

## MINERALIZACJA KRUSZCOWA W SKAŁACH ULTRAMAFICZNYCH PASMA MNICHA W ZACHODNIEJ CZĘŚCI MASYWU BRASZOWICE–BRZEŹNICA (DOLNY ŚLĄSK)

### ORE MINERALIZATION IN ULTRAMAFICS FROM THE MNICH RIDGE FROM WESTERN PART OF THE BRASZOWICE–BRZEŹNICA MASSIF (LOWER SILESIA)

KATARZYNA SADŁOWSKA<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Skały ultramaficzne masywu Braszowice–Brzeźnica to głównie harzburgity, dunity i lherzolity, które w różnym stopniu uległy serpentynizacji. Stanowią one wyższą część członu ultramaficznego sekwencji ofiolitu sudeckiego. Skały ultramaficzne sekwencji ofiolitowych są znane z wystąpień złóż: chromu, niklu, kobaltu oraz pierwiastków grupy platyny. W badanych skałach minerały kruszczowe to przede wszystkim tlenki: chromit, spinel Fe-Cr i magnetyt. Wśród siarczków dominują siarczki niklu i żelaza, różniące się między sobą proporcjami tych dwóch pierwiastków. Zidentyfikowane siarczki to: heazlewoodyt ( $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ), pentlandyt ( $\text{Ni,Fe}9\text{S}_8$ ), milleryt ( $\text{NiS}$ ) i godlewskit ( $\text{Ni}_7\text{S}_6$ ). W siarczkach zidentyfikowano wrostki arsenków niklu. Minerały kruszczowe występują w formie rozproszonej, ich ziarna są ksenomorficzne, o zróżnicowanych rozmiarach od kilku  $\mu\text{m}$  do 4 mm. Pierwotne minerały kruszczowe – chromit, pentlandyt, pirotyt i chalkopiryt w procesie serpentynizacji uległy przemianom, w wyniku czego powstały wtórne minerały kruszczowe – spinel Fe-Cr, cztery generacje magnetytu, siarczki Ni-Fe oraz arsenki niklu. W czasie serpentynizacji ze struktury chromitu był odprowadzany Cr, Al, Mg, a w ich miejsce podstawiane było Fe. W wyniku tego procesu krystalizował ferrichromit i magnetyt Ia. Magnetyt Ib wykrył w pseudomorfozach po oliwinach i piroksenach. W zaawansowanym stadium serpentynizacji krystalizował magnetyt II równocześnie z siarczkami.

**Słowa kluczowe:** ofiolit, chromit, magnetyt, siarczki niklu, serpentynizacja, serpentynity, minerał kruszczowy.

**Abstract.** Ultramafic rocks of the Braszowice–Brzeznica massif consist of harzburgites, dunites and lherzolites that are serpentinised in various degree. These rocks are regard as upper part of ultramafic sequence of the Sudetic ophiolite complex. Ultramafic rocks of ophiolite sequences are often associated with important mineral deposits like chrome, nickel, cobalt and PGE. EPMA analyses show that the most abundant ore minerals are oxides like chromite, ferrichromite, magnetite. Sulphide ore minerals are mainly Fe-Ni sulphides. Documented sulphides are: heazlewoodite ( $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ), pentlandite ( $\text{Ni,Fe}9\text{S}_8$ ), millerite ( $\text{NiS}$ ), godlevskite ( $\text{Ni}_7\text{S}_6$ ). In some sulphide grains occur nickel arsenides inclusions. Ore mineral are dispersed, forms xenomorphic grains from several  $\mu\text{m}$  to 4 mm in size. Primary ore minerals like chromite, pentlandite, pyrrhotite and chalkopyrite were affected by fluids, which results in precipitation of secondary mineral phases: Fe-Cr spinel, four generations of magnetite, Fe-Ni sulphides and Ni arsenides. During serpentinisation Cr, Al, Mg in chromite strutcutre were replaced by Fe. Result of this alteration is Fe-Cr spinel and magnetite Ia. Magnetite Ib crystalized in pseudomorphs after olivines and pyroxenenes. Magnetite II precipitate simultaneously with sulphides.

**Key words:** ophiolite, chromite, magnetite, nickel sulphide, serpentinisation, serpentinites, ore mineral.

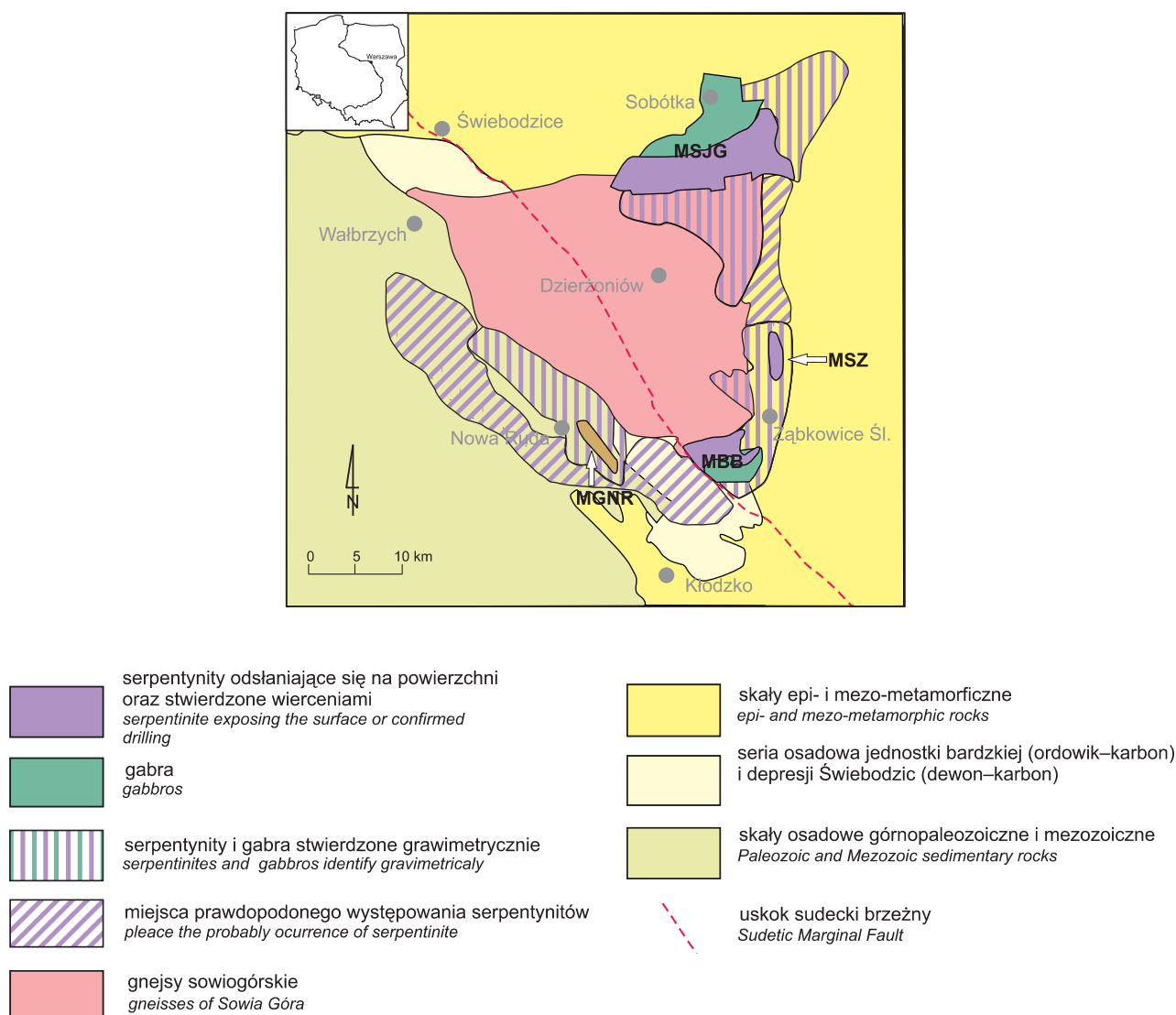
---

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 02-975 Warszawa; e-mail: katarzyna.sadlowska@pgi.gov.pl

## WSTĘP

Skały ultramaficzne i maficzne występujące w otoczeniu Bloku Gór Sowich zostały rozpoznane jako prawie kompletna sekwencja ofiolitowa (Cwojdzński, 1977; Majerowicz, 1981). Poszczególne człony ofiolitu sudeckiego występują w postaci kilku wyraźnie wyodrębnionych tektonicznie masywów (fig. 1). Autorka artykułu objęła badaniami zachodnią część serpentynitowego masywu Braszowice–Brzeźnica, która w największym stopniu była poddana procesom metamorficznym. Skały ultramaficzne masywu Braszowice–Brzeźnica

to głównie harzburgity, dunity i lherzolity, które w różnym stopniu uległy serpentynizacji (Gunia, 1992). Zachodnia część masywu (pasmo Mnicha) jest wykształcona jednorodnie – w postaci serpentynitów antygorytowych (fig. 2). Skały ultramaficzne sekwencji ofiolitowych są znane z wystąpień złóż chromu, niklu, kobaltu oraz pierwiastków grupy platyny. Niniejsza praca ma na celu scharakteryzowanie okruszcowania, występującego w serpentynitach antygorytowych pasma Mnicha. Opisano w niej pierwotną mineralizację chromitową

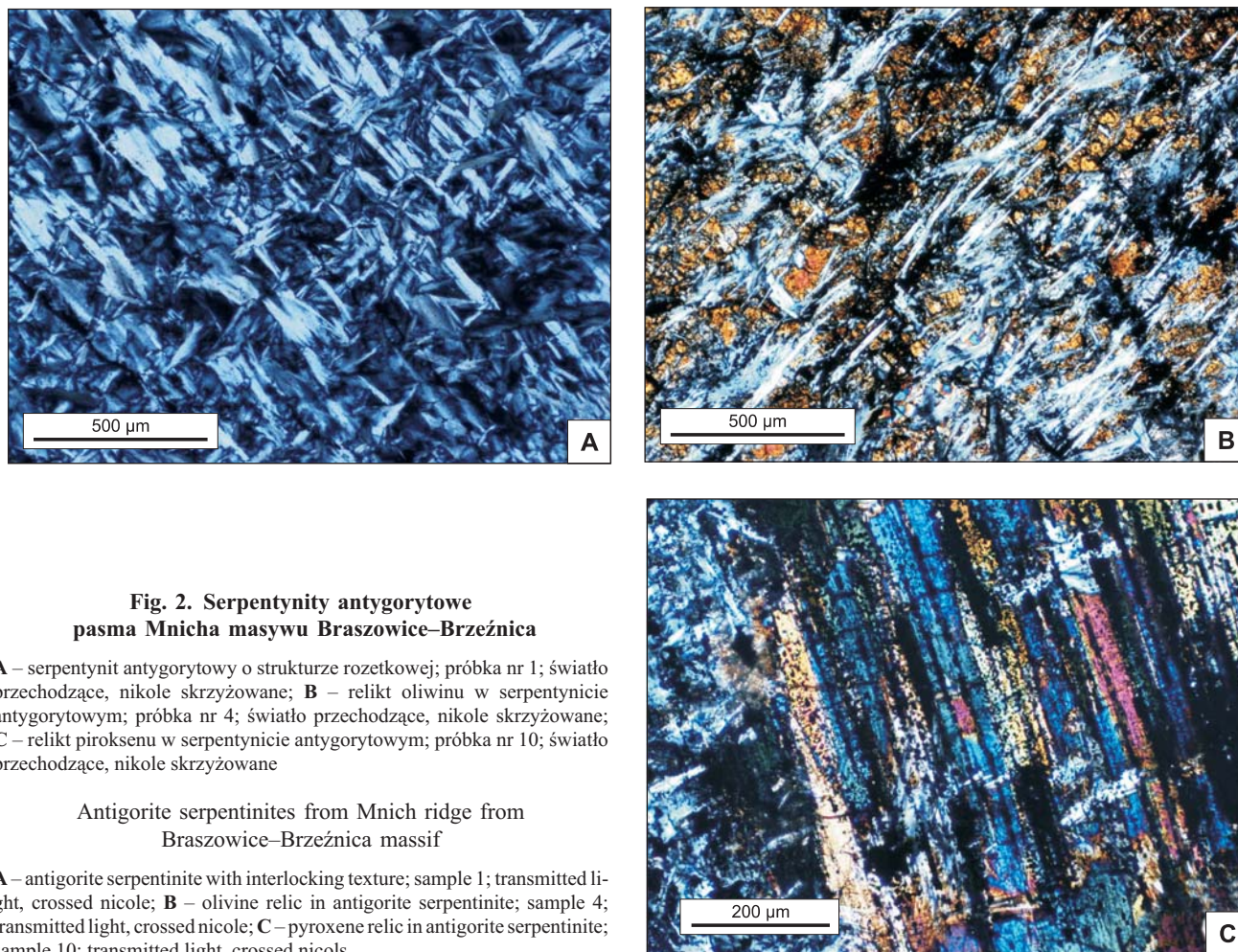


**Fig. 1. Schematyczna mapa geologiczna przedstawiająca rozmieszczenie masywów skał maficznych i ultramaficznych w otoczeniu bloku Gór Sowich (według Jamrozik, 1981, zmieniona)**

MSJB – masyw serpentynitowy Jordanów–Gogołów, MSZ – masyw Szklar, MBB – masyw Braszowice–Brzeźnica, MGNR – masyw gabbrowy Nowej Rudy

Geological sketch map of the mafic and ultramafic massifs surrounding Góry Sowie Block (after Jamrozik, 1981, modified)

MSJB – Jordanów–Gogołów Serpentine Massif, MSZ – Szklary Massif, MBB – Braszowice–Brzeźnica Massif, MGNR – Nowa Ruda Gabbro Massif



**Fig. 2. Serpentynty antygorytowe  
pasma Mnicha masywu Braszowice–Brzeźnica**

**A** – serpentynit antygorytowy o strukturze rozetkowej; próbka nr 1; światło przechodzące, nikole skrzyżowane; **B** – relikty oliwiny w serpentynie antygorytowym; próbka nr 4; światło przechodzące, nikole skrzyżowane; **C** – relikty piroksenu w serpentynie antygorytowym; próbka nr 10; światło przechodzące, nikole skrzyżowane

Antigorite serpentinites from Mnich ridge from  
Braszowice–Brzeźnica massif

**A** – antigorite serpentinite with interlocking texture; sample 1; transmitted light, crossed nicole; **B** – olivine relic in antigorite serpentinite; sample 4; transmitted light, crossed nicole; **C** – pyroxene relic in antigorite serpentinite; sample 10; transmitted light, crossed nicols

z uwzględnieniem przemian, jakim uległa ona w czasie późniejszych procesów metamorficznych. Scharakteryzowano również wtórną tlenkową i siarczkową mineralizację krusz-

cową. W artykule podjęto próbę wyjaśnienia sukcesji kolejnych generacji minerałów kruszczowych, w związku z postępującym procesem serpentynizacji.

## MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Badaniami terenowymi objęto obszar pasma Mnicha w zachodniej części serpentynitowego masywu Braszowice–Brzeźnica. Materiał skalny pobrano z naturalnych wychodni skał masywu oraz ze zwietrzliny (fig. 3). Z pobranych próbek przygotowano 10 preparatów przeznaczonych do badań w świetle odbitym i przechodzącym. Analizy składu chemicznego w mikroobszarze wykonano na dwóch próbkach: próbce nr 5 i próbce nr 9.

Badania w spolaryzowanym świetle odbitym i przechodzącym były główną metodą identyfikacji minerałów. Badania te prowadzono przy użyciu mikroskopu Nikon Eclipse E600POL. Analizy składu chemicznego chromitów, spineli żelazowo-chromowych, magnetytu, siarczków oraz arsenków przeprowadzono na mikrosondzie elektronicznej CAMECA SX-100 w Instytucie Geochemii Mineralogii i Petrologii na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

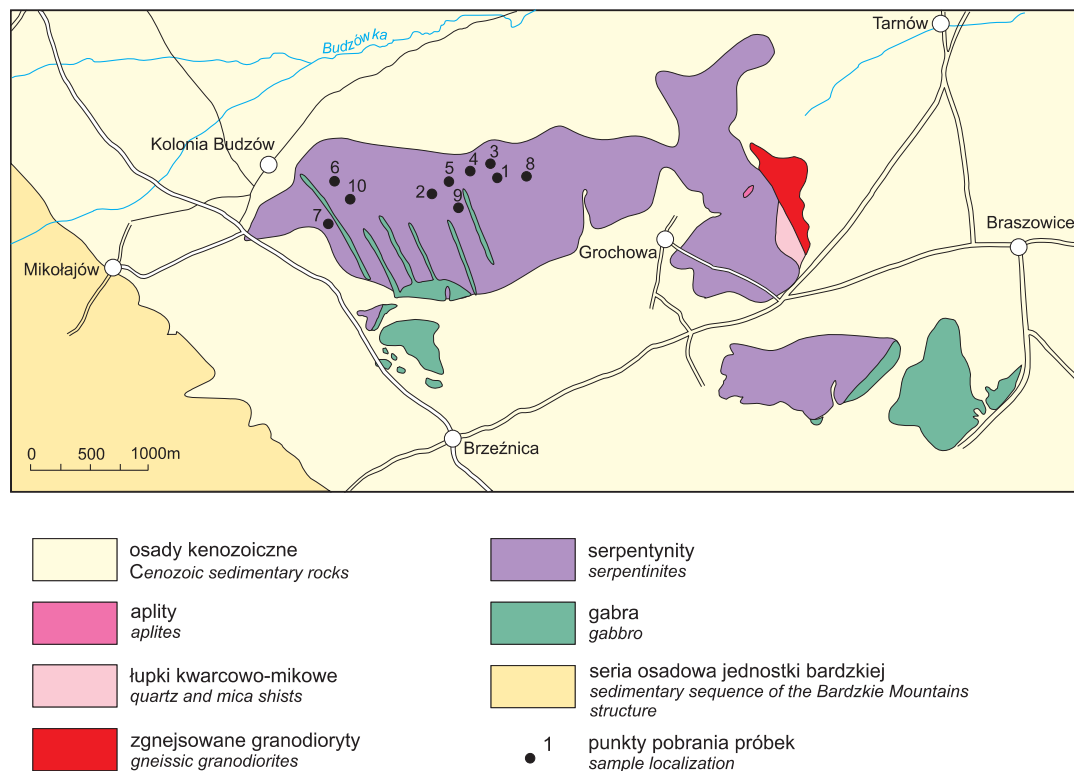


Fig. 3. Mapa geologiczna masywu Braszowice–Brzeznica z utworami kenozoiku (według Gajewskiego, 1974)

Geological map of the Braszowice–Brzeznica massif with Cenozoic sedimentary rocks (after Gajewski, 1974)

### BUDOWA GEOLOGICZNA OBSZARU BADAŃ

Masyw serpentynitowy Braszowice–Brzeznica jest zlokalizowany we wschodniej części Przedgórze Sudeckiego, na południowym krańcu dyslokacyjnej strefy Niemczy (fig. 1). Przedgórze Sudeckie w czasie ruchów tektonicznych w paleogenu zostało obniżone i przykryte osadami paleogenu i neogenu. Omawiany masyw serpentynitowy jest fragmentem paleogeńskiego zrębu Braszowic (Oberc, 1972).

Skały masywu Braszowice–Brzeznica są zaliczane do wokólsowiogórskiej formacji ofiolitowej. Zostały one rozpoznane jako człon zmetamorfizowanych ultramafitów oraz maficznych kumulatów (Jamrozik, 1995). Masyw ten jest fragmentem skorupy oceanicznej, włączonym w obręb skał skorupy kontynentalnej (Dubieńska, Gunia, 1997; Dubieńska i in., 2004; Kądziołko-Hofmokr i in., 2006). Kontakt zmetamorfizowanych skał ultramaficznych masywu Braszowice–Brzeznica ze skałami osłony ma charakter tektoniczny (Jamrozik, 1981). Na zdjęciach grawimetrycznych obserwuje się kontynuację gabr i serpentynitów masywu Braszowice–Brzeznica za uskokiem Sudeckim (Cwojdzński, Żelaźniewicz, 1995)

Zachodnia część masywu jest zbudowana z serpentynitów antygorytowych o barwie od ciemnozielonej do czarnej i teksturze afanitowej. Serpentynity są przecinane dajkami

i apofizami gabrowymi, odchodzącymi od głównego ciała zlokalizowanego u podnóża południowego zbocza wzgórza Mnich i penetrują masyw serpentynitowy od południa (fig. 3). Żyły te przebiegają w kierunku NNW–SSE, osiągając miąższości 0,2–3,0 m. Kontakt serpentynitów z dajkami gabrowymi jest ostry. Serpentynity antygorytowe w strefach kontaktów z dajkami gabrowymi charakteryzują się teksturą łupkową. Są to tzw. serpentynity „ścięciowe” (Gunia, 1992). W pozostałej części pasma Mnicha występują serpentynity charakteryzujące się teksturą masywną.

Serpentynity są zbudowane głównie z antygorytu, pod rządnie występują w nich relikty minerałów pierwotnych – oliwinów i piroksenów (fig. 2), a z minerałów nieprzezroczystych dominują spinele chromowe i magnetyt.

W zachodniej części pasma Mnicha stwierdzono występowanie rodingitów w postaci enkalwy tektonicznej (Gunia, 1986a). Serpentynity wokół tej enklawy są silnie splekane, co może wskazywać na występowanie strefy uskokowej, która mogła stanowić drogę migracji roztworów hydrotermalnych bogatych w wapń (Palandri, Reed, 2003), powodujących przemianę metasomatyczną skały i powstawanie rodingitów.

Serpentynity masywu Braszowice–Brzeźnica są silnie zmineralizowane magnezem, a jego występowanie jest związane z gęstą siecią spękań ciosowych, obejmującą cały masyw (Gajewski, 1974). Mineralizacja ta jest nierównomierna – najbardziej obfita w części wschodniej masywu, w której od początku XIX wieku do chwili obecnej, jest przedmiotem eksploatacji. Na pozostałym obszarze mineralizacja ta jest uboższa – magnezyt tworzy tam siatkę żyłek o grubości dochodzącej tylko do kilku centymetrów (*op. cit.*).

Skały krystaliczne masywu Braszowice–Brzeźnica w partiach brzeźnych masywu są przykryte utworami kenozoicznymi. Osady paleogenu, to głównie miocenijskie skały drobno-klastyczne, takie jak: szare ily, ily piaszczyste, mułki zawierające liczne okruchy skał lokalnych, sporadycznie piaski oraz wkładki węgla brunatnego (*op. cit.*). Obszary pozostające poza zasięgiem paleogeńskiego basenu sedymentacyjnego, czyli wierzchołki wzgórz, ulegały intensywnemu wietrzeniu w warunkach klimatu tropikalnego, w wyniku czego powstały brunatne zwietrzliny serpentynitów, miejscami

silnie przepojone krzemionką, datowane na miocen (Maciejewski, 1968). Procesy hipergeniczne paleogenu przyczyniły się również do wytworzenia niklonosnej zwietrzliny serpentynitów (Jamrozik, 1981). Osady paleogenu sporadycznie występują na powierzchni, zwykle leżą pod nakładem utworów neogenu. Osady neogenu są reprezentowane przez gliny zwałowe, a także piaski i żwiry fluwioglacjalne (Gajewski, 1974). Najmłodsze skały neogenu to gliny deluwialne, leżące na zboczach wzniesień, oraz piaski i żwiry aluwialne.

Schemat budowy geologicznej okolic masywu Braszowice–Brzeźnica jest typowy dla całej strefy Niemczy. Występujące tu skały można zaliczyć do dwóch pięter strukturalnych. Do pierwszego piętra strukturalnego należą tworzące fundament krystaliczny strefy Niemczy bardzo silnie zmetamorfizowane gnejsy i migmatyty, skały masywów serpentynitowych i gabrowych oraz skały kwaśne: granity i granodioryty, a osady paleogenu i neogenu zaliczyć można do drugiego piętra strukturalnego (Peroń, 1979).

## MINERALIZACJA KRUSZCOWA

W skałach masywu Braszowice–Brzeźnica minerały kruszcowe występują w formie tlenków, siarczków, arsenków oraz metali rodzimych. Wśród minerałów kruszczowych pod względem ilościowym dominują minerały tlenkowe – magnetyt i chromit oraz podrzędne ilości hematytu. Siarczki są mniej liczne, jednak zdecydowanie bardziej zróżnicowane pod względem składu chemicznego. Badania mikrosondowe wykonane przez autorkę wykazały, że w badanych skałach dominują siarczki Ni i Fe, różniące się między sobą proporcjami tych dwóch pierwiastków (*tab. 1*), w niewielkich ilościach występują również Co – do 3% wag. Autorka zidentyfikowała następujące minerały kruszcowe: chromit, magnetyt, ferrichromit, hematyt, pentlandyt, heazlewoodyt, milleryt, godlewskit oraz arsenki niklu. Ponadto, w literaturze geologicznej dotyczącej omawianego masywu zostały opisane takie minerały jak ilmenit, polidymit, chalkopiryt, pirotyn, miedź rodzima, awaruit, rutil, oraz minerały platynowców (Gunia, 1992; Sałaciński, 1992; Delura, 2000).

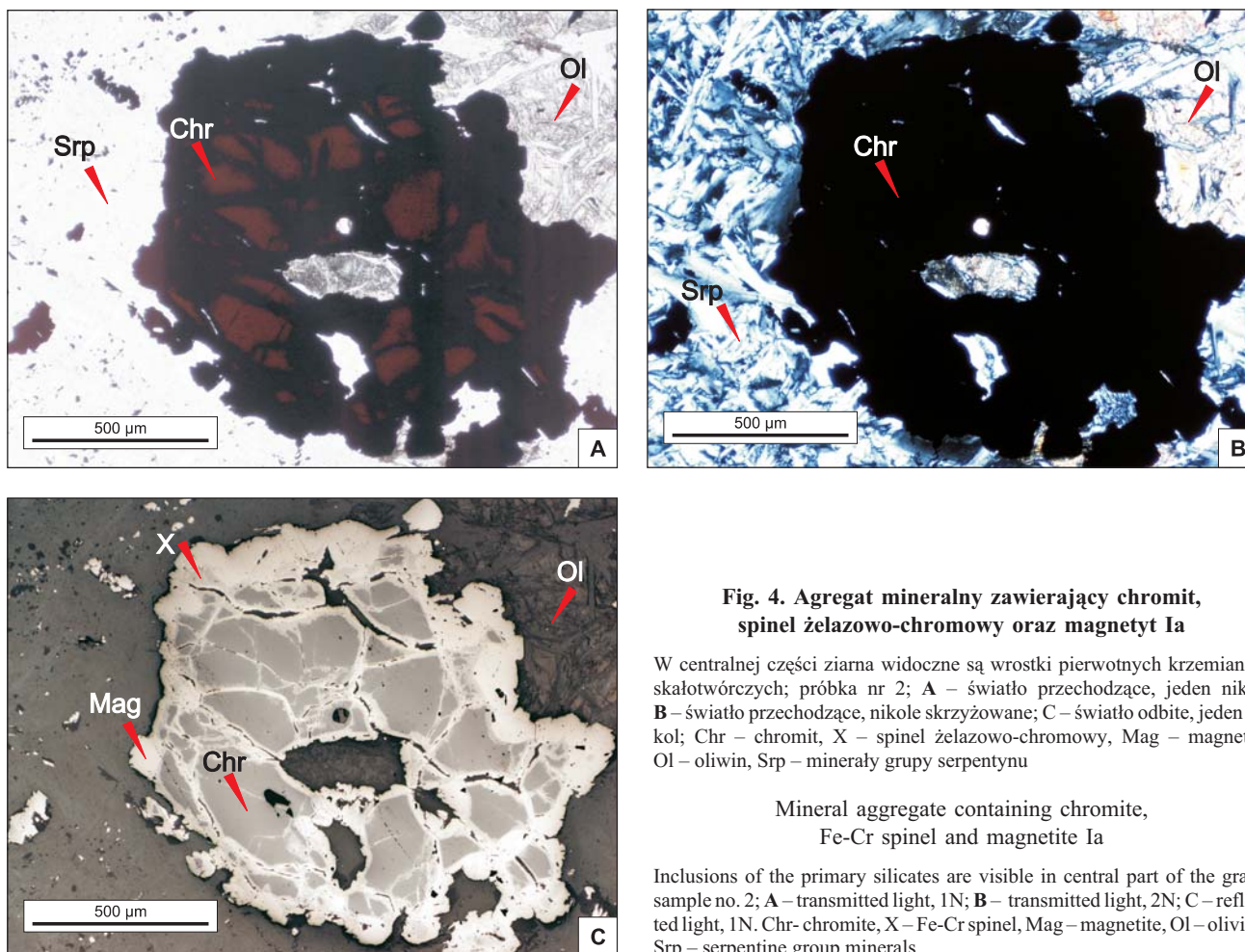
Minerały kruszcowe w badanych skałach występują w formie rozproszonej lub tworzą drobne żyłki. Agregaty mineralne zawierające chromit osiągają rozmiary do 4 mm, zwykle są zaokrąglone lub przyjmują kształt liścia ostrokrzewu, mają wyraźny relief i są silnie spękane (*fig. 4, 5D*). Magnetyt w omawianych skałach występuje w postaci drobnych, rozproszonych ksenomorficznych ziaren, często przerastanych siarczkami. Skupienia magnetytu są zaokrąglone lub przyjmują formę rozetek. Magnetyt często tworzy również skupienia zaokrąglonych drobnych ziarenek <50  $\mu\text{m}$  w pseudomorfozach po oliwinach i piroksenach. Może także występować w formie drobnych żyłek, podkreślających zarys krawędzi pierwotnych minerałów lub spękań w oliwinie (*fig. 5A*). Siarczki tworzą bardzo drobne ziarna <100  $\mu\text{m}$ , ksenomorficzne, rozrzucone pojedynczo w tle skalnym lub

przerastające się z magnetytem. Często stanowią one pseudomorfozy po wcześniejszych minerałach siarczkowych. Charakterystycznym tego przykładem są pseudomorfozy millerytu po pentlandycie, z widocznymi spękaniami zatokowymi typowymi dla pierwotnego pentlandytu. W nielicznych siarczkach występują bardzo małe wrostki arsenków niklu nieprzekraczające 1  $\mu\text{m}$ . Zwykle siarczki budują agregaty, w których nie jest możliwe odróżnienie poszczególnych minerałów, ponieważ ich właściwości optyczne są zbliżone, a przejścia pomiędzy poszczególnymi minerałami zachodzą w sposób ciągły (*fig. 6*).

**Chromit** w badanych skałach jest obecny w formie reliktywów w agregatach mineralnych o wielkości do 3,0–4,0 mm, bezładnie rozproszonych w całej masie skały (*fig. 4, 5D*). Oprócz chromitu w skład tych agregatów wchodzi jeszcze dwa zastępujące go minerały: spinel żelazowo-chromowy (ferrichromit) oraz magnetyt Ia (*fig. 4, 5D*).

Chromit występujący w postaci reliktywów przeciętnie zawiera 38% wag.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 25% wag.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 5% wag.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 10% wag.  $\text{MgO}$  oraz 19% wag.  $\text{FeO}$  (*tab. 2, fig. 7*). Poza chromem i żelazem, w strukturze spineli chromowych może występować również glin i magnez. Chromit stwierdzony przez autorkę jest wzbogacony w  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (*fig. 8*).

**Spinel żelazowo-chromowy** (ferrichromit) jest produktem przemian pierwotnego chromitu i stanowi on fazę pośrednią w szeregu izostrukturnalnym chromit-magnetyt. Tworzy on obwódki wokół chromitowych jąder lub zastępuje je całkowicie, sam natomiast jest otoczony przez magnetyt (*fig. 4, 5D*). W obrębie tego spinelu obserwuje się czasami jedną lub dwie obwódki zbudowane z wrostków krzemianowych, prawdopodobnie minerałów grupy serpentynu, ułożenie łańcuszkowo wzdłuż krawędzi ziarna (*fig. 9*). Ponadto, w szerokich strefach spinelu żelazowo-chromowego mogą



**Fig. 4. Agregat mineralny zawierający chromit, spinel żelazowo-chromowy oraz magnetyt Ia**

W centralnej części ziarna widoczne są wrostki pierwotnych krzemianów skałotwórczych; próbka nr 2; **A** – światło przechodzące, jeden nikol; **B** – światło przechodzące, nikole skrzyżowane; **C** – światło odbite, jeden nikol; Chr – chromit, X – spinel żelazowo-chromowy, Mag – magnetyt, Ol – oliwin, Srp – minerały grupy serpentynu

Mineral aggregate containing chromite,  
Fe-Cr spinel and magnetite Ia

Inclusions of the primary silicates are visible in central part of the grain; sample no. 2; **A** – transmitted light, 1N; **B** – transmitted light, 2N; **C** – reflected light, 1N. Chr – chromite, X – Fe-Cr spinel, Mag – magnetite, Ol – olivine, Srp – serpentine group minerals

występować wrostki minerałów grupy serpentynu w postaci krzyżujących się listewek ułożonych zgodnie z kierunkami sieci krystalicznej gospodarz (fig. 10).

Spinel żelazowo-chromowy ma skład chemiczny pośredni pomiędzy chromitem i magnetytem, średnio zawiera on 31% wag.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 1–2% wag.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 35% wag.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 26% wag.  $\text{FeO}$  oraz 2% wag.  $\text{MgO}$  (tab. 3). Spinel żelazowo-chromowy powstaje w wyniku usuwania chromu, glinu i magnezu z pierwotnego chromitu i podstawiania w jego miejsce żelaza pochodzącego z rozpadu oliwinów i piroksenów.

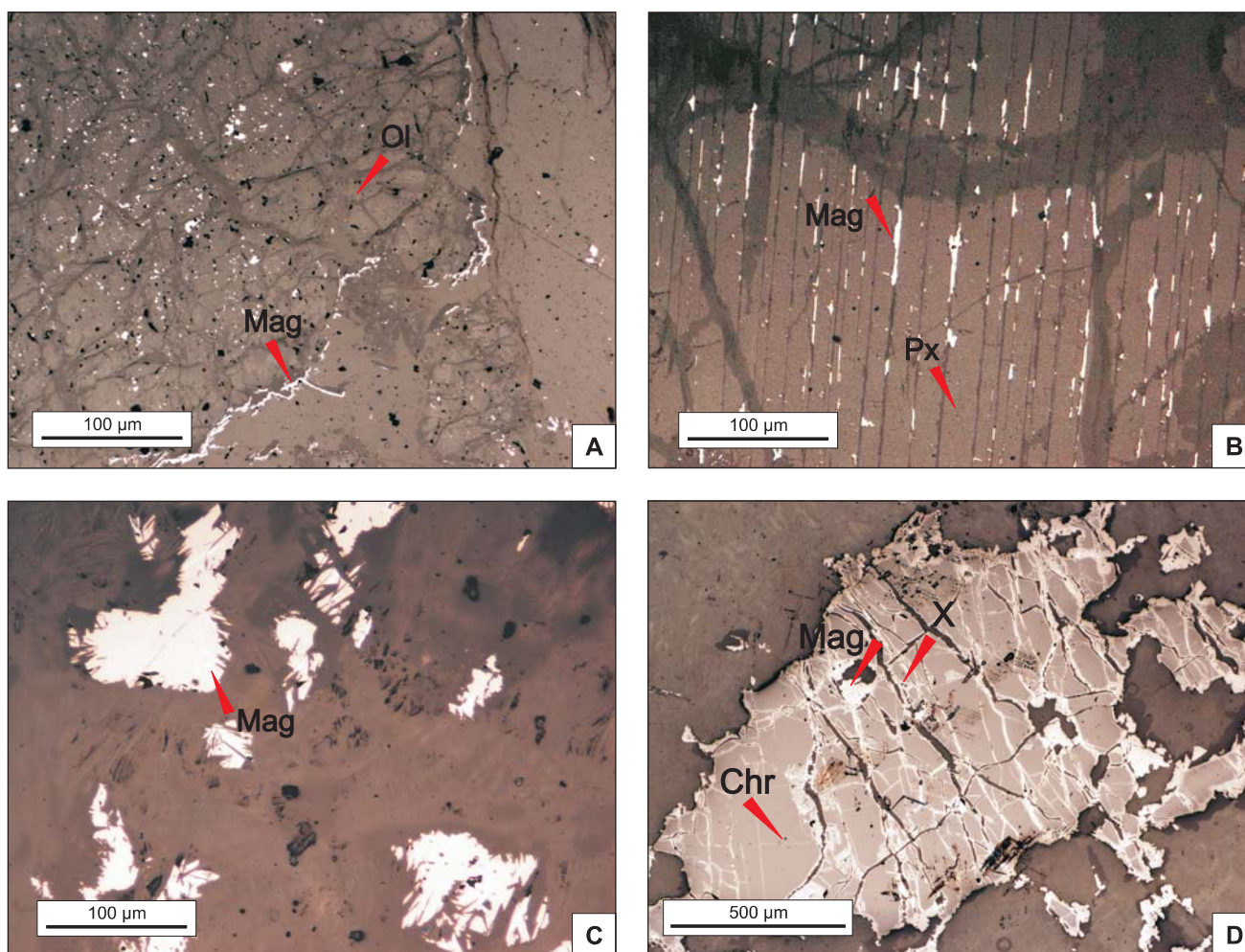
**Magnetyt Ia** występuje w agregatach mineralnych obok spinelu żelazowo-chromowego i chromitu. Tworzy obwódki wokół rozproszonych ziaren chromitów (fig. 4C, 5D). W czasie procesu serpentynizacji chromit jest zastępowany spinelem żelazowo-chromowym, a następnie magnetytem Ia. Przemiany te rozpoczynają się na brzegach ziaren chromitów oraz wzdłuż spekań, zatem w agregatach mineralnych powstałych w wyniku przemian chromitów magnetyt stanowi ich najbardziej zewnętrzną część (fig. 4C, 5D).

W niektórych ziarnach w obrębie obwódek magnetytowych można zaobserwować jaśniejsze, bezładnie rozrzucone igielki hematytowe (fig. 11). Są to efekty martytyzacji, czyli

procesu zastępowania magnetytu przez hematyt, związane z procesem utleniania. Dodatkowo na zmartytyzowanych ziarnach magnetytu widoczne są ciemnoszare plamy o chropowatej powierzchni, związane zapewne również z procesem utleniania, prawdopodobnie jest to goethyt (fig. 11). Ponadto w magnetycie Ia mogą występować liczne wrostki siarczków niklu i żelaza.

Otoczki magnetytowe mogą mieć różną szerokość, początkowo bardzo niewielką, wynoszącą kilka  $\mu\text{m}$ , natomiast w miarę postępu procesów metamorficznych magnetyt może całkowicie zastąpić spinel chromowy. Magnetyt Ia w swoim składzie chemicznym zawiera średnio 55–61% wag.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , około 28% wag.  $\text{FeO}$ , 8–12% wag.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 1% wag.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz 1% wag.  $\text{MgO}$  (tab. 4).

**Magnetyt Ib** jest minerałem wtórnym. Występującym w pseudomorfozach po oliwinach i piroksenach. Przyjmuje on formę ksenomorficznych, zaokrąglonych, niekiedy amebowatych ziaren. Osobniki magnetytu Ib zwykle nie przekraczają wielkości około 0,2 mm. Pseudomorfozy magnetytu po oliwinie przyjmują formę chmurzastych skupień ziaren magnetytu (fig. 5A). Magnetyt Ib może krystalizować w postaci żyłek, podkreślających zarys krawędzi pierwotnych pi-



**Fig. 5. Wykształcenie magnetytu w badanych serpentynitach z masywu Braszowice–Brzeźnica**

**A** – ksenomorficzne, zaokrąglone ziarna wtórnego magnetytu Ib, występujące w chmurzastych skupieniach w pseudomorfozach po oliwinach oraz na krawędziach ziaren oliwinu; próbka nr 9; światło odbite, jeden nikol; **B** – ksenomorficzne ziarna wtórnego magnetytu Ib krystalizującego wzdłuż szczelin łupliwości piroksenu; próbka nr 7; światło odbite, jeden nikol; **C** – ziarna wtórnego magnetytu II przerosnięte na brzegach z minerałami grupy serpentynu; próbka nr 6; światło odbite, jeden nikol; **D** – agregat mineralny zawierający pierwotny chromit, wtórny spinel żelazowo-chromowy (ferrichromit) oraz magnetyt Ia; próbka nr 8; światło odbite, jeden nikol; Mag – magnetyt, Ol – oliwin, Px – piroksen, X – spinel żelazowo-chromowy, Chr – chromit

#### Magnetite in serpentinites from Braszowice–Brzeźnica massif

**A** – xenomorphic, rounded grains of the secondary magnetite Ib in cloudy cluster after olivine and along the edge of the olivine; sample no. 9; reflected light, 1N; **B** – xenomorphic grains of the secondary magnetite Ib crystallized along the cleavage cracks of the relic pyroxene; sample no. 7; reflected light, 1N; **C** – secondary magnetite II overgrown with serpentine group minerals on the edge of the grain; sample no. 6; reflected light, 1N; **D** – mineral aggregate containing primary chromite, secondary Fe-Cr spinel (ferrichromite) and magnetite Ia; sample no. 8; reflected light, 1N; Mag – magnetite, Ol – olivine, Px – pyroxene, X – ferrichromite, Chr – chromite

roksenów i oliwinów. Krystalizuje on też wzdłuż spękań i płaszczyzn łupliwości w tych minerałach. Występuje on także w pseudomorfozach po piroksenach (fig. 5B). Magnetyt Ib wytrąca się również wzdłuż szczelin łupliwości piroksenu, czyli w miejscach złuznień, do których fluidy przeobrażające skałę docierają w pierwszej kolejności.

Magnetyt II występuje w postaci bezładnie rozrzuconych ziaren w tle skalnym. Ziarna magnetytu II mają rozmiary, przeciętnie około 0,1 mm, są ksenomorficzne, na krawę-

dziach są zazwyczaj poprzerastane z krzemianami z grupy serpentynów, co nadaje im charakterystyczny poszrapyany zarys (fig. 5C). Często w obrębie magnetytu II są zamknięte siarczki, osiągające wielkość nawet 0,5 mm lub przerastają się z mniejszymi osobnikami o wielkości 0,1 mm. Ponadto magnetyt II krystalizuje na wcześniejszych odmianach magnetytu, przez co zatracają one swoje pierwotne kształty.

**Hematyt** występuje w niewielkich ilościach. Najbardziej charakterystyczną postać przyjmuje hematyt występujący

Tabela 1

Przykłady analiz chemicznych siarczków występujących w serpentynitach antygorytowych masywu Braszowice–Brzeźnica (%wag).  
Próbka nr 9

Example of chemical analyses of sulphides from serpentinites of the Braszowice–Brzeźnica massif (wt.%).  
Sample no 9

	Pentlandyt					Milleryt					Heazlewoodyt										Godlewskit	
	Numery analiz																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Fe	29,82	30,67	30,33	2,67	0,86	2,00	1,15	0,14	0,54	0,37	0,41	1,71	1,76	0,36	0,57	2,14	3,13	4,68	0,58	0,27		
Cu	0,00	0,00	0,00	0,12	0,03	0,02	0,00	0,09	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Ni	32,48	32,68	31,49	66,52	64,46	71,96	73,20	72,81	73,24	73,62	73,12	71,64	72,14	72,90	72,07	72,14	72,13	71,01	73,40	67,56		
Co	3,18	3,16	5,37	0,15	0,07	0,01	0,00	0,02	0,07	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01	0,05	0,05		
As	0,01	0,01	0,04	0,03	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,05	0,03	0,01	0,05	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04	0,04	0,03		
S	33,43	33,00	33,32	32,52	35,48	26,48	27,10	26,36	27,12	26,54	26,93	27,01	26,51	26,32	26,72	26,61	26,33	26,55	26,84	33,07		
Sb	0,04	0,02	0,01	0,02	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,01	0,03	0,00	0,00	0,09	0,00		
Suma	98,96	99,55	100,56	102,02	100,90	100,49	101,49	99,42	100,97	100,60	100,49	100,37	100,46	99,70	99,38	100,98	101,59	102,29	101,01	100,99		

w postaci martytu (fig. 11). Martyt występuje we wszystkich typach magnetytu. Proces martytyzacji zaczyna się od brzegów ziaren magnetytu, tam listewek hematytowych jest najwięcej, natomiast przesuując się ku centralnym strefom ziarna magnetytu ich ilość maleje. Proces martytyzacji objął skałę dość nierównomiernie, a w wielu miejscach wcale się go nie obserwuje.

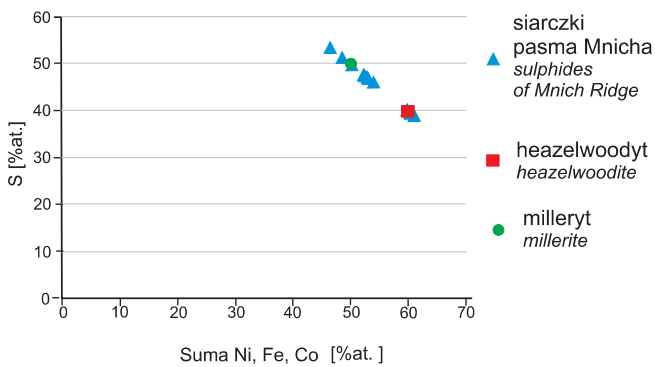
**Heazlewoodyt** ( $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ) jest minerałem charakterystycznym dla skał serpentynowych. Jego kryształy są ksenomorficzne, niekiedy amebowate o lekko zaokrąglonych krawędziach (fig. 12B). W serpentynitach antygorytowych masywu Braszowice–Brzeźnica heazlewoodyt obserwowano w większości badanych próbek. Skład chemiczny heazlewoodytu charakteryzuje się zawartością niklu w wysokości około 72% wag. oraz około 26% wag. siarki. Może się również występować w niewielkich ilościach Fe – do kilku % wagowych.

**Pentlandyt** ( $\text{Ni,Fe}$ ) $9\text{S}8$  tworzy kryształy zaokrąglone, które często są zamknięte w obrębie magnetytu II. Osiągają one przeciętnie około 20  $\mu\text{m}$  (fig. 12A). Charakterystyczną cechą pentlandytu są spękania zatokowe. Zwykle w czasie serpentynizacji pentlandyt jest zastępowany przez inne siarczki, takie jak heazlewoodyt czy milleryt. Pseudomorfozy takie mają cechy optyczne nowych minerałów, jednak pozostają w nich popentlandytowe spękania zatokowe. W obrębie ziarna pentlandytu rozpoznano wrostek arsenku niklu o wielkości 1  $\mu\text{m}$ . Analizy w mikroobszarze wykazały, że pentlandyt zawiera zwykle kilkuprocentową domieszkę Co.

**Milleryt** ( $\text{NiS}$ ) jest pospolitym siarczkiem w serpentynitach antygorytowych pasma Mnicha. Ziarna millerytu mają niewielkie rozmiary (50–100  $\mu\text{m}$ ), są ksenomorficzne, często zaokrąglone i prześnią te z magnetytem oraz innymi minerałami siarczkowymi. Milleryt jest znany jako produkt przeobrażeń siarczków zawierających nikiel. W serpentynitach masywu Braszowice–Brzeźnica występuje w pseudomorfozach po pentlandycie.

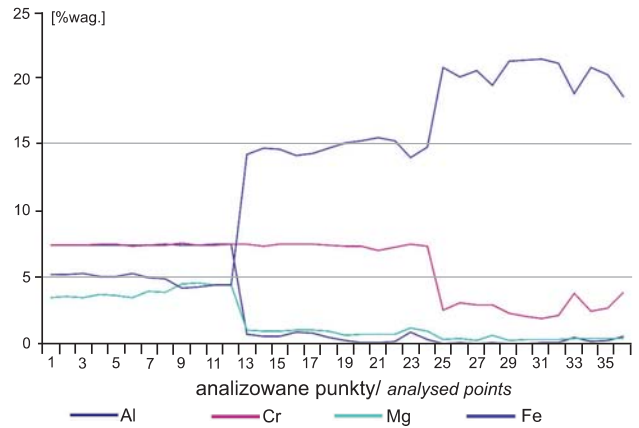
**Godlewskit** ( $\text{Ni}_7\text{S}_6$ ) w serpentynitach masywu Braszowice–Brzeźnica występuje sporadycznie. Podobnie jak milleryt i heazlewoodyt został również zidentyfi-





**Fig. 6. Stosunek zawartości sumy Ni, Fe i Co do zawartości siarki w składzie chemicznym siarczków w serpentynitach antygorytowych zachodniej części masywu Braszowice-Brzeźnica**

Ni, Fe and Co content in relation to sulphur in chemical composition of the sulphides documented in antigorite serpentinites of the western part of the Braszowice-Brzeźnica massif

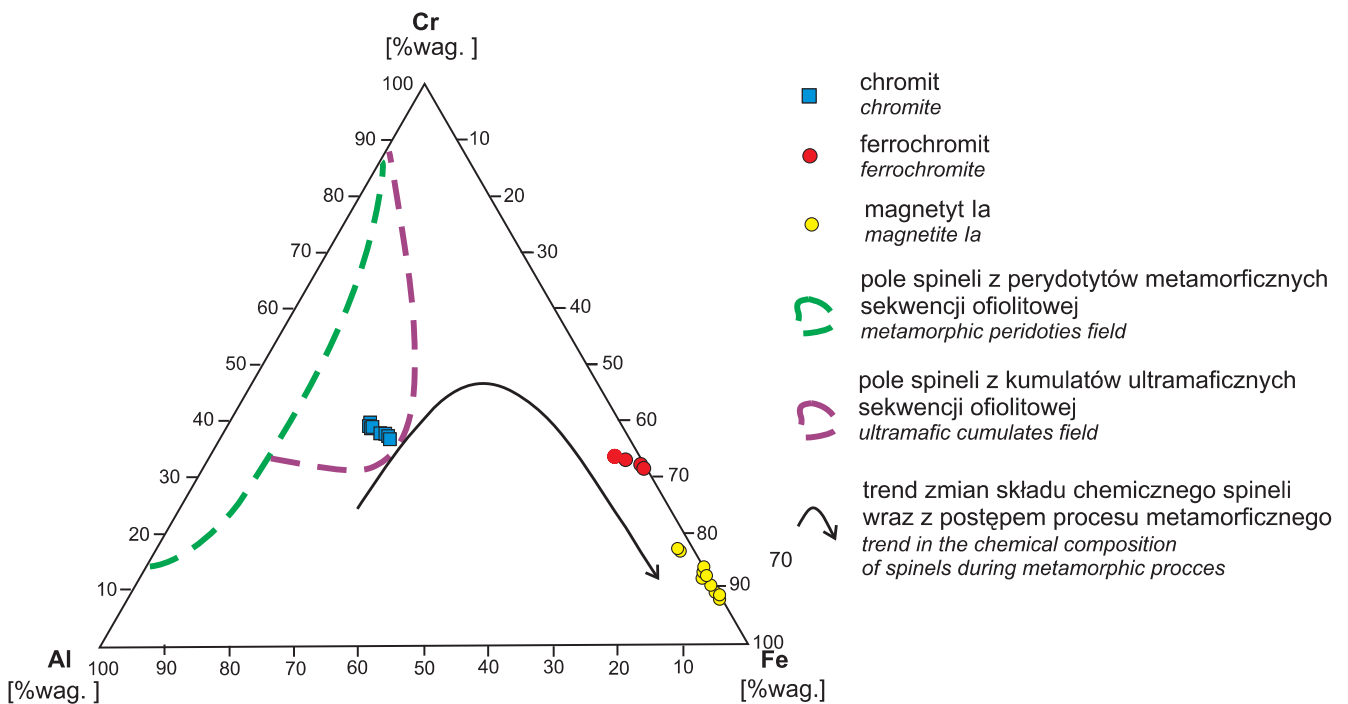


**Fig. 7. Zmiany zawartości Al, Cr, Mg i Fe w agregatach chromitowych**

Analizy 1-12 przeprowadzono w strefie chromitu, analizy 13-24 w strefie spinelu żelazowo-chromowego, analizy 25-36 w strefie magnetytu Ia; próbka nr 5

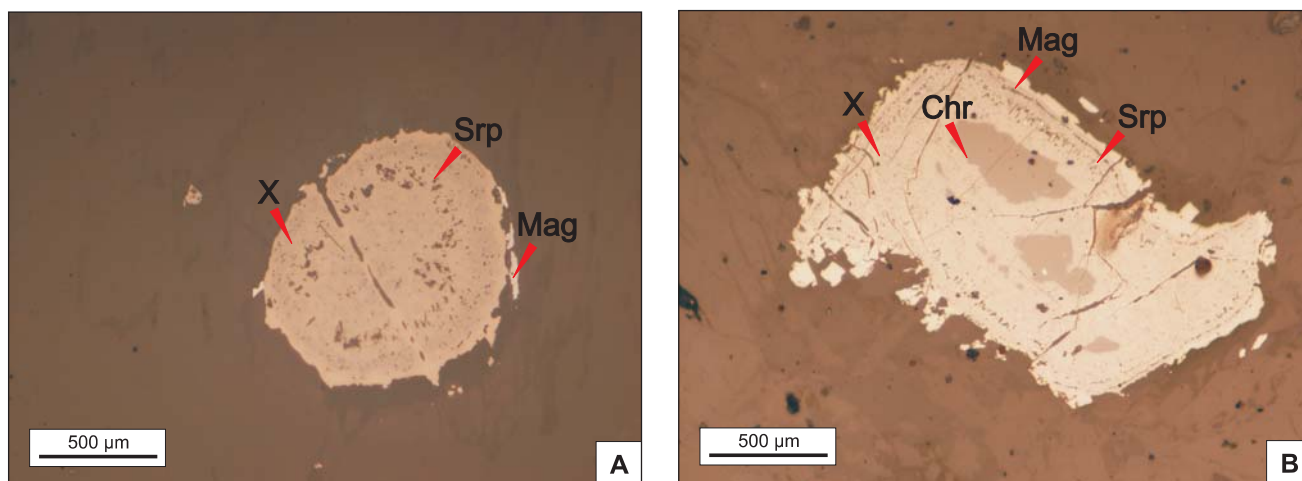
Variation in Al, Cr, Mg and Fe content in chromite aggregates

Analyses 1-12 documented chromite zone, analyses 13-24 documented Fe-Cr spinel zone, analyses 25-36 documented magnetite Ia zone; sample no.5



**Fig. 8. Analizy chemiczne chromitu, ferrichromitu oraz magnetytu Ia z masywu Braszowice-Brzeźnica przedstawione na diagramie trójkątnym Al-Fe-Cr (według Stevensa, 1944)**

Chemical analyses of chromite, ferrichromite and magnetite Ia, from serpentinites from the Braszowice-Brzeźnica massif shown on Al-Fe-Cr ternary diagram (after Stevens, 1944)

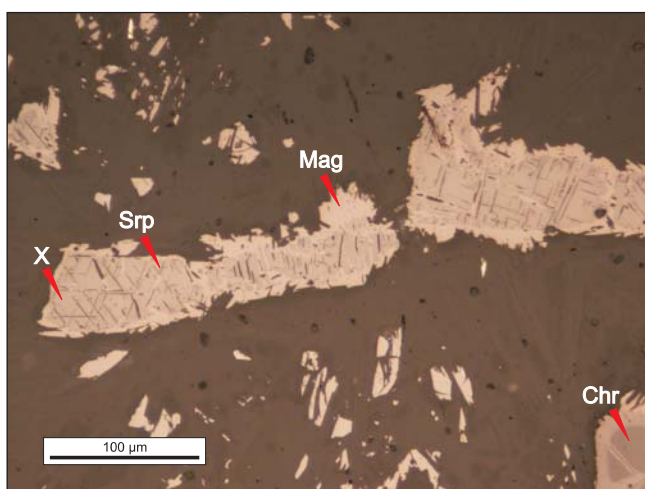


**Fig. 9. Zaokrąglone ziarna reliktowych spineli chromowych występujących w serpentynitach antygorytowych masywu Braszowice–Brzeźnica**

W strefie spinelu żelazowo-chromowego widoczne obwódki zbudowane z minerałów krzemianowych; próbka nr 5; **A** – ziarno z zachowanym reliktem chromitu, **B** – ziarno całkowicie przeobrażone w ferrichromit z wąską otoczką magnetytu Ia; światło odbite, jeden nikol; Chr – chromit, X – spinel żelazowo-chromowy, Mag – magnetyt, Srp – minerały grupy serpentynu

Rounded Cr-spinels relict grains from antigorite serpentinites from the Braszowice–Brzeźnica massif

The rim of Fe-Cr spinel contains mineral inclusions of silicates; sample no. 5; **A** – grain with Cr-spinel in the central part, reflected light, one nicole; **B** – completely replaced by ferrichromite grain with narrow magnetite Ia rim, reflected light, one nicole; Chr – chromite, X – Fe-Cr spinel, Mag – magnetite, Srp – serpentine group minerals

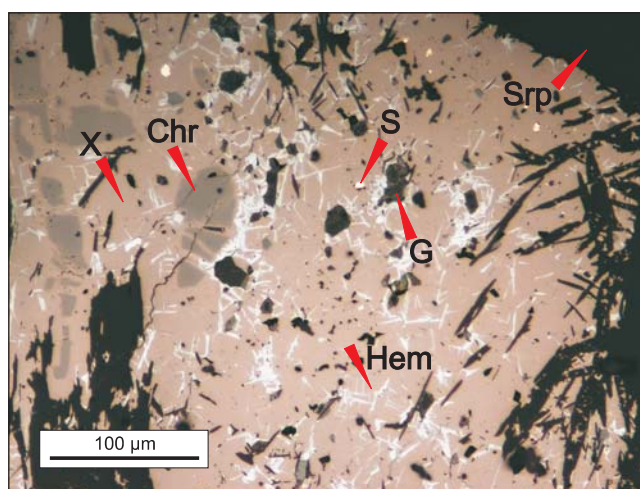


**Fig. 10. Reliktowe ziarno spinelu chromowego występujące w serpentynitach antygorytowych masywu Braszowice–Brzeźnica, otoczone magnetytem Ia**

W strefie spinelu żelazowo-chromowego widoczne wrostki minerałów grupy serpentynu układające się zgodnie z jego siecią krystaliczną; próbka nr 10, światło odbite, jeden nikol; Chr – chromit, X – spinel żelazowo-chromowy, Mag – magnetyt, Srp – minerały grupy serpentynu

Cr-spinel relic grain from antigorite serpentinites from the Braszowice–Brzeźnica massif, surrounded by magnetite Ia

In Fe-Cr spinel zone, along direction of its crystal structure are visible inclusions of serpentine group minerals; sample no. 10; reflected light, one nicole; Chr – chromite, X – Fe-Cr spinel, Mag – magnetite, Srp – serpentine group minerals



**Fig. 11. Reliktowe ziarno spinelu chromowego z szeroko rozwiniętą strefą magnetytu Ia**

W obrębie magnetytu rozwinął się proces martytyzacji zaznaczający się rozrzuconymi bezładnie igielkami hematytu; próbka nr 4, światło odbite, jeden nikol; Chr – chromit, X – spinel żelazowo-chromowy, Hem – hematyt, S – siarczek, Srp – minerały grupy serpentynu, G – goethyt

Chromite relict grain with wide-developed zone of the magnetite Ia

Within magnetite has developed process of martitisation, which result in crystallization of needles of hematite; sample no. 4, reflected light, one nicole; Chr – chromite, X – Fe-Cr spinel, Hem – hematite, S – sulphide, Srp – serpentine group minerals, G – goethite

Tabela 2

**Przykłady analiz chemicznych magnetytu Ia występującego w postaci najbardziej zewnętrznej obwódki reliktowych ziaren chromitów (% wag.) w serpentynitach masywu Braszowice–Brzeźnica. Próbką nr 5**

Example of chemical analyses of magnetite Ia from serpentinites of the Braszowice–Brzeźnica massif (wt.%). Recalculated on 24 cations. Sample no. 5

	Numer analizy											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,04	0,15	0,13	0,09	0,09	0,13	0,16	0,17	0,28	0,11	0,24
SiO <sub>2</sub>	0,01	0,03	0,05	0,87	0,10	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,15	0,02	0,32	0,00	0,04	0,20	0,30	1,26	0,46	0,73	1,60
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,67	12,95	12,13	12,14	9,46	8,57	7,89	8,78	16,07	10,15	11,36	16,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,61	56,21	57,11	55,57	59,76	60,81	61,48	60,22	51,27	58,51	56,63	50,69
MgO	0,75	0,96	0,58	1,33	0,57	0,79	0,68	0,75	0,95	0,82	0,95	0,96
MnO	0,33	0,31	0,49	0,52	0,36	0,10	0,11	0,30	0,78	0,29	0,40	1,03
FeO	29,44	28,83	29,86	27,29	29,89	29,59	29,63	29,34	28,65	29,68	28,97	28,39
NiO	0,49	0,80	0,22	1,39	0,20	0,43	0,67	0,62	0,31	0,18	0,37	0,30
ZnO	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,07	0,36
Suma	100,66	100,42	100,74	99,75	100,47	100,50	100,87	100,57	99,89	100,46	99,77	99,92
Przeliczono na 24 kationy												
V	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,06	0,02	0,05
Si	0,00	0,01	0,02	0,26	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Al	0,02	0,05	0,01	0,11	0,00	0,02	0,07	0,11	0,45	0,16	0,26	0,57
Cr	2,55	3,09	2,90	2,89	2,27	2,06	1,89	2,10	3,83	2,42	2,72	3,86
Fe	13,34	12,79	12,99	12,59	13,65	13,88	13,99	13,71	11,63	13,30	12,93	11,47
Mg	0,34	0,43	0,26	0,60	0,26	0,36	0,31	0,34	0,43	0,37	0,43	0,43
Mn	0,09	0,08	0,13	0,13	0,09	0,03	0,03	0,08	0,20	0,07	0,10	0,26
Fe	7,45	7,29	7,55	6,87	7,59	7,51	7,49	7,42	7,22	7,50	7,35	7,14
Ni	0,12	0,19	0,05	0,34	0,05	0,11	0,16	0,15	0,08	0,04	0,09	0,07
Zn	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,02	0,08
Suma	23,96	23,98	23,96	23,87	23,97	23,98	23,97	23,97	23,96	23,95	23,97	23,96

kowany za pomocą badań mikrosondowych. W swoim składzie chemicznym zawiera 67% wag. Ni oraz 33% wag. S.

**Arsenki niklu** zostały oznaczone na podstawie analizy mikrosondowej. Minerale te tworzą bardzo drobne wrostki

w siarczku. W obrębie pentlandytu zidentyfikowano zaokrąglone ziarno arsenku niklu, którego wielkość nie przekraczała 1 µm. Analizy składu chemicznego arsenków wyraźnie różnią się między sobą. Pierwszy minerał zawiera 67% wag. Ni, 15% wag. As, 18% wag. S oraz niewielką do-

Tabela 3

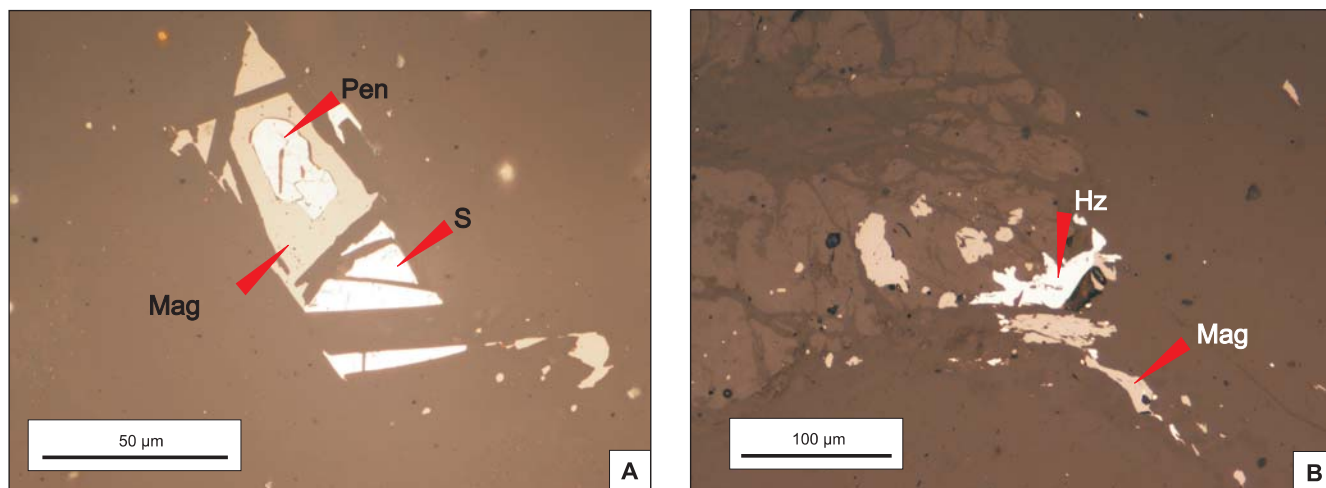
**Przykłady analiz chemicznych spinelu żelazowo-chromowego występującego w otoczkach pierwotnych chromitów (% wag.) w serpentynitach masywu Braszowice–Brzeźnica przeliczone na 24 kationy**

Example of chemical analyses of Fe-Cr spinels from serpentinites of the Braszowice–Brzeźnica massif (wt.%). Recalculated on 24 cations

	Numery analiz											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,07	0,14	0,07	0,09	0,15	0,15	0,13	0,13	0,13	0,08	0,15
SiO <sub>2</sub>	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,12	1,63	1,53	2,43	2,20	1,36	0,63	0,30	0,15	0,51	2,43	0,91
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,06	31,00	31,80	32,07	31,80	31,18	30,82	30,62	29,26	30,34	32,24	30,86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,27	35,54	35,27	33,60	34,14	35,44	36,24	36,88	38,27	36,70	33,68	36,39
MgO	2,31	2,13	2,11	2,32	2,35	2,05	1,49	1,63	1,57	1,55	2,61	2,18
MnO	0,81	0,64	0,81	0,74	0,59	0,73	1,28	0,90	0,90	0,96	0,70	1,03
FeO	26,73	26,80	26,95	26,78	26,71	26,86	27,06	27,04	26,33	27,04	26,16	26,18
NiO	0,39	0,49	0,43	0,41	0,41	0,40	0,31	0,38	1,00	0,45	0,51	0,58
ZnO	0,23	0,24	0,19	0,06	0,22	0,20	0,23	0,26	0,38	0,21	0,27	0,14
Suma	99,37	98,76	99,39	98,67	98,76	98,60	98,49	98,49	98,31	98,20	98,91	98,66
Przeliczono na 24 kationy												
V	0,04	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
Si	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,74	0,58	0,54	0,85	0,77	0,48	0,22	0,11	0,06	0,18	0,85	0,32
Cr	7,50	7,34	7,48	7,55	7,49	7,40	7,38	7,35	7,05	7,29	7,55	7,33
Fe	7,63	8,01	7,89	7,52	7,65	8,01	8,26	8,42	8,77	8,40	7,51	8,23
Mg	1,02	0,95	0,94	1,03	1,04	0,92	0,67	0,74	0,71	0,70	1,15	0,98
Mn	0,20	0,16	0,20	0,19	0,15	0,19	0,33	0,23	0,23	0,25	0,18	0,26
Fe	6,62	6,71	6,71	6,66	6,65	6,74	6,86	6,86	6,71	6,88	6,48	6,58
Ni	0,09	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,07	0,09	0,25	0,11	0,12	0,14
Zn	0,05	0,05	0,04	0,01	0,05	0,05	0,05	0,06	0,09	0,05	0,06	0,03
Suma	23,95	23,97	23,97	23,97	23,97	23,96	23,95	23,96	23,95	23,95	23,97	23,96

mieszką Fe – około 1,7% wag. (fig. 13). Siarka występująca w składzie chemicznym badanego arsenku, ze względu na jego bardzo małe rozmiary (1 μm), może pochodzić z zewnątrz, to jest z otaczającego go siarczku. Drugi niestechiometryczny arsenek niklu o wzorze zbliżonym do Ni<sub>2</sub>As w swoim składzie

właściwie w ogóle nie zawiera siarki, zawiera Ni – 61% wag. i As – 36% wag., występują również domieszki Fe – 5% wag. oraz Sb – 2% wag. Jego skład chemiczny jest pośredni pomiędzy dieneritem a maucherytem.

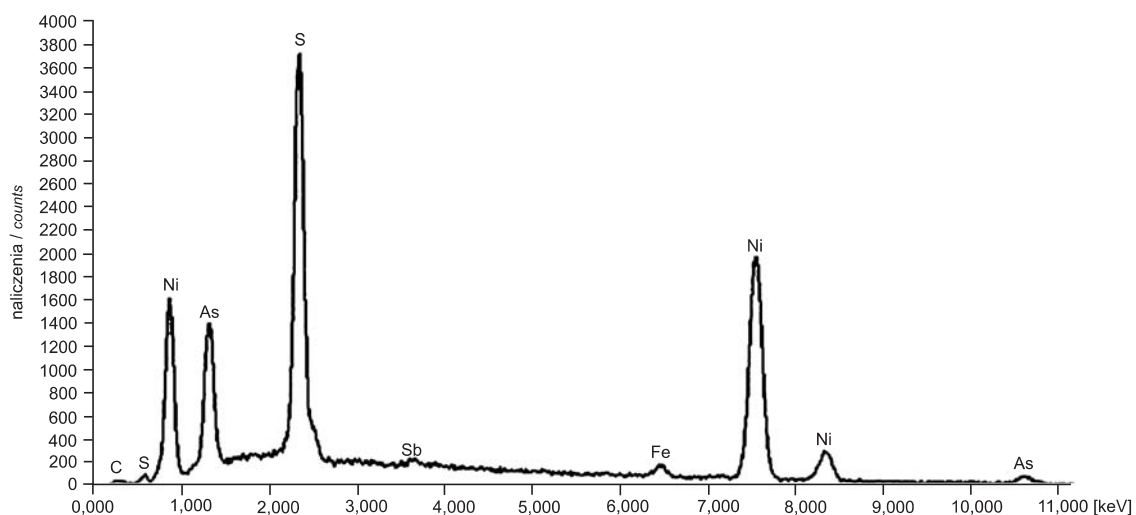


**Fig. 12. Siarczki występujące w serpentynitach masywu Braszowice–Brzeźnica**

**A** – ksenomorficzne ziarno pentlandytu otoczone przez magnetyt II oraz ksenomorficzne ziarno siarczku; próbka nr 3; światło odbite, jeden nikol; **B** – ksenomorficzne ziarno heazlewoodytu w sąsiedztwie magnetytu II; próbka nr 9; światło odbite, jeden nikol; Mag – magnetyt, Pen – pentlandyt, Hz – heazlewoodyt, S – siarczek

#### Sulphide minerals from the Braszowice–Brzeźnica massif

**A** – xenomorphic pentlandite surrounded by magnetite II and xenomorphic sulphide; sample no. 3; reflected light, 1N; **B** – xenomorphic heazlewoodite next to magnetite II; reflected light, 1N; sample no. 9; Mag – magnetite, Pen – pentlandite, Hz – heazlewoodite, S – sulphide



**Fig. 13. Widmo rentgenowskiego promieniowania charakterystycznego arsenku niklu występującego w postaci wrostka w pentlandycie**

Próbka nr 9

Characteristic X-ray spectrum of nickel arsenide inclusion in pentlandite

Sample no. 9

Tabela 4

**Przykłady analiz chemicznych magnetytu Ia występującego w postaci najbardziej zewnętrznej obwódki reliktowych ziaren chromitów (% wag.) w serpentynitach masywu Braszowice–Brzeźnica w próbie nr 5**

Example of chemical analyses of magnetite Ia from serpentinites of the Braszowice–Brzeźnica massif (wt.%). Recalculated on 24 cations in sample no 5

	Numer analizy											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,04	0,15	0,13	0,09	0,09	0,13	0,16	0,17	0,28	0,11	0,24
SiO <sub>2</sub>	0,01	0,03	0,05	0,87	0,10	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,15	0,02	0,32	0,00	0,04	0,20	0,30	1,26	0,46	0,73	1,60
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,67	12,95	12,13	12,14	9,46	8,57	7,89	8,78	16,07	10,15	11,36	16,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,61	56,21	57,11	55,57	59,76	60,81	61,48	60,22	51,27	58,51	56,63	50,69
MgO	0,75	0,96	0,58	1,33	0,57	0,79	0,68	0,75	0,95	0,82	0,95	0,96
MnO	0,33	0,31	0,49	0,52	0,36	0,10	0,11	0,30	0,78	0,29	0,40	1,03
FeO	29,44	28,83	29,86	27,29	29,89	29,59	29,63	29,34	28,65	29,68	28,97	28,39
NiO	0,49	0,80	0,22	1,39	0,20	0,43	0,67	0,62	0,31	0,18	0,37	0,30
ZnO	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,07	0,36
Suma	100,66	100,42	100,74	99,75	100,47	100,50	100,87	100,57	99,89	100,46	99,77	99,92
Przeliczono na 24 kationy												
V	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,06	0,02	0,05
Si	0,00	0,01	0,02	0,26	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Al	0,02	0,05	0,01	0,11	0,00	0,02	0,07	0,11	0,45	0,16	0,26	0,57
Cr	2,55	3,09	2,90	2,89	2,27	2,06	1,89	2,10	3,83	2,42	2,72	3,86
Fe	13,34	12,79	12,99	12,59	13,65	13,88	13,99	13,71	11,63	13,30	12,93	11,47
Mg	0,34	0,43	0,26	0,60	0,26	0,36	0,31	0,34	0,43	0,37	0,43	0,43
Mn	0,09	0,08	0,13	0,13	0,09	0,03	0,03	0,08	0,20	0,07	0,10	0,26
Fe	7,45	7,29	7,55	6,87	7,59	7,51	7,49	7,42	7,22	7,50	7,35	7,14
Ni	0,12	0,19	0,05	0,34	0,05	0,11	0,16	0,15	0,08	0,04	0,09	0,07
Zn	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,02	0,08
Suma	23,96	23,98	23,96	23,87	23,97	23,98	23,97	23,97	23,96	23,95	23,97	23,96

## GENEZA I SUKCESJA MINERALIZACJI KRUSZCOWEJ

Zasadowe i ultrazasadowe człony ofiolitu sudeckiego mają charakterystykę geochemiczną skał powstałych w środowisku grzbietu śródoceanicznego (Dubieńska i in., 2004; Mazur i in., 2006). Skały ultramaficzne masywu Braszowice–Brzeźnica mogą być traktowane jako wyższa część członu ultramaficznego, to jest tektonity płaszczowe i kumulaty ultramaficzne (Gunia, 1992; Jamrozik, 1995).

Chromit jest najprawdopodobniej minerałem stadium magmowego, rozproszonym w całej masie skały. Krystalizacja chromitu zachodziła jednocześnie z oliwinami i piroksenami, o czym świadczą wrostki tych minerałów w obrębie niezmienionej strefy relikatów chromitowych (fig. 4). Jego skład chemiczny może sugerować przynależność do kumulatów ultramaficznych (fig. 7), jednak wzbogacenie w FeO<sub>3</sub>

może być również wynikiem przemian zachodzących w czasie procesu serpentynizacji. Pierwotnymi minerałami zapewne są także siarczki charakterystyczne dla wczesnego stadium krystalizacji magmy, takie jak: pirotyt, pentlandyt czy chalcopyryt. W czasie późniejszych procesów metamorficznych ulegają one jednak rozpadowi, uwalniając składniki niezbędne do krystalizacji siarczków późniejszych generacji.

Pierwotne skały ultramaficzne w czasie swej skomplikowanej historii geologicznej przechodziły złożoną ewolucję tektonometamorficzną, podczas której powstawały nowe fazy mineralne. Głównym procesem metamorficznym, jaki miał wpływ na ewolucję tych skał, była serpentynizacja. Uważa się, że proces serpentynizacji rozpoczął się już w pobliżu grzbietu śródoceanicznego, a następnie zachodził w strefie aktywnego transportu tektonicznego, w trakcie obdukcji skorupy oceanicznej i powstawania nasunięcia ofiolitowego (Gunia, 1992; Dubińska i in., 2004). Serpentynizacja w skałach pasma Mnicha zachodziła bardzo intensywnie, w warunkach ciśnienia 3 kb i temperaturze do 550°C (Gunia, 1992), co doprowadziło do powstania serpentynitów antygorytowych o strukturach rozetkowych i płomykowych (Moody, 1976; Moody, 1979; Prichard, 1979; Gunia, 1992; Burkhard, 1992). W procesie tym brały udział roztwory hydrotermalne przenikające dno oceaniczne, a środowisko serpentynizacji było skrajnie redukcyjne, na co wskazuje obecność w serpentynitach heazlewoodytu i miedzi rodzimej w rodingitach (Gunia, 1986b) i awaruitu w serpentynitach (Coleman, 1977).

W czasie obdukcji skorupy oceanicznej powstały spękania, które ułatwiły penetrację roztworów hydrotermalnych. Zjawisko to obserwuje się w pierwotnych chromitach, których ziarna są silnie spękane i przeobrażone (fig. 4). Chromit w czasie serpentynizacji jest stopniowo zastępowany przez magnetyt. Proces zastępowania chromitu rozpoczyna się na brzegach ziaren oraz wzdłuż spękań, czyli w miejscach, do których w czasie procesów metamorficznych roztwory hydrotermalne mają ułatwiony dostęp (fig. 4, 5D). Przemiana ta jest związana z usuwaniem  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  ze struktury chromitu i podstawianie w ich miejsce  $\text{Fe}^{3+}$  i  $\text{Fe}^{2+}$  pochodzącego z rozpadu pierwotnych krzemianów skałotwórczych – oliwinów i piroksenów (Sałaciński, Zawadzki, 1983).

W wyniku tego procesu powstaje spinel Fe-Cr o cechach optycznych i składzie chemicznym pośrednim między chromitem a magnetytem. Końcowym produktem tej przemiany jest magnetyt Ia, który buduje najbardziej zewnętrzne części zmienionych agregatów mineralnych. Śladowa ilość niklu w składzie chemicznym ferrichromitu i magnetytu Ia może wskazywać, że żelazo wchodzące w ich strukturę pochodzi z rozpadu oliwinów i piroksenów (tab. 2, 4). Chrom odprowadzany z chromitów w niewielkich ilościach mógł być wbudowany w strukturę magnetytu Ia (tab. 4) lub został związany w chlorytach chromowych otaczających ziarna spineli (Sałaciński, 1992; Mellini, Rumori, 2005).

Uruchomione w procesach metamorficznych pierwiastki pozwalają na krystalizację nowych faz spineli. Nowe fazy często obrastają syntaksjalnie starsze generacje spineli. Ferrichromit i magnetyt Ia w czasie krystalizacji przechwytyują wrostki minerałów grupy serpentynu. Wrostki te układają się

łańcuszkowo wzdłuż krawędzi ziarna spinelu, na granicy ferrichromitu i magnetytu Ia (fig. 8).

Wrostki minerałów grupy serpentynów mogą występować również w szerokich strefach spinelu Fe-Cr w postaci igiełek układających się zgodnie ze strukturą gospodarza (fig. 9). Takie ułożenie wrostków może świadczyć o epizodzie metamorficznym, w którym pod wpływem zmian warunków ciśnienia, temperatury oraz składu fluidów następował rozpad struktury chromitu. Zjawisko to może być związane z oddziaływaniem roztworów zawierających  $\text{CO}_2$ , o właściwościach utleniających (Burkhard, 1992) dzięki czemu następowała rekrytalizacja spinelu. Zjawisko to miało lokalny zasięg i objęło tylko niektóre ziarna.

Możliwość mobilizacji chromu przy udziale roztworów zawierających jony  $\text{Fe}^{3+}$  oraz  $\text{Cl}^-$  została udowodniona eksperymentalnie (Białowolska, Sałaciński, 1984), zatem można przypuszczać, że jony te stanowiły istotny składnik roztworów hydrotermalnych oddziałujących na pierwotne skały ultramaficzne masywu Braszowice-Brzeźnica.

W procesie serpentynizacji skał ultramaficznych oliwiny i pirokseny ulegają rozpadowi, a Fe uwolnione z ich struktury krystalicznej zostaje częściowo utlenione do  $\text{Fe}^{3+}$  i wchodzi w skład różnych form magnetytu. Dzięki niemu powstają obwódki magnetytu Ia wokół jąder chromitowych oraz skupienia magnetytu Ib wytrącającego się w spękaniach oliwinów, wzdłuż szczelin łupliwości piroksenów, w pseudomorfozach po tych minerałach, niekiedy także na kontaktach międzyziarnowych (fig. 5). W miarę postępu procesu serpentynizacji i wzrostu temperatury zostały uruchomione większe ilości Fe pochodzące z zaawansowanego rozpadu pierwotnych krzemianów skałotwórczych. Wraz ze wzrostem temperatury powstały warunki sprzyjające krystalizacji magnetytu II, który powstawał równocześnie z siarczkami oraz z minerałami grupy serpentynu, o czym świadczą ich przerosty na krawędziach magnetytu (fig. 5C). Ponadto magnetyt II krystalizował na wcześniejszych generacjach magnetytu, zwiększając powierzchnię agregatów mineralnych, przez co zatarł ich pierwotne formy.

Na zaawansowanym etapie serpentynizacji, równocześnie z magnetytem II krystalizowały wtórne siarczki, w efekcie czego minerały te często przerastają się ze sobą (fig. 12). Siarczki budują często agregaty, w których przejścia pomiędzy poszczególnymi fazami zachodzą w sposób ciągły. Taka forma występowania jest efektem ich jednoczesnej krystalizacji oraz zmiennych warunków red-ox w czasie tego procesu. Pentlandyt jest minerałem pierwotnym lub krystalizował we wczesnych fazach serpentynizacji. Wraz ze wzrostem temperatury i warunków redukcyjnych został zastąpiony przez inne minerały siarczkowe – milleryt czy heazlewoodyt. Minerały te występują w pseudomorfozach po pentlandycie, w których zachowały się charakterystyczne dla niego spękania zatokowe. Żelazo pochodzące z rozpadu pentlandytu może wejść w strukturę krystaliczną magnetytu II występującego w agregatach z siarczkami.

Żelazo i nikiel wchodzą również w struktury siarczków, między innymi w strukturę heazlewoodytu (może zawierać do kilku procent Fe). Obecność siarczków oraz opisywanych

Siarczki	Etap magmowy	Serpentynizacja	Etap hipergeniczny
Chromit	██████████		
Pentlandyt	██████████	██████████	
Spinel Fe-Cr		██████████	
Magnetyt Ia		██████████	
Magnetyt Ib		██████████	
Arsenki		██████████	
Magnetyt II			██████████
Milleryt			██████████
Heazlewoodyt			██████████
Hematyt			██████████
Goethyt			██████████

**Fig. 14. Schemat sukcesji minerałów kruszczowych w zserpentynizowanych skałach ultramaficznych zachodniej części masywu Braszowice–Brzeźnica**

Succession of crystallization of ore minerals in serpentinitised ultramafic rocks of the western part of the Braszowice–Brzeźnica massif

w literaturze awaruitu i żelaza rodzimego (Delura, 2000) wskazuje na redukcyjne warunki serpentynizacji (Coleman, 1977). Pentlandyt, który obecnie obserwuje się w skałach masywu musiał zostać na pewnym etapie odizolowany, na przykład poprzez nadbudowanie obwódki magnetytu II (fig. 12A). Dzięki takiej otoczce pentlandyt był izolowany od późniejszego bardziej redukcyjnego środowiska i nie doszło do jego rozpadu. W obrębie wtórnego pentlandytu stwierdzono występowanie wrostków arsenków. Można przypuszczać, że arsenki krystalizowały nieco później niż pentlandyt, wypełniając w nim pustki. W późniejszym etapie, w warunkach bardziej redukcyjnych powstały między innymi takie siarczki jak milleryt, heazlewoodyt, godlewskit, a ich krystalizacja następowała jednocześnie z antygorytem i magnetytem II (fig. 14).

W momencie kiedy serpentynity były już wykształcone, skały te zostały poddane oddziaływaniu niskotemperaturowych roztworów hydrotermalnych zawierających  $\text{CO}_2$ , pochodzących z sąsiadujących kwaśnych intruzji. Powodowały one rozpad minerałów serpentynowych dzięki czemu uruchomiony został Mg, który następnie wykrystalizował w postaci  $\text{MgCO}_3$ , wypełniając spękania i tworząc żyły. Po zakończeniu procesów hydrotermalnych nastąpił etap przemian hipergenicznych. Utleniające oddziaływanie wód meteorycznych zaznaczyło się w skałach masywu obecnością hematytu w postaci listewek martytowych, spotykanych w obrębie wszystkich generacji magnetytu. Paleogeńskie procesy wietrzenia w klimacie tropikalnym spowodowały wzbogacenie zwietrzliny serpentynitowej w nikiel.

## WNIOSKI

Zaprezentowane w niniejszym artykule wyniki badań mineralizacji kruszczowej w serpentynitach zachodniej części masywu Braszowice–Brzeźnica pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zachodnia część masywu Braszowice–Brzeźnica jest zbudowana z serpentynitów antygorytowych o strukturach niepseudomorficznym, co wskazuje na intensywny przebieg procesu serpentynizacji w warunkach ciśnień i temperatur odpowiadających górnej granicy facji zieleńcowej.

2. Pierwotnymi minerałami kruszczowymi w badanych skałach są z pewnością rozproszone w masie skały spinele chromowe, a także siarczki typowe dla wczesnego stadium krystalizacji magmy: pentlandyt, pirotyn i chalkopiryt. Mi-

nerałami wtórnymi powstałymi na różnych etapach serpentynizacji są: magnetyt, siarczki Ni-Fe oraz arsenki niklu.

3. Magnetyt w badanych skałach jest minerałem wtórnym, formował się na wszystkich etapach serpentynizacji. Najbardziej intensywna krystalizacja magnetytu zachodziła wraz ze wzrostem temperatury w zaawansowanym stadium serpentynizacji.

4. Pierwotny chromit w czasie serpentynizacji uległ przemianom. Występuje w agregatach mineralnych w sąsiedztwie spinelu żelazowo-chromowego oraz magnetytu Ia. Minerale te są produktami przemian chromitu. W czasie serpentynizacji ze struktury chromitu był odprowadzany chrom, glin i magnez, a w ich miejsce było podstawiane



żelazo. Przemiana taka zachodziła przy udziale roztworów bogatych w  $\text{Cl}^-$  oraz  $\text{Fe}^+$ . Wtórne generacje spineli obrastały niekiedy syntaksjalnie starsze generacje.

5. Warunki serpentynizacji były silnie redukcyjne, na co wskazuje obecność w skałach masywu heazlewoodytu, awaruitu oraz miedzi rodzimej.

6. W serpentynitach masywu Braszowice–Brzeźnica występują arsenki. Tworzą one niewielkie wrostki w obrębie siarczków.

7. Zdecydowana większość siarczków Ni-Fe jest pochodzenia wtórnego. Siarczki pierwotne w większości ulegają rozpadowi w czasie serpentynizacji, uwalniając niezbędne składniki dla krystalizacji siarczków wtórnych.

8. Skały masywu Braszowice–Brzeźnica były poddane procesom hipergenicznym. W wyniku oddziaływania wód meteorycznych magnetyt częściowo uległ utlenieniu, w wyniku czego powstały listewki martytowe oraz goethyt. W paleogenie w warunkach klimatu tropikalnego wytworzyły się pokrywy zwietrzliny nikłonośnej.

## LITERATURA

- BIAŁOWOLSKA A., SAŁACIŃSKI R., 1984 — The problem of chromium mobility in natural conditions and of its experimental leaching from chromite. *Arch. Miner.*, **50**, 1: 103–113.
- BURKHARD D., 1992 — Accessory chromium spinels: Their coexistence and alteration in serpentinites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**: 1297–1306.
- COLEMAN R.G., 1977 — Ophiolites. Ancient Oceanic Lithosphere? Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York.
- CWOJDZIŃSKI S., 1977 — Główne etapy ewolucji tektonogenu waryscyjskiego Polski w świetle teorii tektoniki płyt. *Prz. Geol.*, **25**, : 579–583.
- CWOJDZIŃSKI S., ŻELAŻNIEWICZ A., 1995 — Podłoże krystaliczne bloku przedsudeckiego. Przewodnik LXVI zjazdu PTG. Rocznik PTG, wydanie specjalne – 50 lat polskich badań geologicznych na Dolnym Śląsku: 11–28. Wrocław.
- DELURA K., 2000 — Mineralizacja kruszcowa w zserpentynizowanych skałach ultramaficznych masywów Braszowice–Brzeźnica i Gogołów–Jordanów na Dolnym Śląsku. Arch. Wydz. Geol. Uniwersytetu Warszawskiego [praca doktorska].
- DUBIŃSKA E., GUNIA P., 1997 — The Sudetic ophiolite: current view on its geodynamic model. *Geol. Quart.*, **41**, 1: 1–20.
- DUBIŃSKA E., BYLINA P., KOZŁOWSKI A., DÖRR W., NEJBERT K., SCHASTOK J., KULICKI C., 2004 — U–pb dating of serpentinitization: hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland). *Chem. Geol.*, **203**: 183–203.
- GAJEWSKI Z., 1974 — Masyw Serpentynitowy Grochowa–Braszowice raz jego znaczenie surowcowe. *Biul. Inst. Geol.*, **7**: 49–74.
- GUNIA P., 1986a — Rodingit z serpentynitów okolic Mikołajowa (Masyw serpentynitowy Braszowice–Brzeźnica, Dolny Śląsk). *Geol. Sud.*, **21**, 1: 197–211.
- GUNIA P., 1986b — Native copper from rodingitized gabbroic dykes in serpentinites of the Braszowice–Brzeźnica massif (Lower Silesia). *Miner. Pol.*, **17**, 1: 63–75.
- GUNIA P., 1992 — Petrologia skał ultrazasadowych masywu Braszowice–Brzeźnicy (Blok Przedsudecki). *Geol. Sud.*, **26**, 1/2: 119–167.
- JAMROZIK L., 1981 — General geology and tectonics of the serpentinite-gabbroic Braszowice–Grochowa massif. Ophiolites and Initialites of Northern Border of the Bohemian Massif. T. 2: 95–102. Potsdam–Freiberg.
- JAMROZIK L., 1995 — Geologia ofiolitów z obrzeżenia Bloku Gór Sowich. Przewodnik LXVI zjazdu PTG. Rocznik PTG, wydanie specjalne – 50 lat polskich badań geologicznych na Dolnym Śląsku: 34–38. Wrocław.
- KADZIÓŁKO-HOFMOKL M., JELEŃSKA M., BYLINA P., DUBIŃSKA E., DELURA K., NEJBERT K., 2006 — Paleomagnetism of Paleozoic ultrabasic rocks from the Sudetes MTS (SW Poland): tectonic implications. *Geophys. Jour. Intern.*, **167**: 24–42.
- MACIEJEWSKI S., 1968 — Ultrabasic and Basic Rocks in the Framework of the Góry Sowie Gneissic Block. *Biul. Inst. Geol.*, **16**: 107–120.
- MAJEROWICZ A., 1981 — Rock series of the Ślęza Mt. group in the light of petrologic studies of ophiolitic complexes. Ophiolites and Initialites of Northern Border of the Bohemian Massif. T. 2: 172–193. Potsdam–Freiberg.
- MAZUR S., ALEKSANDROWSKI P., KRYZA R., OBERC-DZIEDZIC T., 2006 — The Variscan Orogen in Poland. *Geol. Quart.*, **50**, 1: 89–118.
- MELLINI M., RUMORI C., VITI C., 2005 — Hydrothermally reset magmatic spinels in retrograde serpentinites: formation of “ferri-chromit” rims and chlorite aureoles. *Contribution Miner. Petrol.*, **149**: 266–275.
- MOODY J.B., 1976 — Serpentinization: a review. *Lithos*, **9**: 125–138.
- MOODY J.B., 1979 — Serpentinites, Spilites and Ophiolite Metamorphism. *Canadian Miner.*, **17**: 871–887.
- OBERC J., 1972 — Budowa geologiczna Polski. Sudety i obszary przyległe. T.4, cz. 2. Wyd. Inst. Geol., Warszawa.
- PALANDRI J., REED M., 2003 — Geochemical models of metasomatism in ultramafic systems: Serpentinisation, rodingitization, and sea floor carbonate chimney precipitation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 5: 1115–1133.
- PEROŃ J., 1979 — Zastosowanie metody elektrooporowej do określenia budowy geologicznej rejonu Braszowice (Strefa Niemczy). *Acta Univ. Wratislaviensis. Pr. Geol.-Miner.*, **7**: 173–187.
- PRICHARD H.M., 1979 — A petrographic of the process of serpentinitization in ophiolites in ocean crust. *Contribution Miner. Petrol.*, **68**: 231–241.
- SAŁACIŃSKI R., ZAWIDZKI P., 1983 — Przemiany pomagmowe chromitów w serpentynitach osłony kry sowiogórskiej. *Arch. Miner.*, **39**, 1: 119–123.
- SAŁACIŃSKI R., 1992 — Geneza mineralizacji kruszcowej mafitów i ultramafitów w otoczeniu Bloku Gór Sowich. *Geol. Sud.*, **26**, 1/2: 1–34.
- STEVENS R.E., 1944 — Composition of some chromites of the western hemisphere. *Am. Mineralogist*, **29**: 1–34.

## SUMMARY

Mafic and ultramafic rock association surrounding Góry Sowie block are considered to be a part of the Sudetic ophiolite. The Braszowice–Brzeźnica massif is located in the southern part of Niemcza Dislocation Zone in vicinity of the Góry Sowie block. Rocks forming Braszowice–Brzeźnica massif display tectonic contact with adjacent geological units. The most common rock of the Braszowice–Brzeźnica massif are ultramafic rocks serpentinised to various extent. The serpentinites of the western part of the Braszowice–Brzeźnica massif, which are a subject of this study, form elongate hill called Mnich. The ridge is penetrated by mafic apophysis which branch off the gabbroic body situated at the south from the massif.

The investigation were carried out on samples collected in the field on the Mnich ridge in the western part of the massif. Minerals were identified in thin sections using reflected and transmitted microscopy. The chemical composition of the minerals was determined by CAMECA SX 100 electron microprobe.

The Mnich ridge is composed of dark-green to black antigorite serpentinites which characterize aphanitic texture. Whole massif is strongly mineralized with magnesite veins which were a subject of exploitation. Serpentinites are covered with Paleogenic weathering cover, which in some places is enriched with Ni.

Serpentinites consist of antigorite, randomly distributed olivine and pyroxene relics and opaque minerals like chromite, ferrichromite, several varieties of magnetite, pentlandite, pyrrhotite, chalkopyrite, secondary Fe-Ni sulphides and Ni arsenides.

Chromite in Braszowice–Brzeźnica serpentinites is a primary mineral. Chromite occurs in mineral aggregates (<4 mm) consist of chromite core surrounded with secondary ferrichromite and/or magnetite Ia. Ferrichromite and magnetite Ia are products of alteration. Magnetite Ib occurs in pseudomorphs after olivines and pyroxenes. It forms grains (<2 mm) concentrated in cloudy clusters. It frequently occurs along the edge of primary olivines and along cleavage planes in pseudomorphs after pyroxenes. Magnetite II forms randomly distributed xenomorphic grains up to 0,1 mm in size often intergrown with sulphides and on the serpentine group minerals. In all types of magnetite may occur needle-shaped hematite, which forms during martitization process.

Ni-Fe sulphides form xenomorphic grains up to 100  $\mu\text{m}$ . Sulphides may occur in pseudomorphs after primary sulphides,

for example millerite in pseudomorphs after pentlandite. Sulphides may form aggregates contain of few minerals, hard to distinguish with optical method. In sulphide grains there are scarce inclusions of nickel arsenide 1  $\mu\text{m}$  in size.

Chromite, pentlandite, pyrrhotite and chalkopyrite are primary minerals, crystalized directly from magmatic melt simultaneously with olivines and pyroxenes. Chemical composition of Cr-spinel indicate ultramafic cumulates origin. However enrichment with  $\text{FeO}_3$  may be a result of alteration during serpentinization process..

During serpentinization Cr-spinel was replaced by ferrichromite and magnetite. Alteration process began on the edges of chromite grain and along the cracks, which were easily reachable by the hydrothermal fluids.  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  removed from spinel structure, and replaced by  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  released from olivine and pyroxenes. The result of this alteration is ferrichromite, which chemical composition and optical features are intermediate between chromite and magnetite. The final product of that alteration is magnetite Ia. Trace amount of Ni in ferrichromite and magnetite composition indicate that Fe derives from olivines and pyroxenes.

Frequent intergrowths of magnetite II with serpentine group minerals and secondary sulphides indicates that these minerals crystalize simultaneously during intense serpentinization.

During the metamorphic process sulphur from primary sulphides is released and form secondary sulphides. Fe-Ni Sulphides are mainly secondary minerals (except pentlandite, which may be primary and secondary) formed during the serpentinization.

Main metamorphic process which altered Braszowice–Brzeźnica ultramafic rocks was serpentinisation. The serpentinization process course at temperature up to 550°C and pressure 3kb – conditions characteristic for upper greenschist facies. Occurrence of heazlewoodite, native copper and awaruite indicates reducing conditions during serpentinization process.

Low temperature hydrothermal fluids derives from acid intrusions redound to form magnesite veins. The presence of martite in some grains of magnetite indicates that the massif was affected with hypergenic process.