

## Historia zlodowacenia doliny Łomnicy w Karkonoszach w zapisie mikromorfologii powierzchni ziarn kwarcu

Andrzej Traczyk<sup>1</sup>, Barbara Woronko<sup>2</sup>



A. Traczyk

B. Woronko

**The history of glaciation of the Łomnica Valley in Karkonosze as shown by the quartz grain surface micromorphology records.** *Prz. Geol.*, 58: 1182–1191.

*Abstract.* The Łomnica Valley (Karkonosze Mountains, Sudety Mountains) was glaciated during the Pleistocene. The question if the valley was glaciated once or more times is still not answered despite many research methods were used in numerous investigations. To answer the question and reconstruct the conditions accompanying the process of sediment transport in the glacial environment, the analyse of micromorphology of sand quartz grain surfaces in SEM (Scanning Electron Microscope) was used. The survey was conducted on the youngest and the oldest known moraine deposits occurring along the whole valley floor. The glacial deposits were compared to the waste deposits. Obtained results confirmed that the valley had been glaciated at least twice in the Pleistocene and that the conditions of glacial transport had varied.

**Keywords:** micromorphology of quartz grains, SEM, glacial deposits, Łomnica Valley, Karkonosze Mountains

Badania geomorfologiczne prowadzone w Karkonoszach od ponad 100 lat koncentrują się na trzech głównych problemach. Należą do nich: rozwój rzeźby granitowej (Jahn, 1962; Migoń, 1993; Migoń & Czerwiński 1995), powstanie grubofrakcyjnych peryglacialnych pokryw stokowych (pokrywy blokowych) (Łoziński, 1910; Dumanowski, 1961) oraz wiek form związanych z działalnością lodowców górskich (Partsch, 1894; Jahn, 1960; Lindner, 2009). W odniesieniu do ostatniego z wymienianych tematów należy stwierdzić, że dotychczasowe publikacje opierały się na wynikach tradycyjnego podejścia badawczego polegającego głównie na kartowaniu form polodowcowych, tj. na określaniu sekwencji wałów moren czołowych i bocznych. Na tej podstawie stworzono schemat rozwoju lodowców górskich w Karkonoszach zakładający, że w masywie tym w okresie plejstocenu dwu- lub trzykrotnie doszło do rozwoju lokalnego zlodowacenia górskiego (Engel, 1997). Pod koniec ubiegłego wieku w badaniach historii glacialnej Karkonoszy zastosowano metody określania wieku utworów morenowych na podstawie stopnia zwietrzenia materiału skalnego oraz datowań radiowęglowych i termoluminescencyjnych (Traczyk, 1989; Chmal & Traczyk, 1999). Dane, które uzyskano w ten sposób, potwierdziły wcześniejsze hipotezy o wielokrotności rozwoju lodowców górskich w Karkonoszach, ale nie rozstrzygnęły jednoznacznie, w których okresach plejstocenu mogło to nastąpić (Engel, 2007).

Badania geomorfologiczne prowadzone w okresie ostatnich 3 lat – obejmujące południowe i północne stoki Karkonoszy (Engel i in., 2007) i wykorzystujące różne metody analityczne, w tym badania geochemiczne osadów, datowania C<sup>14</sup>, OSL (*Optically Stimulated Luminescence*), Be<sup>10</sup>, badania stopnia zwietrzenia głazów budujących moreny przy wykorzystaniu młotka Schmidta i itp. – dostarczyły materiałów, które znacznie wzbogacają wiedzę na temat rozwoju lodowców górskich w Karkonoszach w schyłkowym okresie plejstocenu. Efektem tych prac jest m.in. potwierdzenie hipotezy przedstawionej przez Chmala i

Traczyka (1998), wskazującej, że całkowity zanik lodowców w tych górach nastąpił ostatecznie ok. 10 tys. lat p.n.e. (Engel i in., 2008).

Trudności w odtwarzaniu paleogeografii Karkonoszy w plejstocenie związane są przede wszystkim ze specyfiką środowiska górskiego. W środowisku tym, ze względu na warunki morfologiczne oraz działanie procesów denudacyjnych i erozyjnych, tylko w wyjątkowych sytuacjach istnieją możliwości zachowania sekwencji osadów pozwalających na przeprowadzenie kompletnych analiz sedymentologicznych i chronostratygraficznych. Pewnym rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie wielu komplementarnych metod badawczych, które pomagają w wypełnianiu luk informacyjnych i dają możliwość tworzenia w miarę wiarygodnych schematów paleogeograficznych.

Do metod, które do tej pory nie były stosowane w Karkonoszach, należy zaliczyć badania mikromorfologii powierzchni ziarn kwarcu frakcji piaszczystej (0,5–1,0 mm). W artykule przedstawiono wyniki takich badań, które zostały przeprowadzone w dolinie Łomnicy położonej we wschodniej części Karkonoszy. Ich celem było wykazanie, czy ziarna kwarcu pobrane z moren położonych w różnych częściach tej doliny mają podobną mikromorfologię i czy posiadają wspólne elementy wietrzeniowe. Zamierzeniem autorów było stwierdzenie, czy postulowany we wcześniejszych publikacjach schemat wielokrotnego zlodowacenia Karkonoszy znajduje swoje potwierdzenie w zapisie mikromorfologii powierzchni ziarn kwarcowych. Zastosowana metoda umożliwia również określenie ogólnych warunków geodynamicznych, w jakich następowała obróbka ziarn kwarcu, a to z kolei pozwala na podanie pewnych cech reżimu lodowca, który modelował dolinę Łomnicę.

Analiza charakteru powierzchni ziarn kwarcu frakcji piaszczystej w SEM (*Scanning Electron Microscope*) jest powszechnie stosowana w badaniach geomorfologicznych środowiska glacialnego. Na podstawie mikromorfologii powierzchni ziarn kwarcowych można podjąć próbę odtworzenia warunków panujących w czasie transportu

<sup>1</sup>Institut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski, plac Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław; traczyk@uni.wroc.pl

<sup>2</sup>Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa; bworonko@uw.edu.pl

osadów w lodowcu lub łądolodzie. Badania te pozwalają także na określenie źródeł materiału kwarcowego oraz wszelkich procesów postsedymentacyjnych, jakim podlegał osad (Krinsley & Doornkamp, 1973; Sharp & Gomez, 1986; Mahaney, 2002; Mahaney & Kalm 1995; Evans & Benn, 2004). Mahaney (1995, 2002) stwierdza nawet, że na podstawie obecności i częstotliwości występowania określonych mikrostruktur można odtworzyć miąższość lodu. Takie podejście budzi jednak wiele kontrowersji (Clark, 1989; Evans & Benn, 2004).

Na obszarze Polski omawiana metoda była wykorzystana przez Mycielską-Dowgiało (1978) i Czekaj (2005) w badaniach środowiska glacialnego glin morenowych akumulowanych przez łądolody plejstoceny na obszarze Niżu Polskiego oraz przez Woronko i Derkacz (2008) dla osadów morenowych lodowca Suchej Wody i lodowca Pańszczyca w Tatrach. W przypadku lodowców tatrzańskich przebadano jedynie osady złożone w ujściowych odcinkach dolin. Prezentowane w niniejszej pracy wyniki badań mikromorfologii powierzchni ziarn kwarcu w SEM po raz pierwszy obejmują osady z całej doliny położonej na obszarze polskich gór, w której rozwijały się lodowce górskie w plejstocenie.

### Charakterystyka obszaru badań

Obszar badań obejmował dolinę Łomnicy wykształconą w granitach karkonoskich (ryc. 1). Według *Szczegółowej mapy geologicznej Sudetów* w skali 1: 25 000 (arkusz Sosnówka) dolne partie doliny Łomnicy oraz dna karów polodowcowych Małego i Wielkiego Stawu są zbudowane z granitów gruboziarnistych porfirowatych, natomiast ściany skalne karów zbudowane są z odmian równoziarnistych. Granica między typami granitu przebiega mniej więcej u podnóża ścian karów, w strefie wysokościowej 1100–1200 m n.p.m. (ryc. 1) (Szałamacha, 1957).

W plejstocenie w dolinie Łomnicy rozwinął się największy po północnej stronie Karkonoszy lodowiec karowodoliny. W maksymalnej fazie jego rozwoju długość jezora lodowcowego dochodziła do ok. 3,5 km, a jego czoło kończyło się na wysokości ok. 900–850 m n.p.m. Efektem obecności lodowca w dolinie, oprócz karów polodowcowych, są najlepiej zachowane w skali całych Karkonoszy formy morenowe. Na podstawie szczegółowego kartowania geomorfologicznego oraz badań stopnia zwietrzenia głazów i bloków budujących moreny formy te zostały przypisane do czterech stref akumulacji lodowcowej (Traczyk, 1989). Strefy IV i III odpowiadałyby zlodowaceniom najmłodszemu, korelowanemu ze zlodowaceniem wisły, strefa II – zlodowaceniom starszemu (zlodowacenie warty), a zdenudowana pokrywa strefy I – zlodowaceniom najstarszemu (zlodowacenie odry?) (ryc. 1).

Formy morenowe w dolinie Łomnicy zbudowane są w przeważającej części z grubofrakcyjnego materiału skalnego i składają się głównie z głazów, bloków i gruzu. Elementy skalne budujące moreny osiągają maksymalnie 4–6 m średnicy, a materiał piaszczysto-pyłasty stanowi jedynie wypełnienie grubofrakcyjnego szkieletu. Z obserwacji terenowych wynika, że moreny położone przy zbiegu Łomnicy i Złotego Potoku (ryc. 1) zawierają znacznie większą domieszkę materiału drobnofrakcyjnego niż te znajdujące się w pobliżu Małego Stawu (Traczyk, 1989). W morenach położonych na dnie karów wypełnienie głazowo-gruzowego szkieletu skalnego stanowi głównie materiał piaszczysty. Głazy i bloki budujące te formy mają

ostre krawędzie. W odróżnieniu do materiału skalnego, który buduje moreny leżące w dolnej części doliny, nie wykazują one cech silnego zwietrzenia chemicznego.

### Metodyka

Analizie mikromorfologii powierzchni ziarn kwarcu w skaningowym mikroskopie elektronowym poddano 6 próbek (L2–L7) reprezentujących osady glacialne doliny Łomnicy (tab. 1, ryc. 1). Budują one wały moren czołowych (L2, L3, L4 i L7) oraz pokrywy morenowe w brzeźnych partiach stref morenowych leżących poniżej 1000 m n.p.m. (stanowiska L5, L6). W celach porównawczych przeanalizowano jedną próbkę pochodzącą ze zwietrzelin skał granitowych (L1), pobraną ze stanowiska położonego na wierzchołku Karkonoszy (Równia pod Śnieżką), o stoku nachylonym pod kątem mniejszym niż 4°. Materiał do badań pochodził z istniejących odsłoneń, częściowo z poziomów będących pod wpływem oddziaływania procesów glebowych.

Każdorazowo analizie w SEM poddano 20–25 losowo wybranych ziarn kwarcu o frakcji 0,5–1,0 mm. Przed przystąpieniem do badania ziarna wytrawiano w 10% roztworze HCl, następnie kilkakrotnie przepłukiwano w wodzie destylowanej, a w końcowym etapie preparacji napyłano ich powierzchnię złotem. Do identyfikacji mikrostruktur na powierzchni ziarn kwarcowych wykorzystano klasyfikację zaproponowaną przez Mahaneya (2002), poszerzoną o mikroformy zawarte w pracy Hellanda i Holmesa (1997).

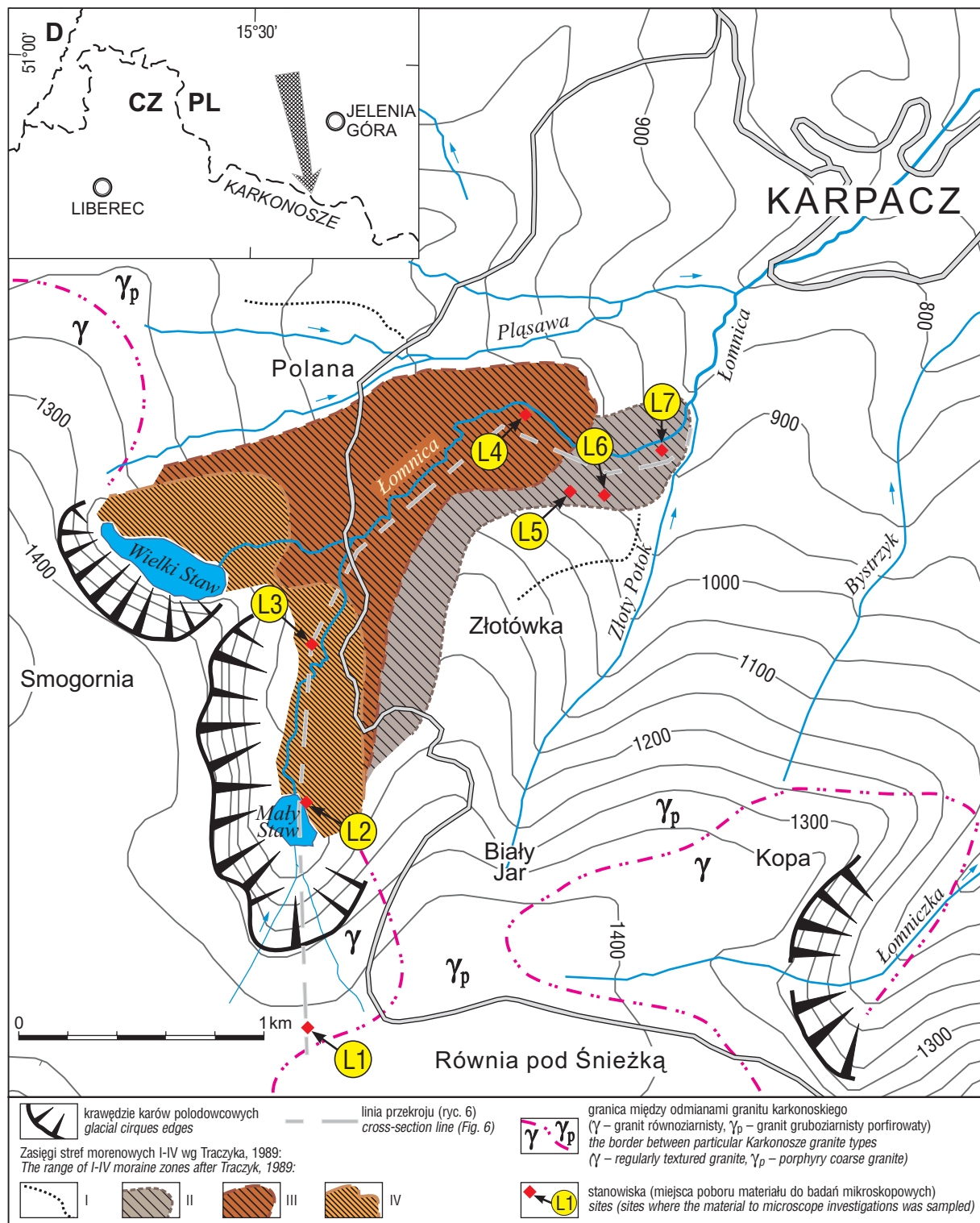
### Wyniki badań

Uzyskane wyniki pozwalają prześledzić zmiany charakteru mikrorzeźby powierzchni ziarn kwarcu wzdłuż biegu doliny Łomnicy – od stanowiska położonego najwyżej (L2) do najniższych moren (stanowisko L7) – a tym samym podjąć próbę odtworzenia warunków towarzyszących transportowi osadów w środowisku glacialnym. Porównanie materiału morenowego z próbką wzorcową (zwietrzelina *in situ* – L1) daje możliwość zapoznania się z rodzajem procesów niszczenia ziarn kwarcu i odpowiedzi na pytanie o wielokrotność cykli ich kruszenia.

Ziarna reprezentujące osady zwietrzelinowe (L1) miały średnio lub bardzo urozmaiconą mikrorzeźbę (*medium* lub *high relief*). Głównym procesem modelującym ich powierzchnię było wietrzenie chemiczne, zaznaczające się zarówno w formie intensywnego trawienia, jak i oskorupiania glinokrzemianami. Efektem trawienia jest zaokrąglenie krawędzi i naroży ziarn oraz powstanie mikrostruktur określanych jako *dissolution surface* (ryc. 2A). Tego typu powierzchnie obserwowane były na wszystkich badanych ziarnach (tab. 2). Proces ten jest odpowiedzialny również za powstanie mikroform typu *solution pits*, *solution crevasses* oraz *oriented each pits*.

Mechaniczne niszczenie powierzchni ziarn pochodzących ze zwietrzliny *in situ* zaznaczyło się przede wszystkim w formie dużych (> 10 µm), słabo urzeźbionych przełamów muszlowych (*conchoidal fractures*) lub *fracture faces* (tab. 2). Powierzchnia większości z nich była oskorupiona. Należy również zwrócić uwagę na obecność w próbce L1 mikrostruktur typu *breakage blocks* (zarówno > 10 µm, jak i < 10 µm) oraz małych przełamów muszlowych (*conchoidal fractures* < 10 µm) (tab. 2, ryc. 2B).

Na powierzchni ziarn reprezentujących osady glacialne z doliny Łomnicy widoczne są efekty działania dwóch

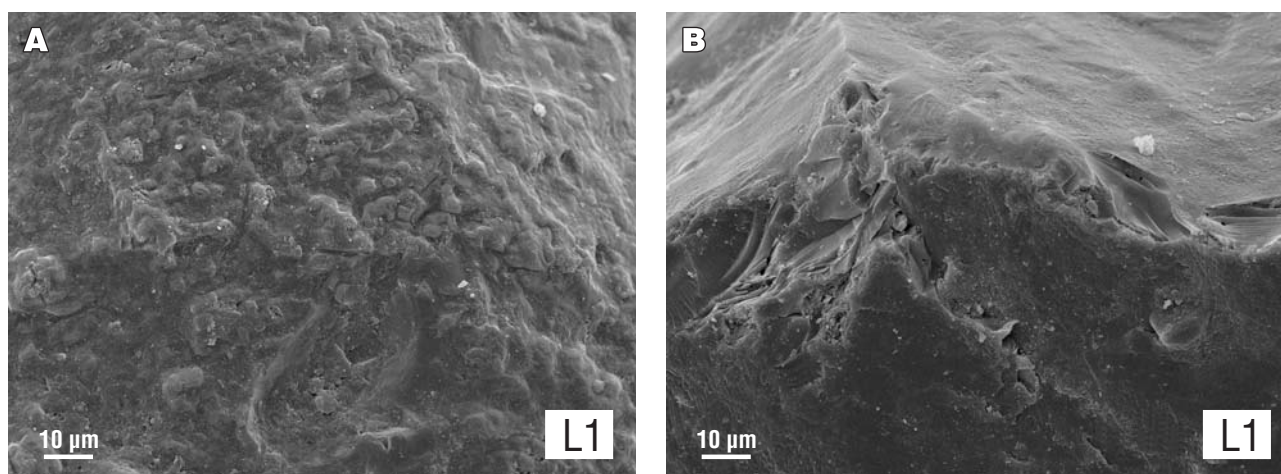


Ryc. 1. Położenie stanowisk badawczych w dolinie Łomnicy  
 Fig. 1. Location of study sites in the Łomnica Valley

procesów: wietrzenia chemicznego i niszczenia mechanicznego. Od ziarn pochodzących z osadów zwietrzelinowych (L1) odróżnia je przede wszystkim większa częstotliwość występowania mikrostruktur abrazyjnych. Ziarna z *high frequency fractures* stanowiły od 61% (L5) do 100% (L7), podczas gdy ich udział na stanowisku L1 wynosił maksymalnie 45% (tab. 2).

Wśród mikrostruktur związanych z mechanicznym niszczeniem ziarn dominowały duże przełamy muszlowe (*conchoidal fractures* > 10  $\mu\text{m}$ ) (ryc. 3A–B). Na ich po-

wierzchni odnotowano obecność mikroform typu *linear steps* (ryc. 3C) oraz *subparallel linear fractures* (ryc. 3D). Ten ostatni rodzaj mikroform uważany jest za element diagnostyczny utworów środowisk glacialnych (Tulaczyk i in., 1998; Mahaney, 2002; Evans & Benn, 2004; Rose & Hart, 2008). Podobne znaczenie ma również mikrostruktura typu *chattermarks* (ryc. 3E), której pochodzenie związane jest z procesami formującymi gliny typu *lodgement* (Mahaney, 2002). W przypadku materiału z doliny Łomnicy były one widoczne na powierzchni stosunkowo dużej liczby ziarn,



Ryc. 2. Stanowisko L1 (osady zwietrzelinowe z Równi pod Śnieżką): A – fragment powierzchni ziarna kwarcu typu *dissolution surface*; B – mikrostruktura typu *breakage blocks* widoczna na krawędzi

Fig. 2. The L1 site (weathered deposits from the Karkonosze Mountains): A – the fragment of quartz grain with dissolution surface; B – breakage blocks microstructure visible on the corner of quartz grain

Tab. 1. Charakterystyka stanowisk w dolinie Łomnicy, z których pobierano próbki materiału do badań mikromorfologii powierzchni ziarn kwarcu

Table 1. The characteristics of sites where the material to the investigation of micromorphology of quartz grain surfaces was sampled

Stanowisko <i>Test site</i>	H [m n.p.m] <i>Altitude [m a.s.l.]</i>	Strefa morenowa <i>Morainic zone</i>	Położenie morfologiczne <i>Morphologic situation</i>
L1	1416	–	Wierchowina Karkonoszy <i>Summit plateau of the Karkonosze Mts.</i>
L2	1188	IV	Morena czołowa przy Małym Stawie <i>Terminal moraine near Mały Staw Lake</i>
L3	1135	IV	Morena czołowa przy Domku Myśliwskim <i>Terminal moraine near Domek Myśliwski shelter</i>
L4	997	III	Rozcięcie erozyjne moreny czołowej <i>Erosional cutting of the terminal moraine</i>
L5	969	II	Rozcięcie pokrywy morenowej (strefa moreny bocznej) <i>Gully in the moranic cover (zone of the lateral moraine)</i>
L6	948	II	Rozcięcie pokrywy morenowej (strefa moreny bocznej) <i>Gully in the moranic cover (zone of the lateral moraine)</i>
L7	901	II	Rozcięcie erozyjne moreny czołowej <i>Erosional cutting of the terminal moraine</i>

tj. od 15% (L2) do 35% (L4, L7), jednak występowały tylko w postaci pojedynczych nacięć. Na stanowiskach L5 i L6 większość dużych przełamów muszlowych była słabo urzeźbiona, w przeciwieństwie do analogicznych mikroform na ziarnach z pozostałych stanowisk.

Ważna z interpretacyjnego punktu widzenia jest również obecność w badanym materiale ziarn, na powierzchni których występują małe przełamy muszlowe (*conchoidal fractures* < 10 µm) widoczne przede wszystkim na krawędziach i wypukłych fragmentach ziarn (ryc. 3F). Zazwyczaj z tymi mikrostrukturami związane są formy określane jako *arc-shaped steps*. Ponadto obserwowano pojedyncze mikrostruktury będące efektem rycia jednego ziarna drugim (*straight* i *curved grooves* oraz *deep troughs*) (tab. 2). Generalnie największą częstotliwość występowania mikrostruktur związanych z mechanicznym niszczeniem zanotowano na ziarnach ze stanowisk L2 i L7.

Na powierzchni analizowanych ziarn widoczne były również powstałe w wyniku wietrzenia chemicznego formy typu *dissolution surface* i oskorupienia (*amorphous ppt.*). Powszechnie występowały także mikroformy określane jako *preweathered surface*, które w literaturze opisywane są jako elementy charakterystyczne dla osadów śro-

dowiska glacialnego (Mahoney, 2002). W punkcie L4 trawienie powierzchni ziarn spowodowało powstanie obłych, bulwiastych mikrowypukłości. Ten typ mikroform nie był obserwowany na pozostałych stanowiskach.

Stopień oskorupienia powierzchni ziarn na poszczególnych stanowiskach nie był jednakowy. Najbardziej oskorupione były ziarna ze stanowisk L5 i L6, natomiast najmniej z moren na stanowiskach L2, L3, L4 oraz L7. Znamienne jest to, że część mikrostruktur będących efektem mechanicznego niszczenia powierzchni ziarn była oskorupiona. Szczególnie dobrze było to widoczne na ziarnach ze stanowisk L2 i L3.

### Dyskusja rezultatów badań

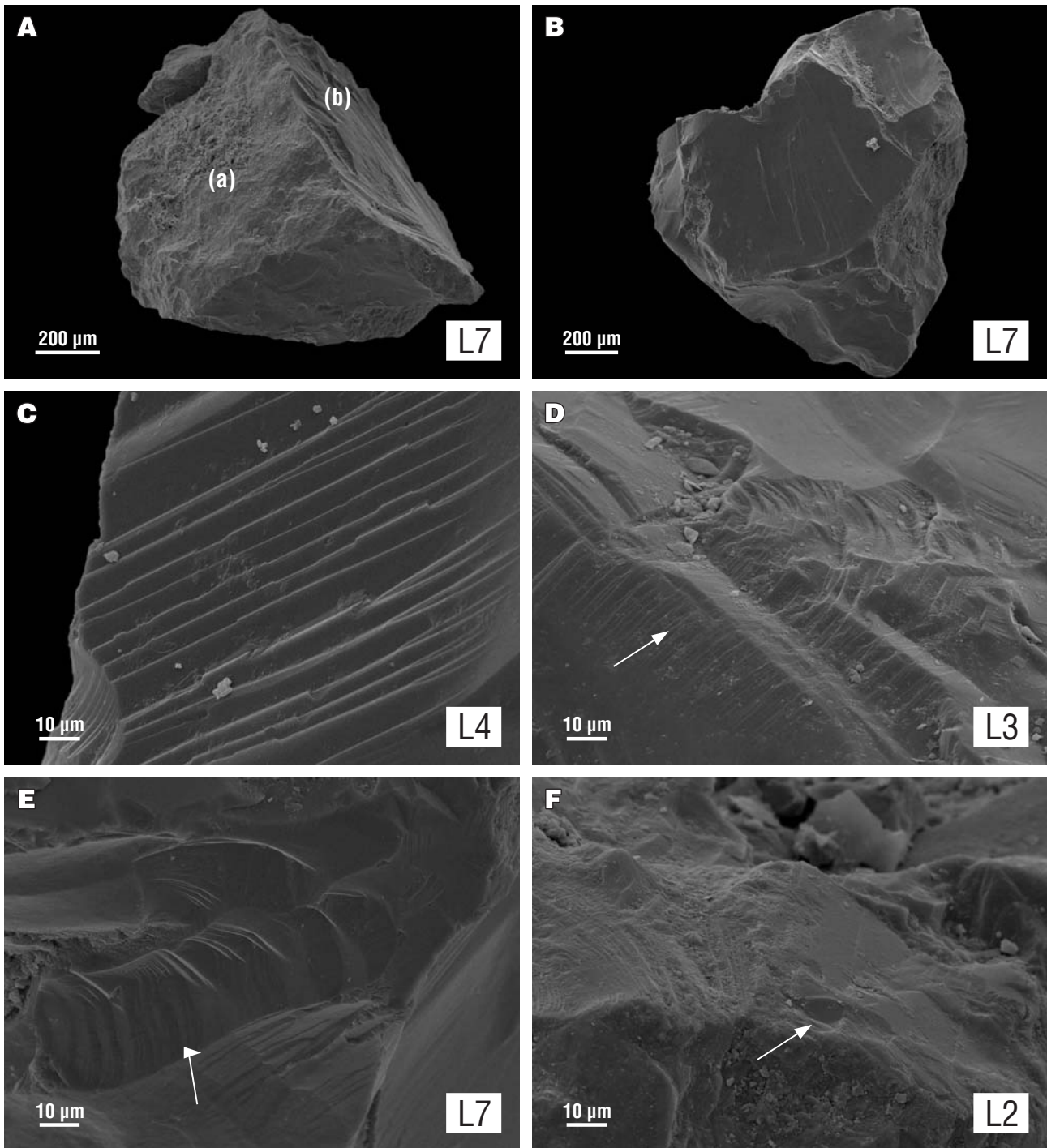
Materiał budujący osady glacialne w dolinie Łomnicy pochodził ze wczesnoplejstocęńskich bądź jeszcze starszych zwietrzelin granitu. Stąd w materiale morenowym obecność ziarn, których powierzchnie były modelowane głównie przez intensywne wietrzenie chemiczne (ryc. 4A). W środowisku glacialnym ziarna te podlegały intensywnemu niszczeniu mechanicznemu, dlatego też powierzchnie związane z wietrzeniem chemicznym widoczne są często

**Tab. 2. Zbiorczy wykres częstości pojawiania się mikrostruktur na powierzchni ziarn kwarcowych pochodzących ze zwietrzeli in situ (L1) i z osadów glacialnych z doliny Łomnicy (L2–L7)**

Table 2. Summary graph of the frequency of the microstructures occurrence on the quartz grain surfaces from the in situ waste deposits (L1) and glacial deposits from the Łomnica Valley (L2–L7)

typ mikrostruktury / type of structure	próbka / sample						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
slabo urzeźbiona mikrorzeźba / low relief			○		○	○	○
średnio urzeźbiona mikrorzeźba / medium relief	●	●	●	●	●	●	●
bardzo urzeźbiona mikrorzeźba / high relief	●	○	●	●	○	●	●
wysoka częstotliwość mikrostruktur abrazyjnych / high frequency fractures	●	●	●	●	●	●	●
niska częstotliwość mikrostruktur abrazyjnych / low frequency fractures	●	●	○	○	○	○	
obtoczone krawędzie / edge rounding	●	○	●	●	●	●	●
ostre krawędzie / sharp features	○	●	●	●	●	●	●
mikrostruktury abrazyjne będące efektem wietrzenia in situ / abrasion fatigues	●	●		○	○	○	
mikrostruktury abrazyjne / abrasion features	●	●	●	●	●	●	●
świeże powierzchnie / fresh surface	●	●	●	●	●	●	●
oskorupiona powierzchnia / amorphous ppt.	●	○	○	●	●	●	●
powierzchnia będąca efektem trawienia / dissolution surface	●	○	○	○	○	○	●
gładka powierzchnia powstała na skutek trawienia / dulled surface							
kwarc regeneracyjny / quartz overgrowth			●		○		
zorientowane formy punktowe powstałe w efekcie trawienia / oriented etch pits	●		●	○		○	○
rowki będące efektem trawienia / solution crevasses	●	○	○	●			○
punktowe mikroformy będące efektem trawienia / solution pits	●	●	○	○	○	○	●
mikrostruktury związane z defektami w sieci krystalograficznej kwarcu / lattice shattering	●		○	●	○		
ostrokrawędziste łukowate mikrostopnie / arc-shaped steps	●	○	●	○	●	○	○
blokowe mikrostruktury (<0,010mm) / breakage blocks (<0,010mm)	○	●	○	●	○	○	○
blokowe mikrostruktury (>0,010mm) / breakage blocks (>0,010mm)	●	○	●	●	○	○	○
karbowane nacięcia / chattermarks	●	○	○	○	○	○	○
przełamy muszlowe (<0,010mm) / conchoidal fractures (<0,010mm)	○	○	○	○	○	○	○
przełamy muszlowe (>0,010mm) / conchoidal fractures (>0,010mm)	○	○	○	○	○	○	○
płaskie powierzchnie będące efektem niszczenia mechanicznego / fracture faces	○	○	○	○	○	○	○
linijne ostrokrawędziste mikrostopnie / linear steps	○	○	○	○	○	○	○
ostrokrawędziste równoległe mikrostopnie / subparallel linear fractures	○	○	○	○	○	○	○
pojedyncze mikrostopnie / micro steps	○	○	○	○	○	○	○
równoległe mikrogrzbiety / parallel ridges	○	○	○	○	○	○	○
promieniści rozchodzące się mikrostopnie / radial fractures	○	○	○	○	○	○	○
zębate przełamy / sawtooth fractures		○	○	○	○	○	○
małe wybicia / craters		○	○	○	○		○
U-kształtne nacięcia / crescentic gouges							
V-kształtne nacięcia / V-shaped percussion cracks	○		○	○			○
nieregularne grzbiety powstałe w wyniku abrazyj eolicznej / mechanically upturned plates							
zaokrąglone krawędzie w wyniku abrazyj eolicznej / bulbous edges							
kręte mikrożłobki / curved grooves	○	○	○	○			○
głęboka mikrorzyna / deep trough		○	○	○	○	○	○
proste mikrożłobki / straight grooves		○	○	○	○	○	○
nieregularne obniżenie / irregular depressions	○	○	○	○	○	○	○
wydłużone obniżenie / elongated depressions	○						
przekształcona przez abrazyję powierzchnia uprzednio podlegająca wietrzeniu / preweathered surface	○	○	○	○	○	○	○
adhezyjne mikrocząsteczki / adhering particles	○	○	○	○	○	○	○

● >96%   ○ 81-95%   ● 66-80%   ○ 51-65%   ● 36-50%   ○ 21-35%   ○ 6-20%   ● 1-5%



**Ryc. 3.** Ziarna kwarcu reprezentujące osady glacialne: **A** – ziarno kwarcu o powierzchni typu *dissolution surface* (a) i świeżych przełamach muszlowych (b); **B** – ogólny widok ziarna kwarcu z widocznym przełamem muszlowym (*conchoidal fractures* > 10 μm) o słabo urozmaiconej mikrorzeźbie; **C** – *linear steps*; **D** – *subparallel linear fracture*; **E** – mikrostruktura typu *chattermark*; **F** – mały przełam muszlowy widoczny na krawędzi ziarna (*conchoidal fractures* > 10 μm) będący efektem abrazyj (prostokąt)

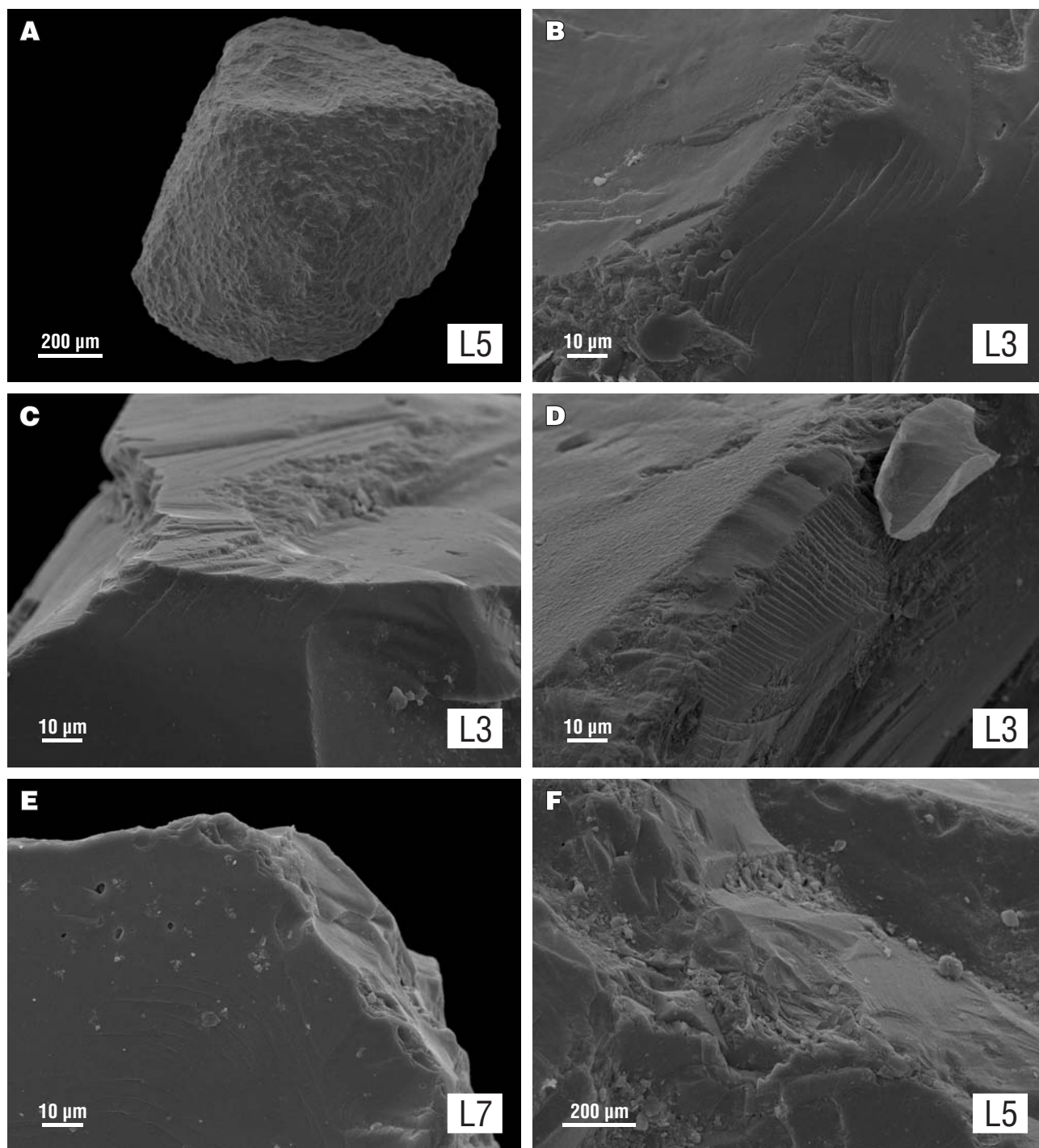
**Fig. 3.** Quartz grains from glacial deposits: **A** – quartz grain with dissolution surface (a) and fresh conchoidal fractures (b); **B** – general view of a quartz grain with low diversified microrelief conchoidal fractures (> 10 μm); **C** – linear steps; **D** – subparallel linear fracture; **E** – chattermark; **F** – small conchoidal fractures (> 10 μm) on the grain corner being the effect of abrasion (rectangle)

jedynie na krawędziach i stanowią swego rodzaju „ostańce” (ryc. 4B), które powstały w wyniku odłupywania dużych fragmentów ziarna.

W przypadku znacznej ilości ziarn ze stanowisk L2 i L3 obserwuje się oskorupienie części przełamów muszlowych, podczas gdy inne są całkowicie świeże. Może to wskazywać na kilkakrotne włączanie ziarn do transportu glacialnego. Każdy z etapów niszczenia w środowisku glacialnym przedzielony był okresem, w którym dominowało

wietrzenie chemiczne. Na powierzchni ziarn zapisana jest zatem następująca sekwencja zdarzeń: (1) kruszenie, (2) wietrzenie chemiczne, (3) kruszenie. Kanaori i in. (1985) stwierdzili, że powierzchnie świeże, w środowisku o niskiej agresywności chemicznej, mogą pozostawać nienaruszone nawet przez okres dziesiątek tysięcy lat.

Duży wpływ wietrzenia chemicznego (przejawiającego się najczęściej w formie oskorupiania) na charakter powierzchni ziarn kwarcu pochodzących ze stanowisk L5 i



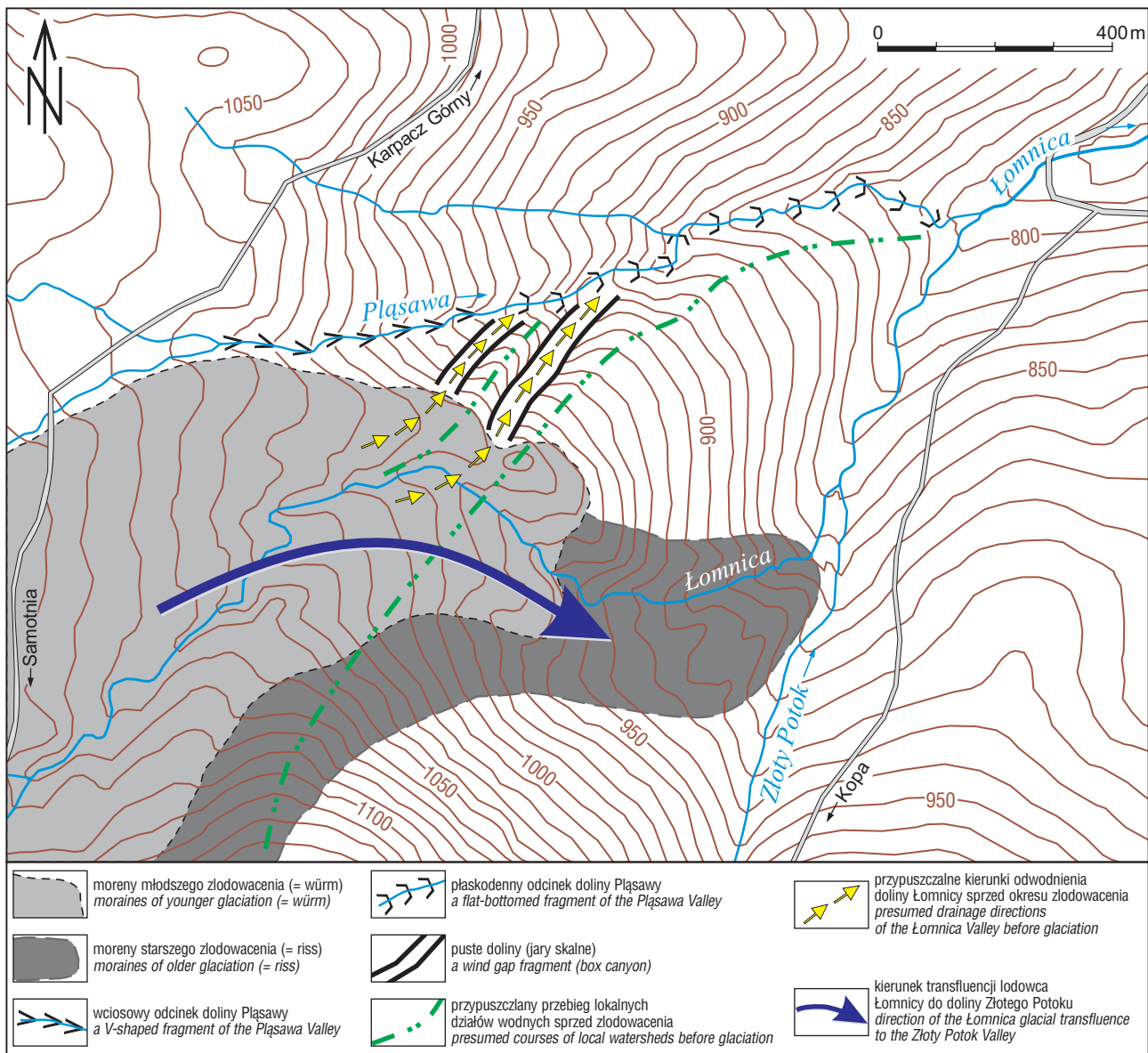
**Ryc. 4.** Ziarna kwarcu reprezentujące osady glacialne: **A** – ziarno kwarcu o powierzchni typu *dissolution surface*; **B** – fragment powierzchni ziarna kwarcu podlegającego niszczeniu mechanicznemu z zachowaną mikrorzeźbą, będącą efektem wietrzenia chemicznego widoczną jedynie na krawędzi; **C** – ostre krawędzie ziarna będące zapisem procesu kruszenia; **D**, **E** – abrazja widoczna na krawędzi ziarna w formie małych przełamów muszlowych (> 10 μm); **F** – mikrostruktura typu *breakage blocks*, będąca efektem wietrzenia mrozowego

**Fig. 4.** Quartz grains from glacial deposits: **A** – general view of quartz grain with dissolution surface; **B** – fragment of crushed quartz grain with chemical weathered surface preserved on the edges; **C** – sharp edges as an effect of crushing processes; **D**, **E** – small conchoidal fractures (> 10 μm) as an effect of abrasion; **F** – the breakage blocks microstructure as an effect of frost weathering

L6 może być wiązany z długością oddziaływania tegoż procesu bądź też z dużą dostawą materiału zwietrzelinowego. Pierwszą hipotezę potwierdzałyby fakt, że wyżej wymienione stanowiska zlokalizowane są w II strefie morenowej (ryc. 1), korelowanej z zlodowaczeniem starszym (= odry?) (Traczyk, 1989).

Hipotezę znacznej dostawy materiału zwietrzelinowego w dolnej części jezora lodowcowego można by natomiast wiązać ze zjawiskiem transfluencji lodowca

Łomnicy do doliny Złotego Potoku. W okresie przed zlodowaczeniem Łomnica i jej dopływy miały inny przebieg niż obecnie (Traczyk, 1987). Łomnica spływała w kierunku NE, do dzisiejszej doliny Płasawy (ryc. 5). Wskazuje na to obecność głębokich, suchych jarów skalnych w dolinie Płasawy, które są zabarykadowane od strony południowej przez moreny boczne lodowca Łomnicy. Obecność tych „kopalnych” jarów oraz współczesny przebieg koryta Łomnicy pozwalają sądzić, że w okresie zlodowaczenia



**Ryc. 5.** Schemat plejstocenijskich zmian hydrograficznych w dolinie Łomnicy  
**Fig. 5.** Diagram of hydrographic changes in the Łomnica Valley

starszego doszło do przelania się (transfluencji) lodowca Łomnicy przez lokalny dział wodny do doliny Złotego Potoku. W trakcie tego procesu dochodzić mogło do egzaracji podłoża podlodowcowego w strefie dawnego działu wodnego, a w efekcie do dostawy świeżego materiału zwietrzelinowego. Materiał ten, włączony w obręb moren, nie podlegał długiemu transportowi. Dlatego też większość przełamów muszlowych obecnych na ziarnach pobranych na stanowiskach L5 i L6 była, podobnie jak to jest w przypadku materiału zwietrzelinowego (stanowisko L1), słabo urzeźbiona.

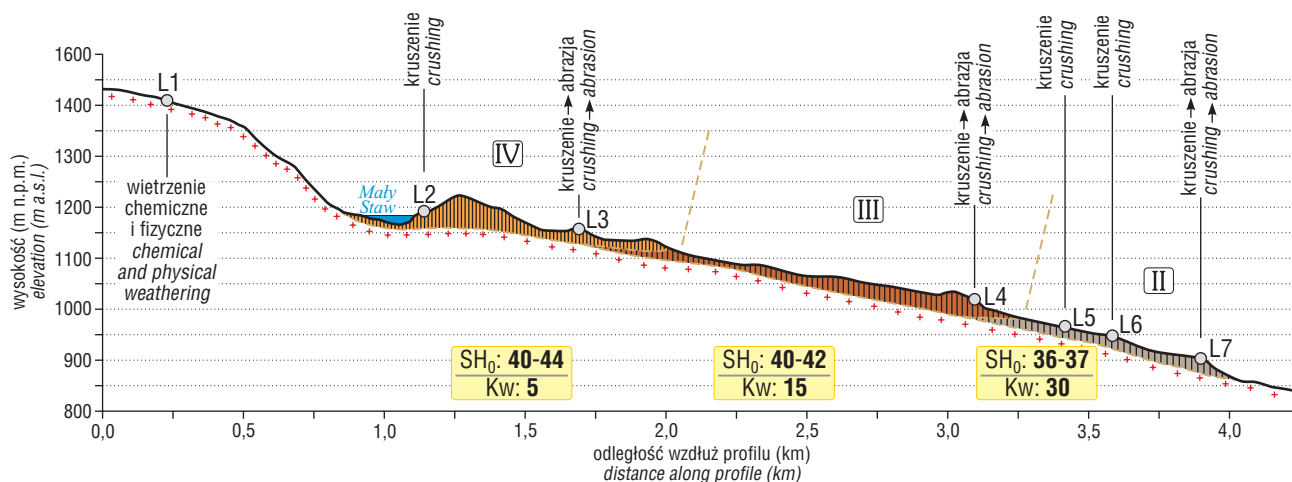
Lodowiec w dolinie Łomnicy transportował materiał zarówno w strefie supra-, in-, jak i subglacjalnej. Wniosek ten wynika z obecności na powierzchni ziarn mikrostruktur powstałych w czasie transportu w środowisku glacialnym, świadczących o kruszeniu i abrazji oraz będących efektem postępującego wietrzenia *in situ* otaczających skał. Proces kruszenia zaznacza się w formie dużych przełamów muszlowych (Tulaczyk i in., 1998; Rose & Hart, 2008) oraz ostrych krawędzi i naroży (ryc. 4C), natomiast efektem abrazji są m.in. małe przełamy muszlowe (< 10 μm)

widoczne na krawędziach oraz obecność form *arc-shaped steps* (ryc. 4D–E) (Kransley & Takahashi, 1962). Te ostatnie mikrostruktury powstają w czasie rotacji lub ślizgania się ziarn (Rose & Hart, 2008) oraz wskutek niszczenia mostków złożonych z kilku ziarn ustawionych w jednej linii. Procesy te prowadzą do zaokrąglania krawędzi, przez co ziarna przybierają bardziej izometryczny kształt (Rose & Hart, 2008). Według Sharpa i Gomeza (1986) abrazyjnie zaokrąglone krawędzie są jedyną cechą odróżniającą transport w środowisku sub- i supraglacjalnym.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sadzić, że w lodowcu Łomnicy, który przesuwiał się w dół doliny, procesy kruszenia i abrazji nie były jednakowo intensywne. Podobnie było z egzaracją osadów podłoża. W punkcie L2, położonym najwyżej spośród badanych stanowisk morenowych (1188 m n.p.m.), dominowało przede wszystkim kruszenie ziarn. Nie jest jednak wykluczone, że w strefie tej następowała dostawa świeżego materiału zwietrzelinowego z niszczonych ścian skalnych karu lodowcowego.

W niższej położonych stanowiskach L3 i L4 (odpowiednio 1135 i 997 m n.p.m.) ostre krawędzie przełamów były





**Ryc. 6.** Zróznicowanie procesów modelujących materiał kwarcowy w dolinie Łomnicy: 1–7 – stanowiska poboru próbek (stanowiska 4–7 są rzutowane na linię przekroju); II–IV – strefy morenowe (por. ryc. 1); SH<sub>0</sub> – wartość maksymalna odboju młotkiem Schmidta (pomiar wykonywany na powierzchniach zeszlifowanych mechanicznie); Kw – grubość kory wietrzeniowej mierzona w przekrojach głazów i bloków morenowych

**Fig. 6.** Differentiation of processes modelling the quartz material in the Łomnica Valley: 1–7 – sampling points (points 1–7 are projected on cross-section line); II–IV – moraine zones (see Fig. 1); SH<sub>0</sub> – maximum value of Schmidt hammer rebound (measures taken on the mechanically polished surface); Kw – the thickness of weathered crust measured on the cross-sections of boulders and moraine blocks

modelowane przez abrazję. Ponadto wszelkie mikrostruktury związane z niszczeniem mechanicznym wykazują wyjątkowo dużą świeżość. W punktach L5 i L6 ponownie dominowało kruszenie, a abrazja, widoczna w formie pojedynczych małych przełamów muszlowych (< 10 μm), spowodowała przeobrażenie niewielkiej (kilkuprocentowej) populacji ziarn (ryc. 6).

Na najniższym położonym stanowisku L7 ponownie proces kruszenia był uzupełniany abrazją. Znaczny udział mikrostruktur powstałych w wyniku kruszenia oraz znikoma zawartość frakcji ilastej w osadzie mogą wskazywać, że ciśnienie wody porowej w strefie subglacjalnej nie było duże, a co za tym idzie – drenaż wody mógł być efektywny. W tych warunkach dominowały procesy kruchej ścinania (*brittle shear*) (Mahaney, 1995). Należy brać również pod uwagę fakt, że część dużych przełamów muszlowych (< 10 μm) mogła być efektem wietrzenia w warunkach nieglacjalnych (Gomez i in., 1988), a transport materiału odbywał się w strefie supraglacjalnej. Za taką interpretacją przemawia obecność podobnych mikrostruktur w próbce pochodzącej ze zwietrzliny *in situ* (stanowisko L1). Z drugiej jednak strony proces abrazji świadczy o tym, że dochodziło do znaczącego wzrostu ciśnienia wody porowej oraz deformacji plastycznych (*ductile shear*) (Mahaney, 1995). Wpływ na to miał zapewne charakter transportowanych osadów.

W warunkach transportu osadów gruboziarnistych, składających się z dużych odłamków skalnych, dochodziło najprawdopodobniej głównie do kruszenia. Z badań osadów transportowanych przez lodowce górskie przeprowadzonych przez Owena i in. (2003) wynika, że zawartość frakcji pylastej jest w nich zmienna i zazwyczaj bardzo niska. W przypadku lodowca, który wypełniał dolinę Łomnicy, wzrost udziału frakcji drobnoziarnistych w osadzie mógł być związany z egzaracją wychodni bardziej drobnoziarnistych odmian granitu lub jego zwietrzelin. Możliwe jest, że za ten wzrost odpowiedzialne są też same procesy obróbki zachodzącej w środowisku glacialnym. W strefach, w których w transportowanych osadach obser-

wowany jest wzrost udziału frakcji najdrobniejszych, proces kruszenia mógł być wspomagany przez abrazję. W opinii wielu badaczy abrazja jest ważnym czynnikiem, odpowiedzialna jest m.in. za produkcję frakcji pylastej w środowisku glacialnym (Iverson, 1990; Owen i in., 2003).

Niewątpliwie duże znaczenie miało wietrzenie mrozo- we, którego ślady zaznaczyły się na powierzchni wielu ziarn. W jego wyniku na ziarnach powstały prawdopodobnie mikrostruktury typu *fracture faces* i *breakage blocks* (< 10 μm) (ryc. 4F) (Hoch & Woronko, 2007). Obecność tych ostatnich mikrostruktur jest przez część badaczy wiązana jednak z procesami niszczenia w strefie ściec, które powstają w strefie bazalnej lodowców (Gomez & Small, 1983).

## Podsumowanie

Wyniki badań mikromorfologii powierzchni ziarn kwarcu wskazują, że w III i IV strefie morenowej ziarna te podlegały głównie procesom abrazji w środowisku glacialnym. Jedynie w przypadku materiału pobranego z moreny grodzącej misę Małego Stawu wykazywały one oprócz cech abrazyjnych również ślady kruszenia. W materiale pobranym z moren należących do strefy II przeważały natomiast mikrostruktury powstające w efekcie kruszenia, a elementy związane z procesami abrazji były słabo wykształcone. Charakterystyczną cechą tego materiału było także stosunkowo silne oskorupienie powierzchni ziarn oraz obecność dużych przełamów wskazujących na działanie postsedymentacyjnych procesów wietrzenia mrozo- wego.

Analizy wyników omówionych badań pozwala stwierdzić, że między materiałem pochodzącym ze strefy II a materiałem ze stref III i IV istnieją pewne istotne różnice mikrostrukturalne. Ziarna ze strefy II przeszły kilka etapów – niszczenie w środowisku glacialnym, następnie wietrzenie chemiczne i mrozo- we. Znamiennie jest również to, że badania młotkiem Schmidta (Engel i in., 2008) wykazały wyraźne różnice odboju (związanego ze stopniem zwietrzenia) dla materiału skalnego budującego moreny II i III strefy.

Przedstawione fakty potwierdzają wcześniejszą hipotezę o co najmniej dwukrotnym rozwoju lodowca w dolinie Łomnicy (Traczyk, 1989). Zgodnie z nią można przyjąć, że moreny strefy II powstały podczas starszego zlodowacenia (warty), natomiast wały morenowe wchodzące w skład stref III i IV zostały uformowane w starszej i młodszej fazie najmłodszego zlodowacenia (wisły).

Pewne odstępstwa, dotyczące wykształcenia i stopnia zwietrzenia materiału ziarnowego w transekcje wierzcho-wina – dno karu polodowcowego – dolna część doliny zlodowaczonej, można wytłumaczyć położeniem stanowisk badawczych oraz miejscem poboru materiału mineralnego. Nie wszystkie stanowiska położone były w obrębie wałów moren czołowych. Dwa spośród nich (L5 i L6) obejmowały brzezną partię strefy akumulacji lodowcowej (moreny boczne). W jej obrębie, zapewne ze względu na słabszą dynamikę lodu lodowcowego, procesy modelacji materiału mineralnego przebiegały z mniejszym nasileniem niż w partiach osiowych lodowca, w których transportowany był materiał formujący obecnie wały moren czołowych.

Prace wykonano w ramach projektu *Glaciální, periglaciální a paleoekologické doklady vývoje krajiny Krkonoš* (Grantová agentura České republiky 205/06/0587). Badania terenowe finansowane były z grantu 1015/W/IGRR/2008 Uniwersytetu Wrocławskiego.

## Literatura

- CHMAL H. & TRACZYK A. 1998 – Postglacialny rozwój rzeźby Karkonoszy i Gór Izerskich w świetle analizy osadów rzecznych, jeziornych i stokowych. [W:] Sarosiek J. & Štursa J. (red.), Geoekologiczne Problemy Karkonoszy. Materiały z sesji naukowej w Prziesie, 15–18.X.1997, tom I: 81–87. Wyd. Acarus, Poznań.
- CHMAL H. & TRACZYK A. 1999 – Die Vergletscherung des Riesengebirges. Zeitschrift für Geomorphologie N. F., Suppl. Bd., 113: 11–17.
- CLARK P.U. 1989 – Relative differences between glacially crushed quartz transported by mountain and continental ice – some examples from North America and East Africa: Discussion. American Journal of Science, 289: 1195–1205.
- CZEKAJ K. 2006 – Procesy kruszenia ziarn kwarcu w środowisku glacialnym i fluwioglacialnym. WGiSR, UW (maszynopis pracy magisterskiej).
- DUMANOWSKI B. 1961 – Cover deposits of the Karkonosze Mountains. Zesz. Nauk. Uniw. Wrocław, Nauka o Ziemi, 5: 31–55.
- ENGEL Z. 1997 – Současný stav poznatků o pleistocenním zalednění české části Krkonoš. Geografie. Sborn. České Geogr. Spol., 102: 288–300.
- ENGEL Z. 2007 – Late Pleistocene glaciations in the Krkonoše Mountains. [W:] Goudie A.S. & Kalvoda J. (red.) Geomorphological Variations. P3K Publishers, Praha: 269–286.
- ENGEL Z., JANKOVSKÁ V., KRÍŽEK M. & TREML V. 2007 – Doklady vývoje Labského dolu v pozdním glaciálu a holocénu. Opera corcontica, 44: 223–227.
- ENGEL Z., KRÍŽEK M., NÝVLT D., TRACZYK A. & TREML V. 2008 – Nowe dane o zlodowaczeniu Karkonoszy na podstawie badań w dolinie Łaby, Upy i Łomnicy. Landform Analysis, 9: 111–114.
- EVANS D.J. & BENN D.I. 2004 – A practical guide to the study of glacial sediments. Edward Arnold Publishers, London.
- GOMEZ B., DOWDESWELL J.A. & SHARP M. 1988 – Microstructural control of quartz sand grain shape and texture: implication for discrimination of debris transport pathways through glaciers. Sediment. Geol., 57: 119–129.
- GOMEZ B. & SMALL R.J. 1983 – Genesis of englacial debris within the Lower Glacier de Tsijdiore Nouvelle, Valais, Switzerland, as revealed scanning electron microscope. Geografiska Annaler, 65: 45–51.
- HELLAND P.E. & HOLMES M.A. 1997 – Surface textural analysis of quartz sand grains from ODP Site 918 of the southeast coast of Greenland suggests glaciation of southern Greenland at 11 Ma. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 135: 109–121.
- HOCH M. & WORONKO B. 2007 – Mikromorfologia powierzchni ziarn kwarcowych frakcji piaszczystej podlegających wietrzeniu mrozowemu – wstępne wyniki badań. [W:] Smolska E. & Giriat D. (red.). Rekonstrukcja dynamiki procesów geomorfologicznych – formy, rzeźby i osady: 217–231.
- IVERSON N.R. 1990 – Laboratory simulations of glacial abrasion: comparison with theory. Jour. Glaciol., 36: 304–314.
- JAHN A. 1960 – Czwartorzęd Sudetów [W:] M. Książkiewicz (red.). Regionalna geologia Polski, Tom III, Sudety, z. 2, Tworzy trzeciorzędowe i czwartorzędowe oraz pogląd na rozwój budowy geologicznej Sudetów. Polskie Tow. Geol., Kraków.
- JAHN A. 1962 – Geneza skałek granitowych. Czas. Geogr., 33: 19–44.
- KANAORI Y., TANAKA K. & MIYAKOSHI K. 1985 – Further studies on the use of quartz grains from fault gouges to establish the age of faulting. Engineering Geology, 21: 175–194.
- KRINSLEY D.H. & DOORNKAMP J.C. 1973 – Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge Univ. Press.
- KRINSLEY D.H. & TAKAHASHI T. 1962 – The surface textures of sand grains: an application of electron microscopy: glaciation. Science, 138: 1262–1264.
- LINDNER L. 2009 – Problemy ilości i wieku czwartorzędowych zlodowaceń górskich w Polsce [W:] Kostrzewski A. & Paluszkiwicz R. Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych. Seria Geografia, 88: 245–262.
- ŁOZIŃSKI W. 1910 – Karkonosze a Tatry. Pamiętnik Towarzystwa Tatrzańskiego, 31: 84–93.
- MAHANEY W.C. 1995 – Pleistocene and Holocene glacier thicknesses and/or transport histories inferred from microtextures and quartz particles. Boreas, 24: 293–304.
- MAHANEY W.C. 2002 – Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford Univ. Press.
- MAHANEY W.C. & KALM V. 1995 – Scanning electron microscopy of Pleistocene tills in Estonia. Boreas, 24: 13–29.
- MIGOŃ P. 1993 – Kopałowe wzgórza granitowe w Kotlinie Jeleniogórskiej. Czas. Geogr., 64: 3–22.
- MIGOŃ P. & CZERWIŃSKI J. 1995 – Problem wieku zwietrzelin granitowych Masywu Karkonosko-Izerskiego w Sudetach Zachodnich. Acta Univ. Wratisl. 1702, Prace Inst. Geogr. Seria A, Geografia Fizyczna, 7: 19–26.
- MYCIELSKA-DOWGIAŁŁO E. 1978 – A scanning electron microscope study of quartz grain surface textures from boulder clays of North and Central Poland. [W:] Whalley W.B. (red.) Scanning Electron Microscopy in the study of sediments.
- OWEN L.A., DEBRYSHIRE E. & SCOTT C.H. 2003 – Contemporary sediment production and transfer in high-altitude glacier. Sediment. Geol., 155: 13–36.
- PARTSCH J. 1894 – Die Vergletscherung des Riesengebirges zur Eiszeit. Stuttgart.
- ROSE K.C. & HART J.K. 2008 – Subglacial comminution in the deforming bed: Inferences from SEM analysis. Sediment. Geol., 203: 87–97.
- SHARP M. & GOMEZ B. 1986 – Processes of debris comminution in the glacial environment and implication for quartz sand grain micromorphology. Sediment. Geol., 46: 33–47.
- SZAŁAMACHA M. 1957 – Szczegółowa mapa geologiczna Sudetów w skali 1 : 25000, arkusz Sosnowka. Wyd. Geol., Warszawa.
- TRACZYK A. 1987 – Dolina Pławy – przykład zmian hydrograficznych we Wschodnich Karkonoszach. Karkonosz – Materiały Krajoznawcze Stud. Koła Przew. Sudeckich Oddz. Akad. PTTK we Wrocławiu, 3: 13–17.
- TRACZYK A. 1989 – Zlodowacenie doliny Łomnicy w Karkonoszach oraz poglądy na ilość zlodowaceń plejstocennych w średnich górach Europy. Czas. Geogr., 60: 267–286.
- TULACZYK S., KAMB B., SCHIERER R.P. & ENGELHARDT H.F. 1998 – Sedimentary processes at the base of a West Antarctic Ice Stream: constraints from textural and compositional properties of subglacial debris. Jour. of Sediment. Research, 68: 487–496.
- WORONKO B. & DERKACZ M. 2008 – Mikromorfologia powierzchni ziarn kwarcowych budujących moreny w Dolinie Suchej Wody i w Dolinie Pańszczyzy (Tatry). XV Konferencja Stratygrafia Plejstocenu Polski pt. Plejstocen Tatr i Podhala – zlodowacenia tatrzańskie. Zakopane, 1–5 września 2008.

Praca wpłynęła do redakcji 15.10.2009 r.  
Po recenzji akceptowano do druku 24.05.2010 r.