

STRUKTURY KOMÓRKOWE W OBRĘBIE PIASKOWCÓW MAGURSKICH NA PRZYKŁADZIE DIABELSKICH ŚCIAN (PASMO JAWORZYNY KRYNICKIEJ)

**Cellular structures in the Magura sandstones –
an example from the Devil’s Wall (the Jaworzyna Krynicka Range)**

Alicja KICIŃSKA

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Geologii Ogólnej, Ochrony Środowiska i Geoturystyki;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: kicinska@geol.agh.edu.pl*

Treść: Na powierzchniach ambon gruboławicowych piaskowców magurskich widoczne są owalne, eliptyczne wgłębienia i pustki. Genezy ich należy upatrywać w selektywnym wietrzeniu i suffozyjnym wymywaniu zwietrzałego materiału skalnego przez wody z przestrzeni międzyławicowych. Na podstawie analizy pobranych prób wykazano różnicę składu mineralnego badanych skał – dotyczącą głównie występowania gipsu, jak również określono zawartości pierwiastków w poszczególnych częściach Diabelskich Ścian – formy skalnej w paśmie Jaworzyny Krynickiej w Beskidzie Sądeckim. Zasadniczym czynnikiem mającym wpływ na miejsce tworzenia się tych form jest przyszczytowe położenie ambony i filtracja wód opadowych przez grubo- i średnioziarnisty materiał skalny, spękany szczelinami pionowymi. Zanieczyszczenie środowiska, w tym powietrza głównie przez tlenki siarki i azotu, prowadzi do wietrzenia solnego i powstawania nowych minerałów (gipsu), których krystalizacja może być katalizatorem mechanicznego wietrzenia. Geometria pustek wynika z uławicenia ambony i właściwości fizycznych dominujących w składzie minerałów (głównie kwarcu).

Słowa kluczowe: struktury komórkowe, wietrzenie selektywne, gruboławicowe piaskowce magurskie

Abstract: On the walls of rock pulpits built of thick-bedded sandstones belonging to the Magura Unit and located in the Jaworzyna Krynicka Range (the Beskid Sądecki Mts) one can observe oval and elliptical cavities, and open spaces. These forms originate from selective weathering and suffosional washout of weathered detrital material from interbedding planes. In studied samples the differences were demonstrated in mineral composition of rocks, mostly the presence of gypsum. Moreover, contents of selected elements were determined in selected parts of the Devil’s Rocks. The main factor controlling the formation of rock pulpits is their location close to the summit supported by infiltration of meteoric waters through coarse- and medium-grained sandstones cut by vertical fissures. Environment pollution, especially the presence of sulphur and nitrogen oxides in the atmosphere, results in salt weathering caused by precipitation of new minerals (gypsum), which may facilitate disintegration of rock structure. Geometry of cavities is controlled by the bedding of rocks and the physical properties of dominating minerals (mostly quartz).

Key words: cellular structures, selective erosion, thick-bedded sandstones of the Magura Beds

WSTĘP

Diabelskie Ściany, zwane też Czarcimi Ścianami, są zatwierdzonym w 1990 roku pomnikiem przyrody nieożywionej znajdującym się nieopodal wsi Barnowiec w paśmie Jaworzyny Krynickiej (Fig. 1).

Z geomorfologicznego punktu widzenia są to wysokie, ok. 25-metrowe ambony skalne (Fig. 2), złączone swoją podstawą i bokami ze zboczem wzgórza (Alexandrowicz 1978, 1996, Czarnowski 1964). Zobaczyć je można, skręcając ze szlaku wiodącego ze Składzistego na Halę Łabowską, znajdują się na wysokości ok. 1031 m n.p.m., w położeniu współrzędnych GPS 49° 28' 99,5" N i 20° 48' 92,2" E.

Skalki te zbudowane są z piaskowców średnio- i gruboziarnistych oraz piaskowców zlepieńcowatych, o zmiennych miąższościach warstw, wahających się od 40 do 150 cm. Widoczne są również wkładki zlepieńców o niewielkich miąższościach. W przekroju poprzecznym ławic wyraźnie widoczne są struktury miseczkowe, rozmycia erozyjne i powierzchni amalgamacji (Fig. 3). Miejscami zauważalne są warstwowania przekątne. Stratygraficznie utwory te reprezentują ogniwo piaskowca z Piwnicznej (Ostrowicka 1966, Oszczytko *et al.* 1990), jednostki magurskiej (podjednostka krynicka), wieku eoceńskiego (Oszczytko & Zuchiewicz 2007). Miąższość tego ogniwa waha się od 800 do 1600 m (Oszczytko & Wójcik 1993). Budowa geologiczna pasma Jaworzyny Krynickiej predysponuje do występowania na tym terenie licznych osuwisk i nabrzmiń koluwalnych ułokowanych na bocznych skłonach szczytów, a ambony, baszty, płyty, mury, ściany, progi, grzędy oraz występy skalne są powszechnie występującymi formami morfologicznymi (Margielewski 1994, 1997, 1998).

Badania wykonane przez Bromowicza (1992) wykazały, iż dominującymi składnikami w skałach tego ogniwa są: kwarc (38.1%), skalenie (12.4%), miki (ok. 4.3%) oraz piryty i detryt (ok. 1.5%). Ponad 15% z badanych prób stanowiły okruchy skalne, w których znacząco dominowały skały magmowe (ponad połowa), mniej stwierdzono fragmentów skał osadowych, a najmniej liczną grupą były okruchy skał metamorficznych. Ziarna mineralne spojone są lepiszczem głównie ilasto-krzemionkowym oraz węglanowo-ilastym. Właściwości techniczne ogniwa piaskowca z Piwnicznej (gęstość 2.61–2.75 Mg/m³, gęstość pozorną 2.42–2.69 Mg/m³, nasiąkliwość wagowa 0.39–3.6%) pozwalały na wykorzystanie tego surowca do celów budowlanych i drogowych (Peszat *vide* Golonka & Rączkowski 1984).

Obserwując powierzchnie opisywanych ambon, można zauważyć na ścianie wschodniej eliptyczne pustki o wymiarach 1–15 cm (najczęściej mają długości 2.5–3 cm, szerokości 4–6 cm) i głębokościach 3–4 cm. Znajdują się one na wysokości od 70 cm do ok. 3 metrów podłoża. Ich dłuższy wymiar jest zgodny z widocznym uławieniem (Fig. 4). Generalne załeganie warstw to 15°/55. Po stronie południowej ambony znajduje się pionowa szczelina, o wysokości ok. 13 metrów i zmiennej szerokości 15–50 cm, wewnątrz której zauważalne są oddzielające się skorupowo fragmenty wietrzejącej skały (Fig. 5).

Badania nad występowaniem tego typu form wietrzeniowych w Beskidach prowadzili Alexandrowicz & Pawlikowski (1982). Problematykę tę poruszali w swoich pracach również Mellor *et al.* (1997), Watson & Pye (1985) oraz inni autorzy.

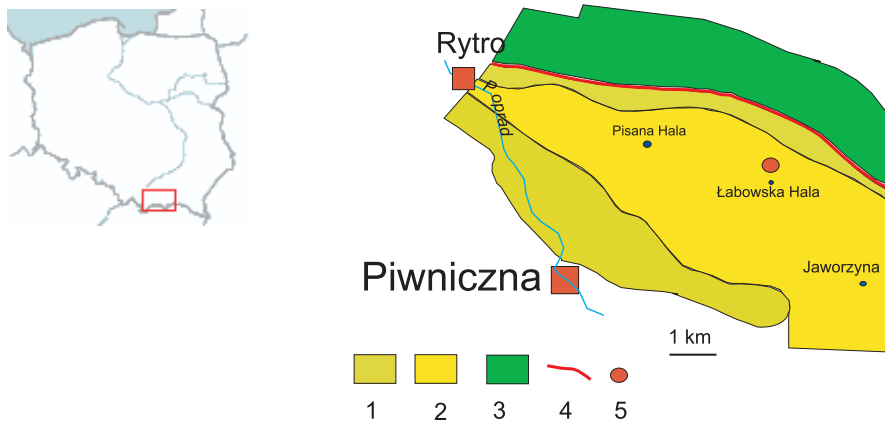


Fig. 1. Lokalizacja Diablich Ścian na tle budowy geologicznej Beskidu Sądeckiego (wg Golonki & Rączkowskiego 1984): 1 – formacja szczawnicka i formacja z Zarzecza, 2 – formacja magurska strefy krynickiej, 3 – ogniwo z Maszkowic formacji magurskiej (strefa sądecka), 4 – nasunięcie jednostki krynickiej na sądecką, dyslokacja krynicka, 5 – obiekt Diabelskie Ściany

Fig. 1. Localization of Devil Walls on the Beskid Sądecki geological structure: 1 – Szczawnicka Formation and Zarzecze Formation, 2 – Magura Formation, Krynica subunit, 3 – Maszkowice Sandstone Member, Magura Formation (Bystrica subunit), 4 – overthrust of the Krynica Subunit over the Bystrica Subunit, 5 – localization of Devil's Wall



Fig. 2. Diabie Ściany– widok ogólny ambon od strony południowo-wschodniej

Fig. 2. Devil Walls – view of sandstone tors from the south-east direction

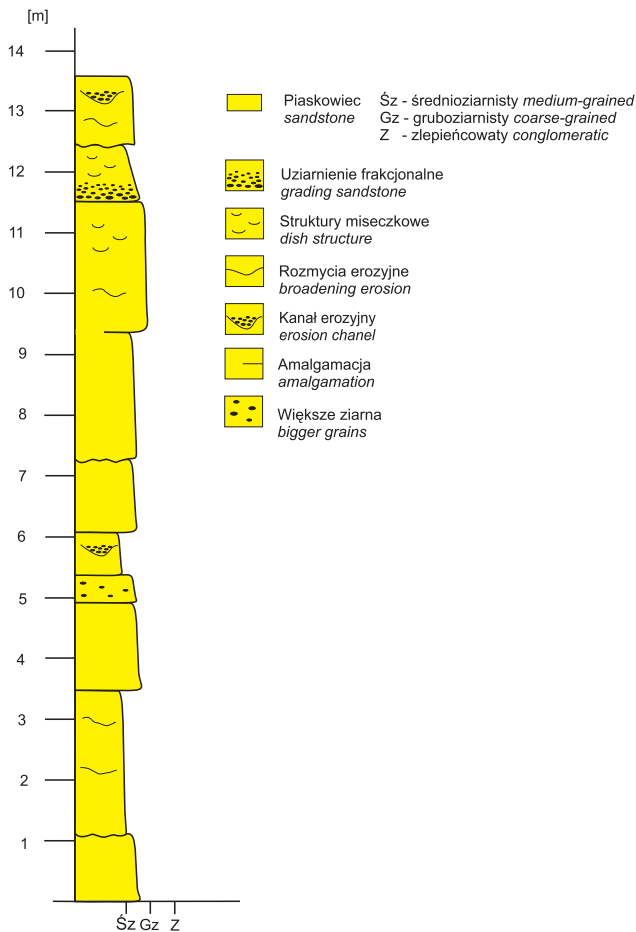


Fig. 3. Profil ściany wschodniej z widocznymi strukturami miseczkowymi i kanałami erozyjnymi

Fig. 3. Profile of east wall where were observed dish structure and erosion channels

MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Szukając odpowiedzi na pytanie, dlaczego na wschodniej ścianie Diabelskich Ścian powstały owalne pustki i dlaczego mają one taką geometrię, pobrano materiał do badań. Zasadniczym celem było przeanalizowanie różnicowania mineralogiczno-geochemicznego opisywanego obiektu, w odniesieniu występowania w nim pustek.

Z zagłębień struktur komórkowych został pobrany regolit, czyli zwietrzały materiał (próbka A, Fig. 4). Ze ściany wschodniej, w której widnieją owalne pustki, pobrano fragment jednolitej zewnętrznej skorupy (próbka B, Fig. 4). Na kolejnej ścianie, południowej, ze szczeliny bocznej, w której nie zauważono owalnych pustek, a jedynie eksfoliację po-brana została trzecia próbka – fragment skorupy (próbka C, Fig. 5).

Pobrano materiał został przeanalizowany metodą dyfraktometrii rentgenowskiej (proszkowaną DSH) z wykorzystaniem aparatu Philips APD X'Pert PW 3020. Zastosowano następujące parametry: promieniowanie $\text{Cu}_{K\alpha}$, refleksyjny monochromator grafitowy, napięcie lampy rentgenowskiej 35 kV, prąd lampy 30 mA, rejestrację krokową ($0.05^\circ 2\theta$), czas zliczania 1 sekunda. W celu wyeliminowania wpływu czynników aparaturowych na intensywność linii analitycznych regulowano I_0 względem standardowego preparatu kwarcowego. Identyfikacja faz mineralnych następowała na podstawie bazy danych zawartej w katalogu ICDD i z wykorzystaniem programu XRAYAN.

Do badań wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy HITACHI S 3400N wyposażony w mikroanalizator rentgenowski EDS firmy NORA. Zastosowano napięcie przyspieszające 25 kV.

Próbki zostały przygotowane do badań zgodnie z wymogami użytych metod.

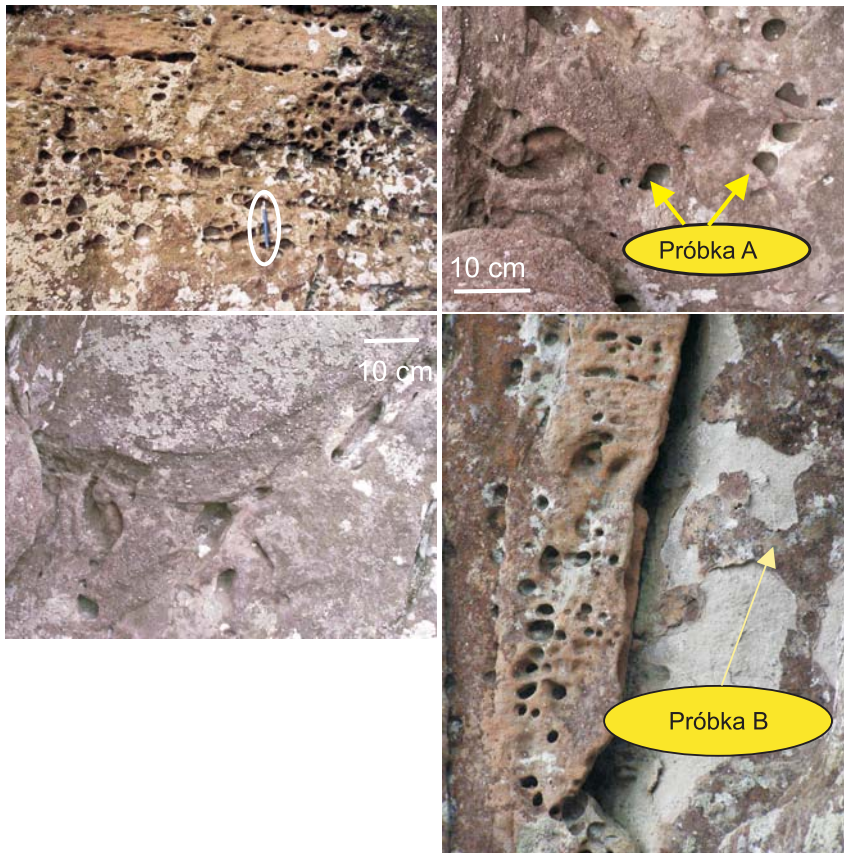


Fig. 4. Struktury komórkowe we wschodniej ścianie Diablich Ścian

Fig. 4. Cellular texture on the east walls of Devill Walls



Fig. 5. Szczelina z widocznymi skorupami będącymi efektem wietrzenia płytowego

Fig. 5. Vertical with crust as the product of selective weathering

WYNIKI BADAŃ

Makroskopowy opis wychodni skalnej jednoznacznie wskazuje na dynamiczne środowisko sedymentacji. Głównym sposobem transportu w procesie tworzenia piaskowców masywnych były prądy zawiesinowe o dużej gęstości, opisywane także jako ze spływy kohezyjne i kolizyjne upłynnionego materiału (Kicińska-Świdarska & Słomka 2003).

Badanie składu mineralnego dyfrakcją rentgenograficzną próbki A pobranej wewnątrz owalnych zagłębień znajdujących się na ścianie północnej wykazało, iż dominującym minerałem jest kwarc – SiO_2 (Fig. 6). Jest to wynik spodziewany. Stwierdzono również obecność albitu oraz węglanu wapnia – kalcytu. Innymi zidentyfikowanymi fazami mineralnymi są minerały z grupy krzemianów i glinokrzemianów, tj. muskowit, klinochlor, mikroklin oraz kaolinit. Ostatnim rozpoznany minerałem jest gips. W składzie mineralnym próbki B stanowiącej fragment skorupy zewnętrznej ściany wschodniej Diabelskich Ścian, na której to rozwinęły się wspomniane struktury komórkowe, zidentyfikowano następujące fazy mineralne: kwarc, albit, mikroklin, muskowit, klinochlor, kaolinit oraz kalcyt (Fig. 7). Na rentgenogramie tej próbki nie zidentyfikowano gipsu. Badanie rentgenograficzne próbki C, pobranej w części południowej Diabelskich Ścian wykazało obecność: kwarcu, albitu, kalcytu, mikroklinu, muskowitu, klinochloru, kaolinitu oraz gipsu (Fig. 8).

Różnica w składzie mineralnym dotyczyła zatem występowania gipsu, który stwierdzono w zwietrzelinie pobranej w pustkach oraz w ścianie bocznej opisywanych ambon skalnych. Na wszystkich trzech rentenogramach dominującym minerałem jest kwarc oraz minerały z grupy krzemianów i glinokrzemianów. Obserwacje te potwierdzają badania opublikowane przez Bromowicza (1992) oraz Oszczypkę & Wójcika (1993).

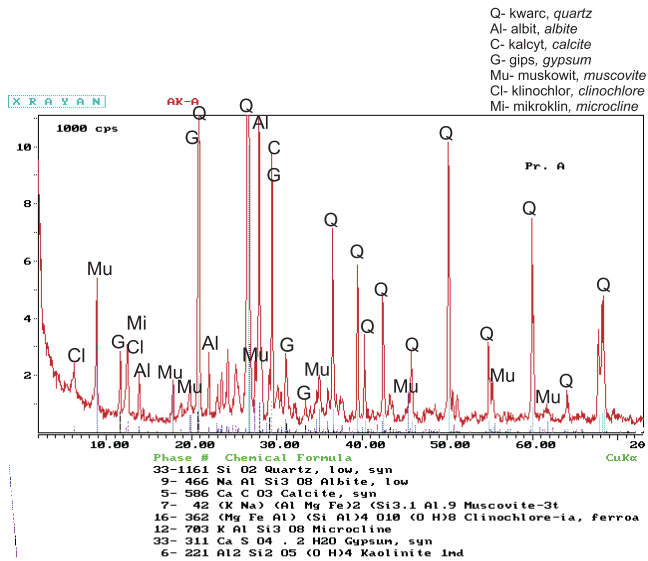


Fig. 6. Rentgenogram próbki A – regolit znajdujący się wewnątrz zagłębień

Fig. 6. X-ray diffraction pattern of sample A – regolit form the inside of wells

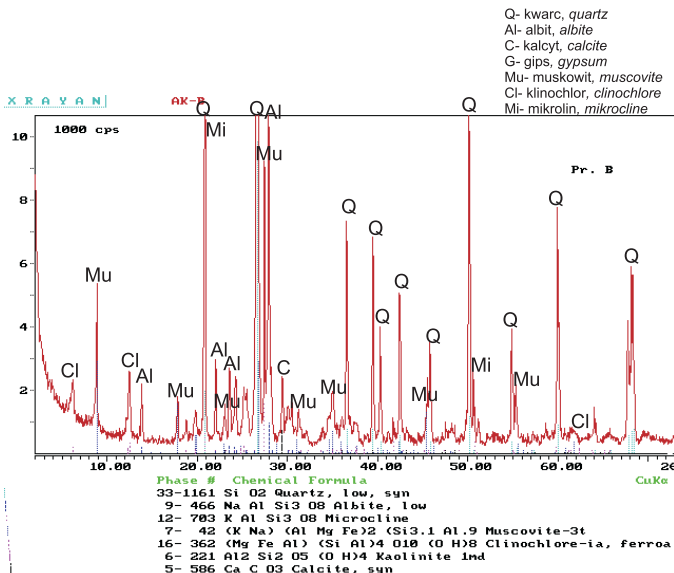


Fig. 7. Rentgenogram próbki B – zewnętrzna powierzchnia Diabelskich Ścian, w której powstały struktury komórkowe

Fig. 7. X-ray diffraction pattern of sample B – outside surface of Devil Walls, where cellular texture were development

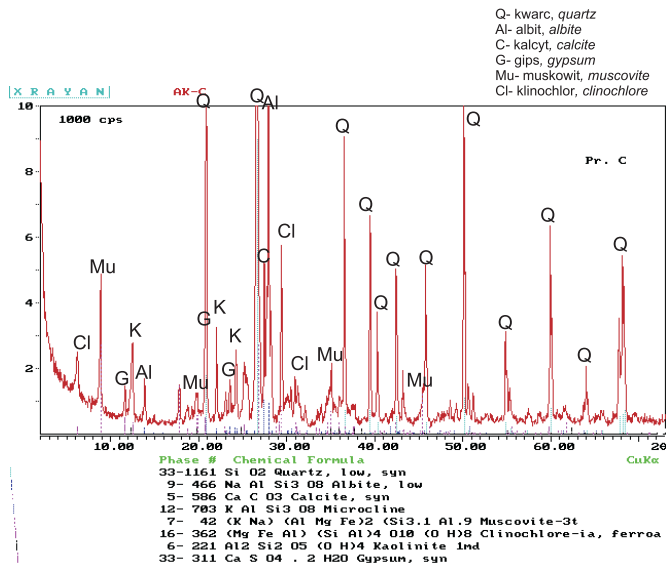


Fig. 8. Rentgenogram próbki C – fragment skalny pobrany ze ściany południowej, bez struktur komórkowych

Fig. 8. X-ray diffraction pattern of sample C – part of rock which were collected samples from the south wall without cellular textures

Badanie mikrosondą elektronową potraktowano jako uzupełniające. Pozwoliło ono określić przybliżoną zawartość pierwiastków w badanych próbkach oraz wykonać dokładniejszą analizę mikroobszarów (Fig. 9, Tab. 1). Przeprowadzona analiza próbki A jednoznacznie wskazała, iż dominującym pierwiastkiem jest krzem (Si). Stwierdzono obecność glinu, żelaza, magnezu, sodu, manganu oraz potasu. Zawartość siarki (występującej w postaci uwodnionych siarczanów, tj. gipsu) w przeanalizowanych punktach wyniosła od niecałego procenta do 17.7% wag. Analiza mikrosondą pozwoliła stwierdzić obecność metalu z IV grupy, mianowicie tytanu. Zawartość tego pierwiastka w skałach osadowych waha się w zakresie 0.38–0.5% w skałach ilastych i 0.15–0.3% w skałach piaszczystych (Kabata-Pendias & Pendias 1993). Jest to pierwiastek mało mobilny, transportowany biernie, głównie w postaci pierwotnych minerałów (ilmenit, tytanomagnetyt, rutył). W badanej próbce stwierdzono jego obecność w czterech z pięciu analizowanych mikroobszarów, w granicach 1.01–17.64% wag. Stwierdzono również obecność wanadu.

Identyfikacja faz mineralnych na podstawie uzyskanego składu pierwiastkowego jest niejednoznaczna. Uzyskane analizy chemiczne przeliczono na tlenki, a następnie obliczono faktory dla poszczególnych faz mineralnych, identyfikując ich obecność w poszczególnych próbkach.

Przypuszczalnie można wyróżnić w próbce A obecność: kaolinitu (Apt1, Apt3, por. Tab. 1), hydrobiotytu (Apt2, Apt1*), muskowitzu (Apt4), skrzemionkowanego gipsu (Apt5), gipsu (Apt2*, Apt3*, Fig. 10) oraz rutyłu [TiO₂], (Apt4*, Apt5*, Fig. 11).

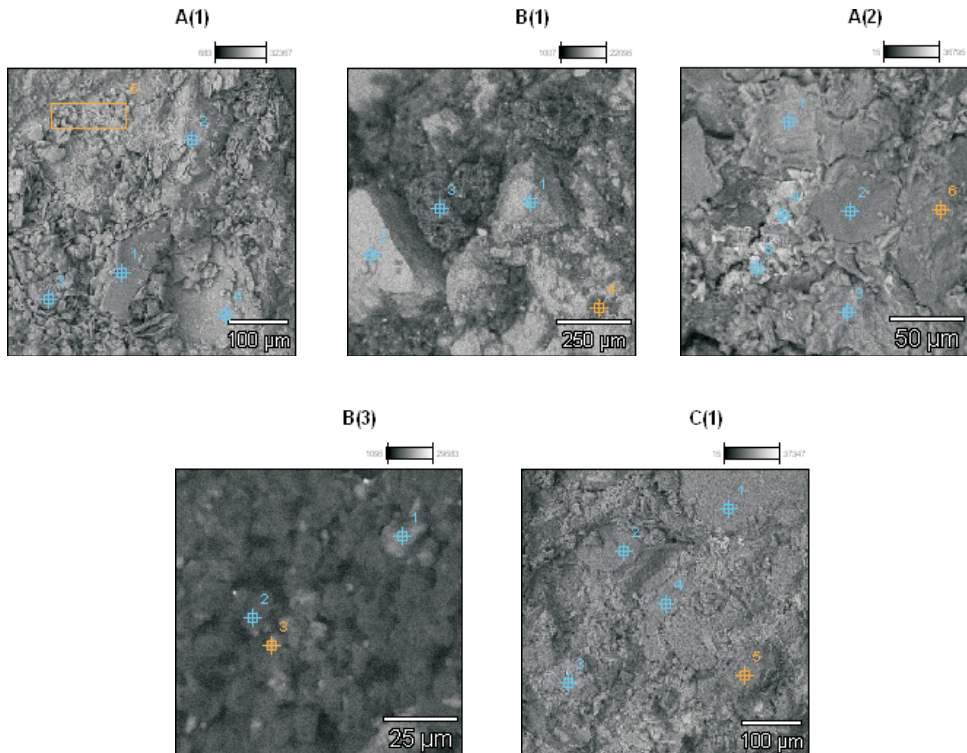


Fig. 9. Obrazy z mikroskopu skaningowego mikroobszarów analizowanego materiału: próbki A(1) i A(2) – widoczne są blaszki gipsu i drobno ziarnisty materiał elastyczny, próbki B(1) i B(3) – widoczne są ziarna kwarcu i minerałów z grupy miki, próbka C(1) – widoczne są ziarna kwarcu i hydromik

Fig. 9. Microtexture analyses samples: samples A(1) and A(2), samples B(1) and B(3), and sample C(1)

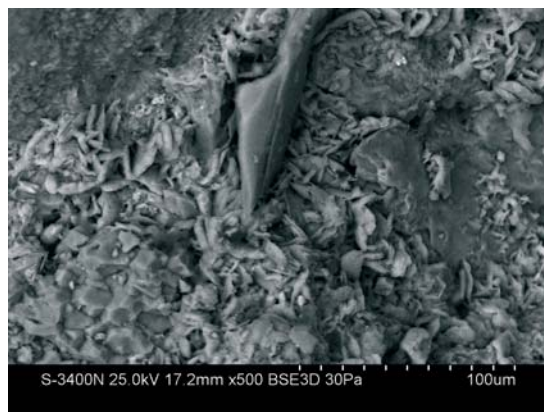


Fig. 10. Zaobserwowane blaszki gipsu w próbce C

Fig. 10. Gypsum in sample C

Tabela (Table) 1

Zawartości (% wag.) pierwiastków w analizowanych próbkach oznaczone mikroanalizatorem rentgenowskim EDS

Concentrations (wt. %) of elements in samples measured by EDS

Próbka Sample	Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Ti-K	Mn-K	Fe-K	Cl-K	V-K	
A (200X)													
pt1	0.89	1.25	26.57	42.79	1.66	21.24	2.57	1.08	1.38	3.93	-	-	
pt2		7.48	11.33	23.55	12.01	1.25		12.74		1.01			29.18
pt3		2.98	17.13	57.91	2.86	9.57		2.92		17.64			5.62
pt4		4.46	18.17	39.16	0.77	14.81		20.32		3.22			4.10
pt5		1.54	7.24	32.78	17.76	4.17							12.97
A (500X)													
pt1*	0.89 0.68	8.30	18.45	31.87	0.33	3.03 0.76 0.63 0.61 1.64	2.11	0.81	1.63	35.42	-	2.79	
pt2*		1.44	3.22	14.42			73.14	1.92		4.21			
pt3*		1.45	1.81	5.72			86.07	0.82		2.81			
pt4*		1.58	3.63	11.75			5.41	63.16		11.08			
pt5*		0.78	2.35	6.63			2.69	72.89		11.29			
pt6*		5.30	8.44	70.67			3.14	0.54		10.26			
B (1000X)													
pt1	-	3.43 1.84	20.25	46.58		12.63	6.78	2.30	-	7.14	0.89	-	
pt2			14.03	66.62		19.35		1.98		5.1			
pt3			26.39	54.13		10.47							
B (100X)													
pt1*	-	2.66	1.64	98.36	5.84 4.40	6.05	-	-	-	13.99	-	-	
pt2*			0.38	99.62		3.26				6.36			
pt3*			14.77	56.69									
pt4*			5.94	80.04									
C (200X)													
pt1	-	5.27 1.87	1.73	92.11	8.85 2.22 1.94 1.05	2.22 2.81	2.83	-	-	3.33	-	-	
pt2			6.95	57.84			11.91			12.24			
pt3			9.45	58.19			3.30			18.76			
pt4			2.74	88.21			1.58			3.67			
pt5			0.83	94.19			1.55			2.38			

pt1, pt2, pt1* – kolejne analizy punktowe badanej próbki.

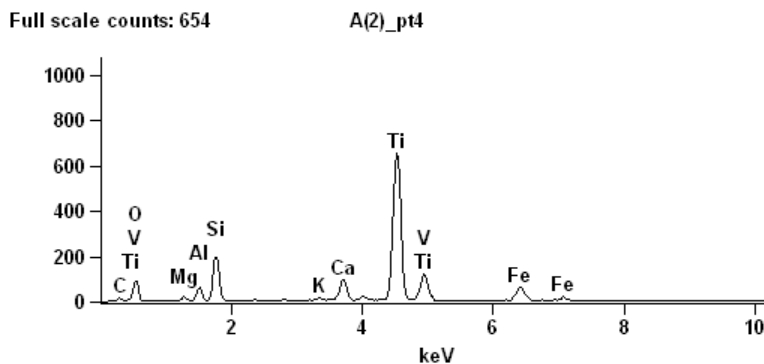


Fig. 11. Widmo emisyjne próbki A

Fig. 11. Spectrum of energy dispersive form sample A

Zawartość pierwiastków w próbce B, która stanowi fragment zewnętrznej skorupy, jest stosunkowo mało zróżnicowana. Dominującym pierwiastkiem jest krzem. Stwierdzono niewielkie ilości glinu, żelaza, a w jednym z obszarów oznaczono magnez (Tab. 1). Zidentyfikowanymi fazami mineralnymi są: kwarc (Bpt1*, Bpt2*), muskowit (Bpt1, Bpt2) oraz kaolinit (Bpt3, Bpt4*).

Analiza próbki C pobranej ze szczeliny bocznej ściany południowej wykazała obecność: Si, Fe, Ca, Al oraz S. Uzyskane dane niemal jednoznacznie wskazują na obecność kwarcu (Cpt1, Cpt4, Cpt5) oraz hydromiki, jaką jest hydrobiotyt (Cpt2, Cpt3). Sporadycznie i w niewielkich ilościach oznaczono takie pierwiastki, jak: Zr, P, Cl, Br oraz V (Tab. 1). Pierwiastki te są dość powszechne w produktach wietrzenia biotyty oraz innych minerałów, np. tytanononnych.

DYSKUSJA

Owalne pustki zwane strukturami komórkowymi znane są z eoceńskich piaskowców ciężkowickich, jak również z sudeckich piaskowców kredowych i niewątpliwie mają związek z procesami wietrzenia. Wilczyńska-Michalik & Michalik (2001) wydzielili trzy zasadnicze zespoły czynników wpływających na przyspieszone wietrzenie skał, są to czynniki: atmosferyczne, petrograficzne i lokalne.

Występowanie tego typu form należy wiązać z deterioracją – procesem, w wyniku którego mogą powstawać nisze w ścianach skalnych (zwane tafoni) bądź mniejsze nagromadzenia pustek (zwane plastrami miodu), które mają niewątpliwie związek z występującym zanieczyszczeniem powietrza, głównie przez tlenki siarki i azotu prowadzącym w efekcie do wietrzenia solnego (Wilczyńska-Michalik & Michalik 1995, Wilczyńska-Michalik 2004, Lorenc & Mazurek 2007). Z raportów WIOŚ (Wojewódzka Inspekcja Ochrony Środowiska – delegatura w Nowym Sączu) dotyczących prowadzonego monitoringu powietrza (metodą wskaźnikową opierającą się na zjawisku samoistnej dyfuzji gazów oraz metodą manualną) wynika, iż na terenie Beskidu Sądeckiego w latach 2000–2005 nie został przekroczony dopuszczalny poziom SO_2 , NO_2 oraz pyłu zawieszonego. W punktach pomiarowych zlokalizowanych w wybranych uzdrowiskach i miejscowościach Beskidu Sądeckiego, tj. w Krynicy,

Muszynie i Piwnicznej oraz w Starym Sączu, wartości stężeń średniorocznych w latach 2000–2005 wahały się: SO_2 1.4–6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pył zawieszony 9–22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oraz NO_2 10.3–22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Zdecydowanie niższe wskazania SO_2 i pyłu stwierdzono w Krynicy, a najwyższe w Piwnicznej. W przypadku dwutlenku azotu stwierdzono tendencję odwrotną. Analizując dane WIOŚ, można jednak stwierdzić wzrost zanieczyszczenia powietrza dwutlenkiem siarki w miesiącach zimowych, tj. od listopada do marca. W punkcie pomiarowym w Muszynie w okresie grzewczym wartości średniomiesięczne stężenia SO_2 w 2005 roku wahały się od 7.6 do 16.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, przy średnich w sezonie niegrzewczym od 1.2 do 6.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wzrost zanieczyszczenia powietrza spowodowany emisją „komunikacyjną” (w postaci tlenku węgla i azotu oraz węglowodorów – w tym benzenu i zanieczyszczeń pyłowych zawierających duże koncentracje metali ciężkich) wynika również z emisji pochodzących z małych kotłowni i indywidualnych palenisk domowych. Duży wpływ na lokalny stan powietrza mają także warunki topograficzne i meteorologiczne, zwłaszcza w terenie górzystym. Powstawanie i rozwój takich struktur ma wyraźny związek z relacją schnięcia i zawilgocenia powierzchni skalnej, a w zasadzie z długością trwania tego cyklu. Jednym z kluczowych parametrów jest długość suchego okresu w panującym klimacie (Huinink *et al.* 2004). Ważnym faktem jest występowanie badanych pustek na wysokości ok. 1 m od podstawy złączenia ambony z podłożem i większa wilgotność otoczenia związana z zalesieniem terenu przez las bukowy.

Długotrwałe działanie czynników fizycznych, chemicznych oraz biologicznych na powierzchni skalnej może prowadzić do powstawania różnorodnych zmian i form na eksponowanych wychodniach. Wietrzenie mechaniczne (fizyczne) spowodowane jest głównie zmianami temperatury (zarówno wahaniami dobowymi, jak i rocznymi) oraz procesami dezintegracji wywołanymi zamrozem i mechaniczną działalnością organizmów żywych. Obecność bakterii chemolitotroficznych (utleniających siarkę do kwasu siarkowego) mogłaby również przyczynić się do przemian mineralnych zachodzących w badanych skałach, jednak ten czynnik nie został uwzględniony przy prowadzonych badaniach.

Rozszerzanie i kurczenie się ziaren spowodowane zmianami temperatury oraz insolacją zależy od ciepła właściwego i przewodnictwa cieplnego danego typu skały, jak również od współczynnika rozszerzalności cieplnej budujących ją minerałów. Współczynnik ten jest dwukrotnie większy w przypadku kwarcu niż skaleni i, jak wiadomo, ciepło przepływa szybszym strumieniem w kierunku uwarstwienia niż w kierunku prostopadłym czy ukośnym. Stąd też zapewne wynika asymetria opisywanych pustek, generalnie zgodna z płaszczyznami granicznymi warstw.

Długotrwałe nagrzewanie skałek powoduje pękanie i oddzielanie płytowe wywołane naprężeniami, jakie zaistniały pomiędzy strefą ogrzaną a nieograną. Efekty tego zjawiska, zwanego rozpadem blokowym, możemy oglądać w szczelinie pionowej znajdującej się po stronie południowej badanego obiektu. Czynniki powodujące mechaniczną dezintegrację granulární skały (rozpad ziarnisty) torują drogę wietrzeniu chemicznemu. Najważniejszym spośród nich czynnikiem jest woda, a w zasadzie jej dysocjowana część (Allen 2000). Efektem wietrzenia chemicznego może być powstawanie nowych minerałów lub/i skorup wietrzeniowych. Powstający kwas siarkowy w wyniku połączenia cząsteczki SO_2 z wodą tworzy silnie kwaśne środowisko, a obecność substancji węglanowej (znajdującej się głównie w spoiwie węglanowo-ilastym) umożliwia podmiianę anionu węglanowego na siarczanowy.

Efektem tej podmiany jest proces krystalizacji gipsu (por. Alexandrowicz & Pawlikowski 1982). Istotnym czynnikiem jest także ciśnienie krystalizacji gipsu, które przy stosunku stężeń roztworu podczas krystalizacji (C) do roztworu nasyconego (C_s) równym 2 w temperaturze 0°C wynosi 282 atmosfery, a przy stosunku $C/C_s = 50$, aż 1595 atmosfer. Zjawisku krystalizacji gipsu towarzyszy również ok. pięciokrotne zwiększenie współczynnika rozszerzalności cieplnej, co może być katalizatorem dalszych procesów wietrzeniowych (Wilczyńska-Michalik 2004 za Winkler & Singer 1972).

Występowanie siarki w analizowanym materiale związane może być z obecnością pirytu w skałach należących do ogniwa piaskowców z Piwnicznej. Dowodem tej obecności są źródła siarczkowe, np. „Anna” i „Tadeusz” w Barcicach, „Katarzyna” i „Rogaś” w Rytrze. „Jerzy” i „Hanna” w Wierchomli. Zawartość H_2S w próbkach wody waha się w granicach $1.04\text{--}10.2\text{ mg/dm}^3$ (Rajchel & Rajchel 1999). Siarka znajdująca się w gipsie może być najprawdopodobniej pochodzenia atmosferycznego (a sam minerał pochodzenia epigenetycznego), bądź może być produktem z rozkładu pirytu. W celu wyjaśnienia tej kwestii należałoby przeprowadzić badania izotopowe.

Zróżnicowanie wielkości ziaren w profilu ambon, w połączeniu z występującymi warstwowaniami i rozmyciami erozyjnymi oraz obecnością spoiwa typu matrix, sprzyja (jako czynnik petrograficzny) tworzeniu się owalnych czy eliptycznych pustek. Przyszczytowa lokalizacja ambony i jej położenie (ponad 1000 m n.p.m.) wraz ze stosunkowo dużymi opadami na tym terenie ($1100\text{--}1200\text{ mm/rok}$) i zróżnicowaniem temperaturowym powoduje duży wpływ czynnika lokalnego na powstające formy.

WNIOSKI

Powstawanie struktur komórkowych można niewątpliwie wiązać z selektywnym wietrzeniem wynikającym ze zróżnicowanego składu mineralnego, a obecność pojedynczych klastów ilastych wskazywałaby na proces suffozyjnego wymywania materiału ilastego.

W wyniku przeprowadzonych analiz na trzech pobranych próbkach z Diabelskich Ścian sformułowano następujące wnioski:

- 1) Zasadniczym czynnikiem mającym wpływ na miejsce tworzenia się tych form jest przyszczytowe położenie ambony oraz filtracja wód opadowych przez grubo- i średnioziarnisty materiał skalny, spękany dodatkowo szczelinami pionowymi.
- 2) Zanieczyszczenie środowiska, w tym powietrza głównie przez tlenki siarki i azotu, prowadzi do wietrzenia solnego i powstawania nowych minerałów (gipsu), których krystalizacja może być katalizatorem dalszego wietrzenia, głównie mechanicznego.
- 3) Sprzyjające warunki lokalne (duża wilgotność i zróżnicowanie dobowe oraz roczne temperatury) są dodatkowymi czynnikami przyspieszającymi procesy wietrzenia.
- 4) Geometria pustek wynika z uławicenia ambony i właściwości fizycznych dominujących w składzie minerałów (głównie kwarcu).

Proces powstawania pustek skalnych obserwowanych w Diabelskich Ścianach może mieć podłoże dwojakiego rodzaju: pierwotne oraz wtórne, jednak wskazane byłoby obserwowanie i monitorowanie tempa procesów wietrzenia skał przy obecnym zanieczyszczeniu środowiska.

Praca jest finansowana w ramach badań własnych AGH, numer umowy 10.10.140.326.

Autorka kieruje szczególne podziękowania do Pani prof. dr hab. Zofii Alexandrowicz za wnikliwe i cenne uwagi zawarte w recenzji pracy oraz do Panów: mgr. Adama Gawła (Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej) i dr. inż. Janusza Adamca (Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej) za pomoc w wykonaniu badań.

LITERATURA

- Allen P.A., 2000. *Procesy kształtujące powierzchnię Ziemi*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Alexandrowicz Z., 1978. Skąłki piaskowcowe Zachodnich Karpat fliszowych. *Prace Geologiczne PAN, Oddział Kraków*, 1–79.
- Alexandrowicz Z. (red.), 1996. Geochrona Beskidu Sądeckiego i kotliny Sądeckiej. *Studia Naturae*, 42, 70–72.
- Alexandrowicz Z. & Pawlikowski M., 1982. Mineral crusts of the surface weathering zone of sandstone tors in the Polish Carpathians. *Mineralogica Polonica*, 13, 2, 41–60.
- Bromowicz J., 1992. Basen sedymentacyjny i obszary źródłowe piaskowców magurskich. *Zeszyty Naukowe AGH*, 1485, *Geologia*, 54, 1–120.
- Czarnowski A., 1964. Skąły Beskidu Sądeckiego. *Wierchy*, 33, 71, 77–88.
- Golonka J. & Rączkowski W., 1984. *Objaśnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski. Arkusz Piwniczna (1051) 1:50 000*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Huinink H.P., Pel L. & Kopinga K., 2004. Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 10, 1225–1233.
- Kabata-Pendias A. & Pendias H., 1993. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. PWN, Warszawa.
- Kicińska-Świdarska A. & Słomka T., 2003. Trasa geoturystyczna w sąsiedztwie rezerwatu Barnowiec. W: *Jaka turystyka w rezerwatach przyrody?* Rzeszów, 53–62.
- Lorenc M.W. & Mazurek S., 2007. *Wykorzystać kamień*. IASA, Wrocław.
- Margielewski W., 1994. Ochrona osuwiska Gaworzyna w paśmie Jaworzyny Krynickiej. *Przegląd Geologiczny*, 42, 3, 189–193.
- Margielewski W., 1997. Formy osuwiskowe pasma Jaworzyny Krynickiej i ich związek z budową geologiczną regionu. *Geologia* (kwartalnik AGH), 23, 1, 45–102.
- Margielewski W., 1998. Rozwój form osuwiskowych w Barnowcu (Beskid Sądecki. Karpaty zewnętrzne), w świetle analizy strukturalnych uwarunkowań osuwisk w Karpatach fliszowych. *Przegląd Geologiczny*, 46, 5, 436–450.
- Mellor A., Short J. & Krikby S.J., 1997. Tafoni in the El Chorro area. Andalucia, southern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 817–833.
- Ostrowicka H., 1966. Profil litologiczny gruboławicowych piaskowców w Piwnicznej. *Sprawozdania z Posiedzeń Komisji Naukowych PAN, Oddział w Krakowie*, 10/2, 608–611.

-
- Oszczypko N., Dudziak J. & Malata E., 1990. Stratygrafia osadów płaszczowiny magurskiej (kreda-paleogen) w Beskidzie Sądeckim, Karpaty Zewnętrzne. *Studia Geologica Polonica*, 97, 109–181.
- Oszczypko N. & Wójcik A., 1993. *Objaśnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski. Arkusz Nowy Sącz (1035)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Oszczypko N. & Zuchewicz W., 2007. Geology of Krynica SPA, Western Outer Carpathians, Poland. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 77, 69–92.
- Rajchel L. & Rajchel J., 1999. Karpackie źródła wód mineralnych i specyficznych – pomnikami przyrody nieożywionej. *Przegląd Geologiczny*, 47, 10, 911–919.
- Raport oceny jakości powietrza w 2005 roku na terenie powiatu nowosądeckiego*. WIOŚ, Delegatura w Nowym Sączu.
- Watson A. & Pye K., 1985. Pseudokarstic micro-relief and other weathering features on the Mswati Granite (Swaziland). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29, 285–300.
- Wilczyńska-Michalik W., 2004. *Influence of atmospheric pollution on the weathering of stones in Cracow monuments and rock outcrops in Cracow, Cracow-Częstochowa Upland and the Carpathians*. Wyd. Naukowe AP, Kraków.
- Wilczyńska-Michalik W. & Michalik M., 1995. Deterioracja materiałów skalnych w budowlach Krakowa. *Przegląd Geologiczny*, 43, 3, 227–235.
- Wilczyńska-Michalik W. & Michalik M., 2001. Wpływ zanieczyszczeń atmosfery na wietrzenie skał. *Przegląd Geologiczny*, 49, 4, 353.