości i stopnia obtoczenia, 2 dla malejącej kulistości i stopnia obtoczenia. Na osi rzędnych — średni stopień obtoczenia, na osi odciętych — średnia kulistość

Roundness and sphericity interdependence within the 64-128 mm grade pebbles. 1 for increasing sphericity and roundness, 2 for decreasing sphericity and roundness. Mean roundness shown by ordinate; mean sphericity by abscissa.

znów nierówności na powierzchniach otoczków lub ostrych krawędzi i naroży. Spadek stopnia obtoczenia jest w tym przypadku związany z kształtem otoczków. Według przytoczonej wyżej definicji Wadella stopień obtoczenia jest niezależny od kształtu otoczków. Tak jest w istocie,

Fig. 14

A otoczek wymodelowany z bryły równoległosciennej. B otoczek wymodelowany z bryły o przekroju przyzmatycznym, o niższym stopniu obtoczenia
A pebble shaped out of a parallelepiped body. B pebble shaped out of a body with prismatic section, showing lower roundness



jeżeli otoczek został wymodelowany z bryły prostopadłościenniej. Jeżeli jednak pierwotny kształt otoczka odbiegał od prostopadłościannu, stopień obtoczenia jest uzależniony od kształtu. Zależność tę ilustruje fig. 14.

Orientacja otoczków

W celu ustalenia zależności pomiędzy orientacją otoczków a ich kształtem i wielkością wykonano pomiary orientacji osi otoczków w różnych klasach wielkości i różnych klasach kształtu. Wyniki pomiarów zostały przedstawione na diagramach punktowych w układzie współrzędnych biegunowych. Dla zinterpretowania diagramów punktowych skonstruowano diagramy sektorowe orientacji otoczków: punkty przedstawiające położenie osi otoczków zostały zsumowane w sektorach po 30°,

przy czym za środek pierwszego sektora przyjmowano kierunek prądu w miejscu dokonania pomiaru. Na dwusiecznej sektora odmierzano następnie odcinek o długości proporcjonalnej do ilości punktów w sektorze.

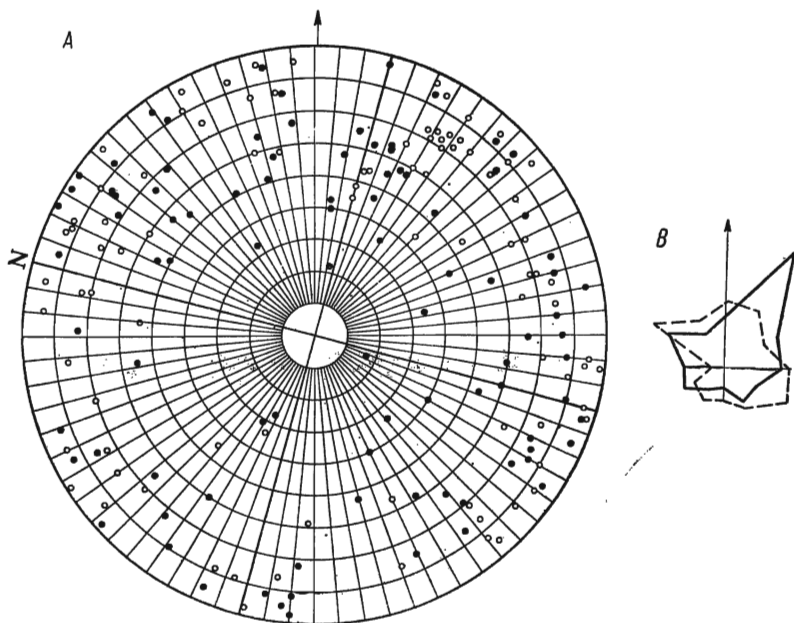


Fig. 15

Orientacja otoczków w klasie wielkości 128–256 mm

A diagramy punktowe, B sektorowe diagramy sumacyjne. Kółka i linie ciągłe — osie najdłuższe, kropki i linie przerywane — osie średnie. Strzałki, wskazują kierunek prądu. N-kierunek północny

Orientation of pebbles of the 128–256 mm grade

A point diagrams, B sector summation diagrams. Empty circles and continuous lines indicate longest axes, dots and broken lines — intermediate axes. Direction of current marked by arrows. N northern direction

Z połączenia końców tych odcinków otrzymuje się figurę geometryczną obrazującą ilościowy rozkład kierunków osi otoczków. Diagramy te pozwalają odczytać dominujący kierunek nachylenia osi otoczków, na podstawie czego można odtworzyć uprzywilejowany kierunek nachylenia płaszczyzn największego przekroju otoczków. Wielkość kąta nachylenia osi otoczków została przedstawiona na osobnym rysunku.

Diagramy zestawione dla pomiarów otoczków różnej wielkości wykazują znamienne różnice (fig. 15, 16 i 17). Otoczki frakcji 128–256 mm posiadają uprzywilejowany kierunek najdłuższych osi zgodny z kierun-

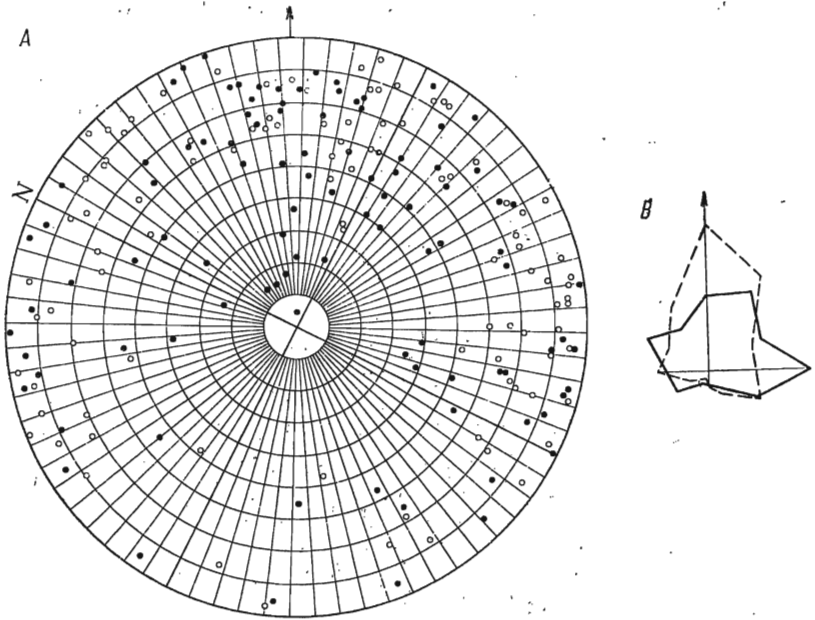


Fig. 16

Orientacja otczaków w klasie wielkości 64-128 mm

Orientation of pebbles in the 64-128 mm grade

Objaśnienia patrz fig. 15 For explanation see fig. 15

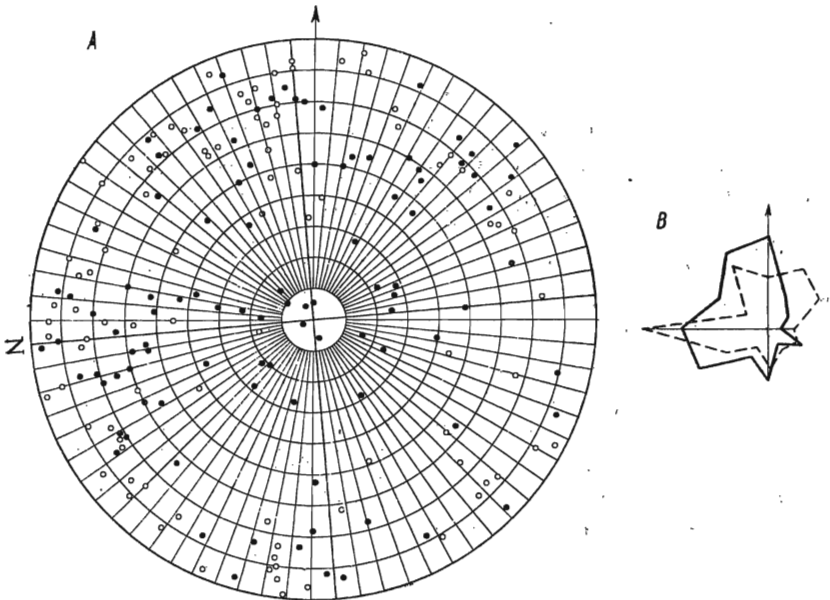


Fig. 17

Orientacja otczaków w klasie wielkości 32-64 mm

Orientation of pebbles in the 32-64 mm grade

Objaśnienia patrz fig. 15 For explanation see fig. 15

kiem prądu, uprzywilejowany zaś kierunek osi średnich — poprzeczny do kierunku prądu. Większość płaszczyzn największego przekroju otoczków pochylona jest pod prąd. Otoczki frakcji 64-128 mm, która dominuje ilościowo w żwirach Dunajca, posiadają orientację odmienną. Uprzywilejowany kierunek najdłuższych osi jest prostopadły do kierunku prądu, natomiast osie średnie ustawione są w większości zgodnie z kierunkiem prądu. Dominują upady płaszczyzn największego przekroju otoczków skierowane pod prąd. Otoczki frakcji 32-64 mm posiadają najmniej wyraźną orientację w stosunku do kierunku prądu. Kierunki osi wykazują po kilka maksimów, w związku z czym brak jest wyraźnej orientacji płaszczyzn największego przekroju otoczków. Zwraca natomiast uwagę częste występowanie bardzo stromych nachyleń osi.

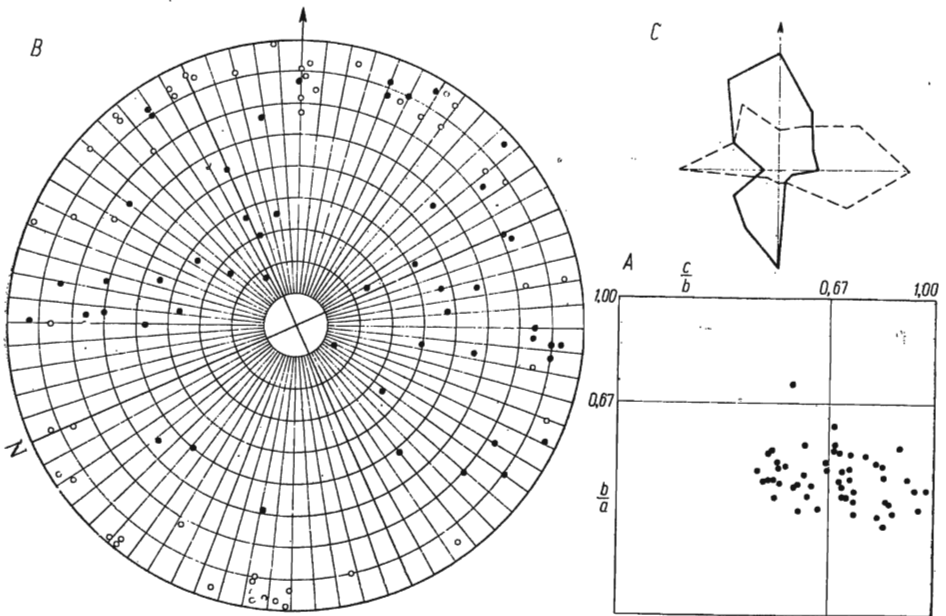


Fig. 18

Orientacja otoczków wrzecionowatych

A osiowe współczynniki kształtu, B diagramy punktowe, C sektorowe diagramy sumacyjne; a kółka, linie ciągłe — osie najdłuższe; b kropki, linie przerywane — osie średnie, c — osie najkrótsze. Strzałki wskazują kierunek prądu. N — kierunek północny

Orientation of prolate pebbles

A axial shape coefficients, B point diagrams, C sector summation diagrams; a empty circles and continuous lines show longest axes; b dots and broken lines — intermediate axes, c — shortest axes. Direction of current indicated by arrows. N — northern direction

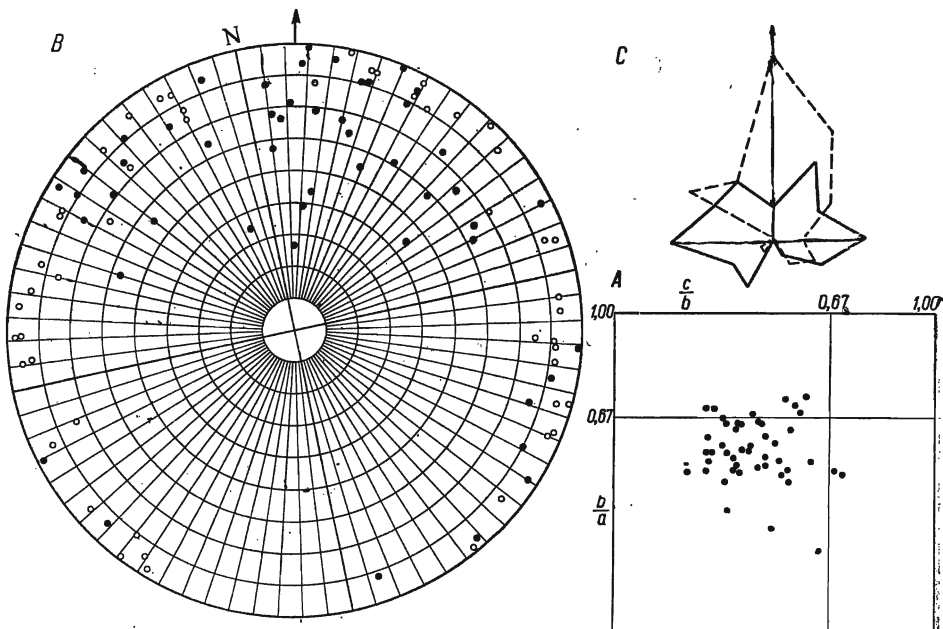


Fig. 19

Orientacja otoczków elipsoidalnych. *Objaśnienia patrz fig. 18*
 Orientation of ellipsoid pebbles. *For explanation see fig. 18*

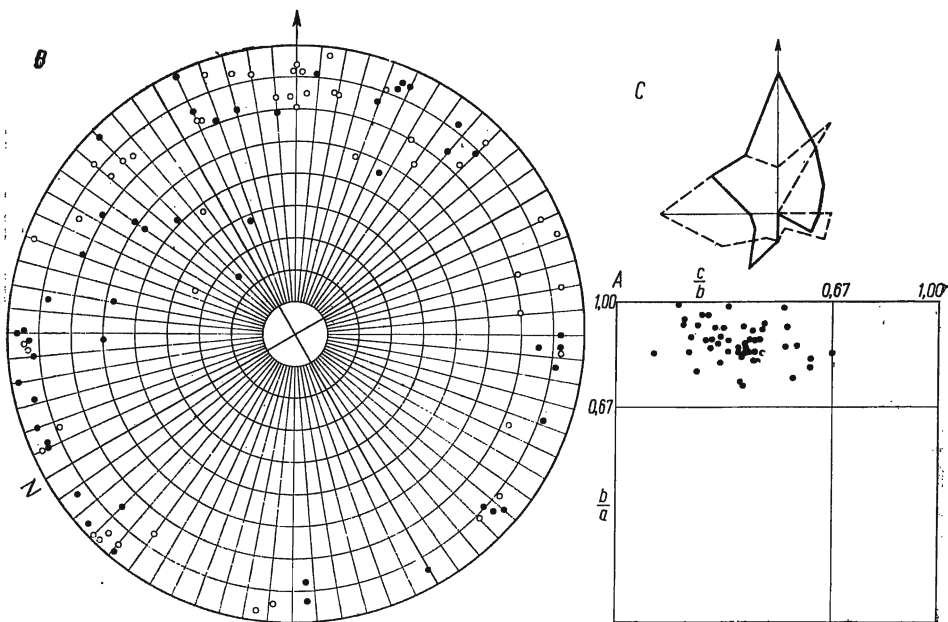


Fig. 20

Orientacja otoczków dyskoidalnych. *Objaśnienia patrz fig. 18*
 Orientation of discoid pebbles. *For explanation see fig. 18*

Zależność orientacji otoczków od ich kształtu występuje również bardzo wyraźnie (fig. 18, 19 i 20). Otoczki wrzecionowate posiadają uprzywilejowany kierunek najdłuższych osi, zgodny z kierunkiem prądu i uprzywilejowany kierunek średnich osi, poprzeczny do kierunku prądu. Najdłuższe osie mogą być nachylone zarówno pod prąd jak i z prądem, w związku z czym płaszczyzny największego przekroju otoczków też nachylone są pod prąd lub z prądem.

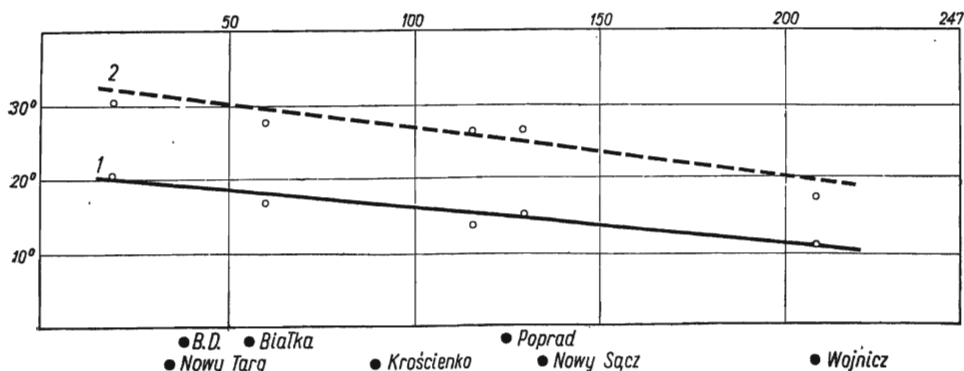


Fig. 21

Średnie nachylenie osi otoczków w klasie wielkości 64–128 mm. 1 osie najdłuższe, 2 osie średnie. Na osi rzędnych — nachylenie w stopniach, na osi odciętych — długość doliny w km. Pod rysunkiem: miejsca połączenia się z Dunajcem dopływów niosących materiał tatrzański (B. D. Biały Dunajec) oraz położenie ważniejszych miejscowości

Mean axial inclination in the 64–128 mm grade of pebbles. 1 longest axes, 2 intermediate axes, inclination in degrees shown by ordinate, length of valley in km by abscissa. Below the drawing; mouths of Dunajec tributaries carrying Tatra material (B. D. Biały Dunajec River) and position of more important localities

Otoczki elipsoidalne wykazują uprzywilejowany kierunek najdłuższych osi, prostopadły do kierunku prądu, oraz bardzo silne maksimum osi średnich, ułożonych zgodnie z kierunkiem prądu. Płaszczyzny największego przekroju otoczków niemal bez wyjątku nachylone są przeciwnie do kierunku prądu. Otoczki dyskwoidalne wykazują mniejsze różnice w orientacji najdłuższych i średnich osi, co wytłumaczyć można niewielkimi różnicami długości tych osi. Płaszczyzny największego przekroju otoczków ustawione są przeciwnie do kierunku prądu.

Średnie nachylenie osi otoczków w klasie wielkości 64–128 mm wynosi dla osi najdłuższych 10°–20°, dla osi średnich 18°–30° (fig. 21). Są to wartości zgodne z nachyleniami otoczków w żwirach rzecznych podanymi przez Cailleux (1945). Wielkość średniego nachylenia osi otoczków

maleje w dolnym biegu rzeki. Prawdopodobnie jest to spowodowane coraz gorszym wysortowaniem osadu. Nachylenie otoczków wywołane jest przez to, że poszczególne otoczki opierają się o siebie. Jeżeli otoczek oparty jest o inny, równej wielkości otoczek, nachylenie jego będzie bardziej strome niż w przypadku, gdy będzie się on opierał o otoczek mniejszy od siebie.

Mechanizm transportu i depozycji żwirów

Przedstawione wyżej różnice w orientacji otoczków różnej wielkości i różnego kształtu pozwalają na odtworzenie mechanizmu transportu i sedymentacji żwirów. Poszczególne otoczki zachowują się w czasie transportu w ten sposób, by ruch ich odbywał się kosztem najmniejszej straty energii przez ośrodek transportujący. Dominującym typem ruchu jest toczenie otoczków (z wyjątkiem otoczków sferoidalnych i dyskooidalnych) dookoła ich najdłuższych osi ustawionych poziomo i prostopadle do kierunku prądu (Twenhofel 1939). Z chwilą, gdy rozpoczyna się opadanie wody i spadek szybkości prądu, poszczególne frakcje żwiru, poczynając od najgrubszych, są deponowane. Największe otoczki, których transport ustaje najwcześniej, zatrzymują się pośród masy toczącego się naprzód drobniejszego materiału, i ustawiają się tak, by stawiać mu jak najmniejszy opór, a więc swym najmniejszym przekrojem prostopadle do kierunku ruchu. Najdłuższe osie są przy tym ustawiane równolegle do kierunku prądu. W ten sposób następuje reorientacja otoczków, polegająca na tym, że otoczek, który transportowany jest z osią najdłuższą ustawioną poprzecznie do kierunku prądu, ma po depozycji oś najdłuższą ustawioną równolegle do kierunku prądu. Widoczne na diagramie orientacji otoczków w klasie wielkości 128-256 mm lekkie odchylenie uprzywilejowanego kierunku najdłuższych osi od kierunku prądu spowodowane jest zapewne wpływem bliskości brzegu. Wpływ ten został stwierdzony doświadczalnie przez Kinda i Kucharenkę (1948).

Przy dalszym spadku prędkości osadzana jest frakcja 64-128 mm stanowiąca główną masę osadu. Reorientacja otoczków w czasie depozycji następuje tu na znacznie mniejszą skalę i orientacja otoczków pozostaje taka sama jak w czasie transportu. Drobniejsze frakcje składane są pomiędzy większymi otoczkami i dostosowują się do wolnych przestrzeni pomiędzy nimi. Dlatego orientacja osi i płaszczyzn największego przekroju otoczków w stosunku do kierunku prądu jest u małych otoczków najmniej zdecydowana.

Wpływ kształtu otoczków na ich ułożenie zaznacza się w czasie reorientacji ich w momencie depozycji. Otoczki wrzecionowate ulegają reorientacji w najsilniejszym stopniu, a nadto mają trwałe położenie na-

wet wtedy, gdy ich najdłuższa oś zapada zgodnie z kierunkiem prądu. Otoczaki o innym kształcie ulegają reorientacji w mniejszym stopniu i zachowują ułożenie dachówkowate z upadami płaszczyzn największego przekroju skierowanymi pod prąd.

WNIOSKI

Znajomość przebiegu zmienności cech otoczek oraz zależności ich orientacji od wielkości i kształtu pozwala na wyciągnięcie wniosków, które mogą być użyteczne przy próbach odtworzenia kierunku transportu i warunków sedymentacji kopalnych żwirów rzecznych.

Żwiry, które przeszły daleki transport, określa się zazwyczaj nazwą żwirów dojrzałych (*mature gravels* w terminologii anglosaskiej). Za najważniejsze wskaźniki dojrzałości żwirów uważane są: skład petrograficzny, kulistość i stopień obtoczenia. Żwiry dojrzałe charakteryzują się nieobecnością otoczek o małej wytrzymałości mechanicznej i odporności na wietrzenie chemiczne, oraz wysoką kulistością i stopniem obtoczenia.

Rozpatrzmy zmienność tych wskaźników w żwirach doliny Dunajca. Krzywe zmienności: składu petrograficznego (fig. 4), kulistości (fig. 8) i stopnia obtoczenia (fig. 9) podzielić można na trzy strefy: początkową strefę szybkich zmian składu petrograficznego oraz wzrostu stopnia obtoczenia i kulistości, środkową strefę, w której zmienność tych cech jest bardzo niewielka, oraz końcową strefę szybkich zmian wskaźników dojrzałości.

W strefie początkowej zmiany wskaźników dojrzałości spowodowane są głównie mechanicznym niszczeniem otoczek w czasie transportu. W strefie końcowej zmiany składu petrograficznego spowodowane są przede wszystkim wietrzeniem chemicznym, a zmiany kulistości i stopnia obtoczenia mają charakter wsteczny w stosunku do kierunku zmian zachodzących w strefie początkowej.

W strefie początkowej z przebiegu zmian wskaźników dojrzałości można łatwo określić kierunek transportu i oceniać w przybliżeniu jego długość. Natomiast w strefie środkowej możliwość oceny długości transportu i określenia jego kierunku jest bardzo znikoma. W strefie tej zmienność wskaźników dojrzałości, spowodowana procesami zachodzącymi w czasie transportu, może mieścić się w granicach lokalnej zmienności tych wskaźników w miejscach pobrania prób. W strefie końcowej brak jakichkolwiek kryteriów do oceny długości transportu. Kierunek określić można na podstawie zmienności składu petrograficznego, lecz przy próbach określania kierunku transportu na podstawie zmienności stopnia obtoczenia i kulistości otoczek można dojść do zupełnie fałszywych wniosków.

Stopień obtoczenia i kulistości otoczków oraz skład petrograficzny żwiru rozpatrywanego czy to oddzielnie, czy też jako zespół cech mogą więc wystarczyć do oceny długości transportu i określenia jego kierunku. Jedynie w strefie początkowych szybkich zmian wskaźników dojrzałości w górnym biegu rzeki określenie kierunku transportu i ocena jego długości jest możliwa. Należy tutaj wspomnieć, że zdaniem Krynine'a (1942) zmienność cech otoczków nie może być odnoszona bezpośrednio do długości transportu lub czasu jego trwania. Zmiany cech otoczków następują najszybciej przy pewnej krytycznej szybkości prądu, różnej dla różnych cech i klas wielkości okruchów tej samej skały czy minerału. Obserwowana zmienność cech odzwierciedla długość trwania transportu przy zachowaniu prędkości krytycznej. Ponieważ szybkość prądu zmienia się w rzece w bardzo szerokich granicach, odnoszenie zmienności cech do bezwzględnej długości transportu obarczone jest zawsze bardzo dużym błędem.

Określenie kierunku transportu kopalnych żwirów rzecznych przeprowadzić można najłatwiej na podstawie pomiarów orientacji otoczków. Przy planowaniu takich pomiarów i interpretowaniu ich wyników należy brać pod uwagę różnice w zachowaniu się otoczków różnego kształtu i różnej wielkości.

*Zakład Geologii Fizycznej
Akademii Górniczo-Hutniczej
Kraków, w październiku 1956*

LITERATURA CYTOWANA

- BECKER G. F. 1893. Finite homogeneous strain, flow and rupture of rocks. — Bull. Geol. Soc. Amer., 4.
- CAILLEUX A. 1945. Distinction des galets marins et fluviatiles. — Bull. Soc. Géol. France, 15.
- HALICKI B. 1930. Dyluwialne zlodowacenie północnych stoków Tatr (La glaciation quaternaire du versant nord de la Tatra). — Spraw. P. I. G. (Bull. Serv. Géol. Pol.), t. V. Warszawa.
- , 1947. O właściwej roli kwarcytów w żwirowiskach przedpola Tatr (Sur le rôle des quartzites dans les graviers de l'avant-pays de la Tatra). Roczn. P. T. Geol. (Ann. Soc. Géol. Pol.), t. XVII. Kraków.
- HORNÍŠ E. 1953. Prispěvek k výskumu závislosti složení štrkov říeky Hornadu a stupna ich abrazie na dĺžke vodneho transportu. — Geol. Sbor., 4.
- KARLSTROM T. N. V., 1952. Improved equipment and techniques for orientation studies of large particles in sediments. — Journ. Geol., 60.
- KIND N. W. & KUCHARENKO A. A. 1948. K voprosu ob orientirovke galek v rečnom potoke. — Zap. Vses. Min. Obšč., 77.

- KLIMASZEWSKI M. 1937. Morfologia i dyluwium doliny Dunajca (Morphologie und Diluvium des Dunajctales von der Pieninen bis zur Mündung). — *Wiad. Służby Geogr.* nr 2. Kraków.
- KRUMBELN W. C. 1939. Preferred orientation of pebbles in sedimentary deposits. — *Journ. Geol.*, 47.
- 1940. Flood gravels of San Gabriel Canyon. — *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 51.
- 1941. The effects of abrasion on the size, shape and roundness of rock fragments. — *Journ. Geol.*, 49.
- 1942a. Settling velocities and flume behavior of nonspherical particles. — *Amer. Geophys. Union Trans.*
- 1942b. Flood deposits of Arroyo Seco. — *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 53.
- KRUMBELN W. C. & PETTIJOHN F. J. 1938. *Manual of sedimentary petrography.* New York.
- KRYNINE P. D. 1942. Critical velocity as a controlling factor in sedimentation. — *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 53.
- MARSHALL P. 1927/28. The wearing of gravels. — *New Zealand Inst. Treat.*, 58.
- MATAKIEWICZ M. 1936. Materiał ruchomy w potokach i rzekach i badanie jego ruchu. — *Czasopismo Techniczne.* Lwów.
- NEVIN CH. 1946. Competence of moving water to transport debris. — *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 57.
- OTTO G. H. 1938. The sedimentation unit and its use in field sampling. — *Journ. Geol.*, 46.
- PETRANEK J. 1952. Vyskum zavislosti slozeni šterku Hornadu a stupni jejich abrase na delce vodního transportu. — *Vestn. Ustř. Ust. Geol.*, 27.
- PETTIJOHN F. J. 1949. *Sedimentary Rocks.* New York.
- PLUMLEY W. 1948. Black Hills terrace gravels. — *Journ. Geol.*, 56.
- RUSSEL R. D. & TAYLOR R. E. 1937. The roundness and shape of Mississippi River sands. — *Ibidem*, 45.
- SARKISJAN S. G. & KLIMOWA L. T. 1955. Orientirovka galek i metody ich izučenia dla paleogeografičeskich postrojenii. — *Izd. Akad. Nauk SSSR.* Moskva.
- SARKISJAN S. G. & ŠAPOVAŁOVA G. A. 1949. Orientirovka galek dušetsoj švity tretičnyh otloženiĭ Gruzji kak kriterii putej terigennoĭ snosa materiała. — *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 47.
- TWENHOFEL W. H. 1939. *Principles of sedimentation.* New York.
- WADELL H. 1932. Volume, shape and roundness of rock particles. — *Journ. Geol.*, 40.
- 1934. Shape determination of large sedimental rocks fragments. — *Pan-American Geologist*, 61.
- ZINNG T. 1935. Beitrag zur Schotteranalyse. — *Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, Bd. 15.

P. УНРУГ

СОВРЕМЕННЫЙ ТРАНСПОРТ И СЕДИМЕНТАЦИЯ ГРАВИА В ДОЛИНЕ ДУНАЙЦА (ЗАПАДНЫЕ КАРПАТЫ)

(Резюме)

Статья обсуждает изменчивость петрографического состава гравия в долине Дунайца, а также изменчивость величины, степени окатания и шаровидности гальки гранита. Представлена зависимость ориентировки гальки от их величины и формы, а также механизм транспорта и отложения гравия. Автор обсуждает тоже возможность отображения направления транспорта ископаемых речных гравиев и оценки его длины.

R. UNRUG

RECENT TRANSPORT AND SEDIMENTATION OF GRAVELS IN THE DUNAJEC VALLEY (WESTERN CARPATHIANS)

(Summary)

ABSTRACT: Variation in petrographic composition of gravel in the Dunajec River, as well as size, roundness and sphericity variation of granite pebbles are the subject of the present paper. The size and shape control of pebble orientation is described with a discussion on the mechanism of transport and deposition. The possibility of determining transport direction and estimating its length is also presented.

The Dunajec has been chosen as a suitable river for studies of transport of clastic material, since its gravels contain pebbles deriving from the Tatra Mts. and therefore the length of their transport may readily be determined (fig. 1). Variation of pebble characteristics has been examined on the example of granite pebbles.

The water level in the Dunajec River is subject to marked variations (fig. 2). It is characterised by rapid rise and somewhat slower fall. The gravel is transported at high water stages only.

Samples for the determination of petrographic composition of gravel, and of the characteristics of pebbles, were collected from a lag gravel layer resting on the surface of the lowermost flood terrace. This layer of lag gravel has been recognised as a sedimentary unit.

Size variation of transported rock fragments

Size variation has been investigated on granite boulders and pebbles and is shown in fig. 3. The abrupt growth of diameters on the 55 km of

the valley is due to coarser material being brought there by the Białka River. The maximal diameters of granite boulders and pebbles have been plotted and compared with the curve presenting diameter reduction according to Sternberg's law which establishes the reduction pattern caused by abrasion of pebbles during transport. Measured diameters agree well with calculated ones in the middle course of the river, but they differ markedly in the upper and lower courses. The increased rate of size reduction results from the combined action of abrasion and selective transport. The action of the latter factor is strongest in sectors where the river gradient decreases.

Variation in petrographic composition of gravel

Measurements have been made in the 64-128 mm grade of pebbles (fig. 4). This grade is quantitatively predominant within the Dunajec gravels and most widely distributed in the river valley. Samples consisted of one hundred pebbles. The rapid elimination of carbonate and metamorphic rocks is due to their small abrasive resistance. The enrichment of gravel in quartzite pebbles is caused by various factors within the different river sectors. In the upper course of the river quartzite pebbles are brought down by Dunajec tributaries from high Pleistocene terraces where quartzites have become enriched owing to the resistance against weathering. In the lower river course the rapid decrease of granite pebbles content is to be explained by weathering. Fig. 5 illustrates the desintegration of granite pebbles in the lower course of the Dunajec.

The behaviour of vein-quartz pebbles is very characteristic. They are, namely, transported in small quantities by the Czarny Dunajec River and, being the most resistant to weathering of all rocks, they concentrate in gravel of the lower river course. Fig. 6 shows the variation in petrographic composition within the 128-256 mm grade of gravel from the uppermost course of the Dunajec. The sequence of elimination of various rock pebbles agrees with that displayed in the 64-128 mm grade. Dolomites constitute approximately 10 per cent of carbonate rock pebbles (fig. 7). This percentage is out of proportion to the part played by dolomites in the composition of sedimentary Tatra series. This disproportion is possibly caused by strong tectonic brecciation of dolomites, which during transport are easily broken up and ground in the river bed, and soon pass into finer grades.

Variation of sphericity and roundness

Wadell's (1932, 1934) definitions of roundness and sphericity have been here adopted. Samples for determination of these features consisted of 50 pebbles. The sphericity variation is shown in fig. 8. The mean spher-

ricity increases in the upper and middle river courses showing a marked decrease in the lower river course. The initial sphericity is 0.34. The maximum value of 0.48 is attained after 108 km of transport. At the 208th km of valley length the sphericity is 0.34. Standard deviation and the skewness coefficient of sphericity do not show any systematic changes.

Fig. 9 illustrates roundness variation. Mean roundness grows in the upper and middle river course and decreases in the lower course. The initial roundness is 0.44. The maximum roundness — that of 0.80 — is attained after 130 km of transport. At the 208th km of the valley length the roundness is 0.68. Standard deviation and skewness coefficient of roundness do not show systematic changes. The initial sphericity and roundness are the result of the transport of pebbles within the Tatra stream valleys over a distance of ca. 8 km. This explains their relatively high initial values and the absence of rapid growth of sphericity and roundness during the first few kilometres of transport by the Dunajec.

The decrease of mean sphericity and roundness along the lower river course is not due to breaking of pebbles or to the reduction of their mean diameter within the same grade along the river course. As shown in fig. 10, sphericity of pebbles is indirectly proportionate to their size. The absence of a variation pattern in the standard deviation of sphericity indicates that during transport sorting of pebbles is not controlled by sphericity.

The decrease of sphericity of pebbles along the lower course of the Dunajec may be attributed to the action of sorting controlled by shape. Within each particular grade the volume and weight of pebbles showing low sphericity is smaller than of those with higher sphericity. Hence pebbles with low sphericity ought to be more readily transported by the current. After Nevin (1946) the force of the current is mostly tangential to the river bottom in the case of weak turbulence, while in the case of strong turbulence it is dominantly normal to the river bottom. With imbrication as the predominant pebble arrangement in river gravels, a force acting vertically upwards is needed (fig. 11) in order to set the pebble in motion. Spherical pebbles having a great settling velocity are in this case less readily put into motion than non-spherical pebbles. In the paper mentioned above Nevin asserts that the particle-shape control of current competency is in direct proportion to particle size, and in the case of gravels it attains a 40 per cent value. As is shown in fig. 12, flat, discoidal and ellipsoidal pebbles are concentrated along the lower river course.

Sphericity and roundness are mutual functions of each other. Their interdependence shows a linear character (fig. 13). In the upper river

course roundness increases more rapidly than sphericity. Reduction of roundness occurring in the lower river course, controlled by sphericity reduction, is markedly slower. Roundness is controlled by shape and sphericity only if the pebble has been modelled from a rock fragment, the original form of which was not that of a parallelepipedon. If the pebble had been shaped from a parallel-side rock fragment roundness is not controlled by shape and sphericity (fig. 14).

Orientation of pebbles

With a view of determining the interdependence of the orientation of pebbles and their shape and size, pebble orientation measurements have been made in different grades and shape classes. The samples consisted of 100 pebbles in various grades and 50 pebbles in different shape classes. Measurement data are plotted in polar coordinates diagrams which served as a basis for plotting star diagrams required for interpreting measurement data.

Diagrams plotted for measuring orientation of pebbles of different grades show marked differences (figs 15-17). The 128-256 mm grade pebbles show a preferred orientation of longest axes parallel to the direction of current, while the preferred orientation of intermediate axes is perpendicular to it. The majority of the greatest cross section planes dip up the current. Pebbles of the 64-128 mm grade, which constitute the main bulk of gravel, have the preferred orientation of longest axes perpendicular to the direction of current, while the intermediate axes are parallel to the direction of current. Practically all greatest cross section planes of pebbles dip up the current. The 32-64 mm grade pebbles show least distinct orientation in relation to the direction of current.

The shape-control of pebble orientation is also very obvious (figs. 18-20). Prolate pebbles have the preferred orientation of longest axes parallel to the direction of the current, while the preferred orientation of intermediate axes is perpendicular to the current. The longest axes incline either up- or downstream, whence the greatest cross section planes also dip up- or downstream. Ellipsoidal pebbles have the preferred orientation of longest axes perpendicular to direction of current and a very strong maximum of intermediate axes arranged parallel to the direction of current. Practically all greatest cross section planes of pebbles dip upstream. Discoidal pebbles show less distinct differences in the orientation of the longest and intermediate axes. This is probably caused by similar axial dimensions here. Greatest cross section planes of pebbles dip upstream.

Mean axial inclination of pebbles within the 64-128 mm grade is shown in fig. 21. The measurement data agree with those of Cailleux

(1945). The axial inclination is reduced along the river lower course, this being a result of the poorer sorting of gravel.

The described differences in the orientation of pebbles belonging to various grades and shape classes suggest a mechanism responsible for the transport and deposition of gravel. During transport pebbles behave so as to warrant least loss of energy by the transporting agent. The dominant type of movement here is that pebbles — the spheroidal and discoidal excepted—roll round their longest axes which are horizontal and perpendicular to the direction of current (Twenhofel 1939). As soon as the water level has lowered and the velocity of current is reduced, the various gravel grades are deposited, beginning with the coarsest. The largest pebbles, the first to be deposited out of the great bulk of the still rolling finer material, assume such a position as to warrant minimum resistance viz. with their smallest cross sections perpendicular to the direction of movement. The longest axes are in this case arranged parallel to the direction of current and in this way a re-orientation of pebbles takes place. The slight deviation of the preferred orientation of longest axes from the direction of current, shown in the orientation diagram for the 128-256 mm grade pebbles is probably due to the proximity of the river bank. An experimental confirmation of this influence has been obtained by Kind and Kucharenko (1948).

Upon further velocity reduction the next grade to be deposited is that of 64-128 mm which constitutes the main bulk of gravel. The re-orientation of pebbles during deposition takes place here on a markedly smaller scale, and their orientation remains the same as during transport. The finer grades are deposited among larger pebbles adjusting their position to the vacant free spaces. Hence the orientation of axes and greatest cross section planes is least distinct in the case of small pebbles. The control exercised by the shape of pebbles with respect to their orientation is observable during re-orientation at the moment of deposition. Prolate pebbles are subjected to strongest re-orientation and retain a stable position even when the longest axis inclines downstream. Pebbles with other shapes are less subject to re-orientation.

Conclusions

Petrographic composition, sphericity and roundness are the most diagnostic indices of gravel maturity. Variation curves of these indices relating to the Dunajec gravels may be differentiated into three zones: the initial zone of rapid changes in petrographic composition and increasing roundness and sphericity; the central zone where the variation rate of these indices is very low; and the terminal zone showing rapid changes

of maturity indices. In the latter zone sphericity and roundness of pebbles display retrogressive changes. It is only within the initial zone that direction of transport may be determined and its length estimated on ground of the maturity indices variation. In the central zone the maturity indices variation, due to abrasion during transport, may be less marked than their local variation noted at sites of sampling. The determination of direction of transport and an estimate of its length are not possible either in the central or in the terminal zone.

The roundness and sphericity of pebbles and the petrographic composition of gravel studied either collectively or individually may not supply adequate evidence to estimate the length of transport and determine its direction. Even when this is possible Krynine's (1942) statement should be remembered that characteristics variation in pebbles cannot be directly referred to the length of transport or to the time of its duration. The direction of transport in fossil river gravels is best determined on pebble orientation. In interpreting such measurements, differences in pebble behaviour, controlled by size and shape must be taken into account.

*Laboratory of Physical Geology
Academy of Mining and Metallurgy Engineering
in Cracow
Cracow, October 1956*

OBJAŚNIENIA DO PLANSZY XLII
DESCRIPTION OF PLATES XLII

Fig. 1

Rysowanie krzyża na otoczaku
Drawing the cross on a pebble

Fig. 2

Odtwarzanie położenia otoczaka. Wzrok wykonawcy skierowany pionowo w dół.
Krzyż narysowany na otoczaku powinien być widoczny w szczelinach płytki
Restoration of the position of a pebble. The cross drawn on the pebble should be
visible in the slits looking vertically downwards

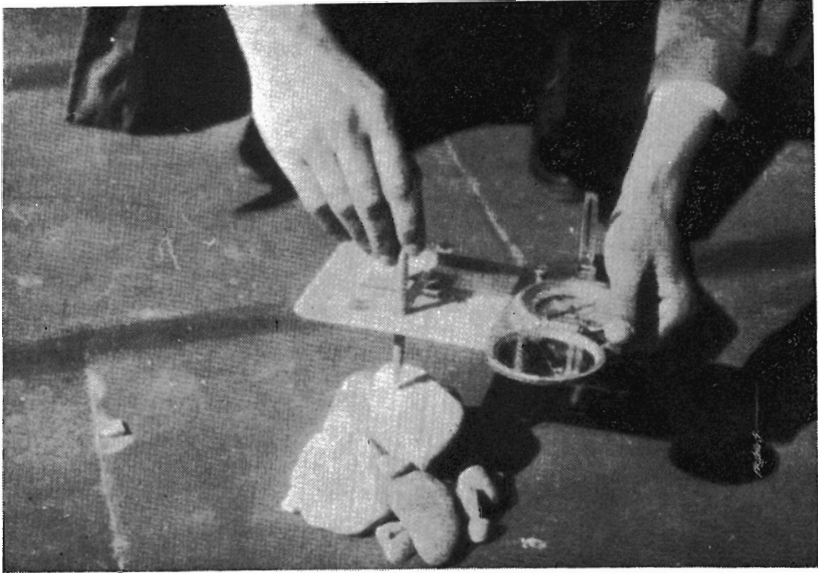


Fig. 1

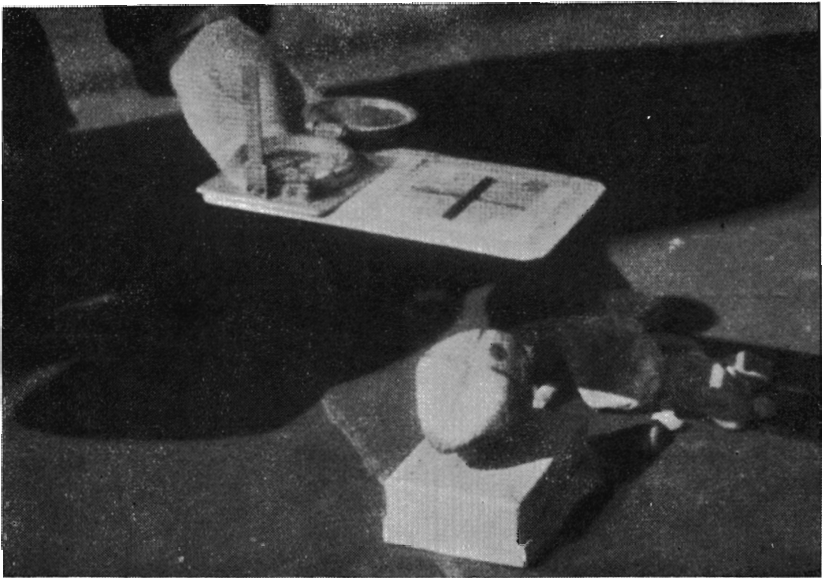


Fig. 2