

**MULTIFÁZOVÉ PEVNÉ INKLUZE  
V GRANÁTICKÉM PYROXENITU - DOKLAD  
KARBONÁTO-SILIKÁTOVÉ METASOMATÓZY V PLÁŠTI,  
SAXOTHURINGIKUM, ČESKÝ MASIV**

MULTIPHASE SOLID INCLUSIONS IN GARNET PYROXENITE - EVIDENCE  
OF CARBONATE-SILICATE METASOMATISM IN THE MANTLE, SAXOTHURINGIAN ZONE,  
BOHEMIAN MASSIF

TOMÁŠ HÝBL, JANA KOTKOVÁ, RENATA ČOPIJKOVÁ

*Abstract*

Hýbl, T., Kotková, J., Čopjaková, R., 2025: Multifázové pevné inkluze v granátickém pyroxenitu - doklad karbonáto-silikátové metasomatózy v plášti, saxothuringikum, Český masiv. - Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 110, 2, 419-436 (with English summary).

*Multiphase solid inclusions in garnet pyroxenite - evidence of carbonate-silicate metasomatism in the mantle, Saxothuringian Zone, Bohemian Massif*

The studied pyroxenite forms ~1-2 cm thick veins cutting garnet peridotite in a quarry north of the village of Zöblitz. The locality is situated in the German part of the Erzgebirge Crystalline Complex, Saxothuringian Zone, Bohemian Massif. Multiphase solid inclusions (MSI) enclosed in garnet represent crystallized remnants of fluids or melts present in the rocks under HT and HP conditions at great depths. The MSI contain more than 20 different minerals. The average modal amounts are: pargasite (49 vol. %), Ba-mica (22 vol. %) and carbonates (magnesite 12 vol. % and dolomite 5 vol. %). Olivine, apatite, and spinel make up above 2 vol. %. The remaining phases are represented by less than 1 vol. %. The calculated bulk composition of multiphase solid inclusions (from Zöblitz) shows significant enrichment in BaO, K<sub>2</sub>O, SrO, TiO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, LREE, Th, U and Pb compared to the mantle. The enrichment in elements incompatible in the mantle supports element transfer between the crust and mantle due to metasomatism. Mineral carriers of these incompatible elements include: Ba-mica (Ba, K), pargasite (Na, K), monazite-(La) (LREE, Th, U), apatite (LREE, Sr) and thorianite (Th and U). This carbonate-silicate metasomatic medium was rich in volatile components: H<sub>2</sub>O, Cl (Ba-mica and pargasite), and P (apatite, monazite-(La)). The MSI represent remnants of the original carbonate-silicate melt trapped in the second garnet generation formed during initial decompression. Carbonate-silicate metasomatism contributed to the formation of complex mineral assemblage in MSI and records crust-mantle interaction under HP and HT conditions in subduction setting and modification of the lithospheric mantle of the Bohemian Massif.

*Key words:* garnet pyroxenite, garnet peridotite, multiphase solid inclusions, mantle metasomatism, Zöblitz, Saxothuringicum, Bohemian Massif

Tomáš Hýbl, Department of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic; e-mail: 520973@mail.muni.cz

Jana Kotková, Czech Geological Survey, Klárov 3, 118 21 Praha 1, Czech Republic and Department of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic; e-mail: kotkova@sci.muni.cz

Renata Čopjaková, Department of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic; e-mail: copjakova@sci.muni.cz

## ÚVOD

Multifázové pevné inkluze (multiphase solid inclusions = MSI) představují vykrystalizovaná fluida nebo taveniny zachycené v minerálech vysoce metamorfovaných hornin. Mají polygonální, negativní krystalový tvar hostitelské fáze a jejich velikost se pohybuje od 5 do 100  $\mu\text{m}$ . Obvykle obsahují 4 až 10 minerálů a může v nich být až 40 % fluid nebo prázdných dutin vzniklých po úniku fluid. Primární MSI vznikají zachycením metasomatických tavenin a fluid během růstu hostitelského minerálu. Následné ochlazování a dekomprese vedou ke krystalizaci dceřiných minerálů a případně k dekrepitaci, kdy dochází k úniku zbytkových fluid podél trhlin do okolního minerálu. V případě plášťových hornin bývají MSI nejčastěji zachycené v granátech, případně spinelech. Chemické složení MSI indikuje původ a charakter metasomatických fluid či tavenin.

Multifázové pevné inkluze byly nalezeny v různých typech hornin metamorfovaných v UHP podmínkách a to zejména v eklogitech (FERRANDO *et al.* 2005a; 2005b; ZHANG *et al.* 2011), felsických rulách až granulitech (STÖCKHERT *et al.* 2001, 2009; HWANG *et al.* 2003; DOBRZHINetskaya *et al.* 2003a, 2003b, 2012), kvarcitech (FREZZOTTI *et al.* 2007; FERRANDO *et al.* 2005b), ale i v mramorech (HWANG *et al.* 2005; 2006), v granátických pyroxenitech (ROERMUND *et al.* 2002; CARSWELL a ROERMUND 2005; VRIJMOED *et al.* 2008; MALASPINA *et al.* 2010), a peridotitech (FREZZOTTI a FERRANDO 2015).

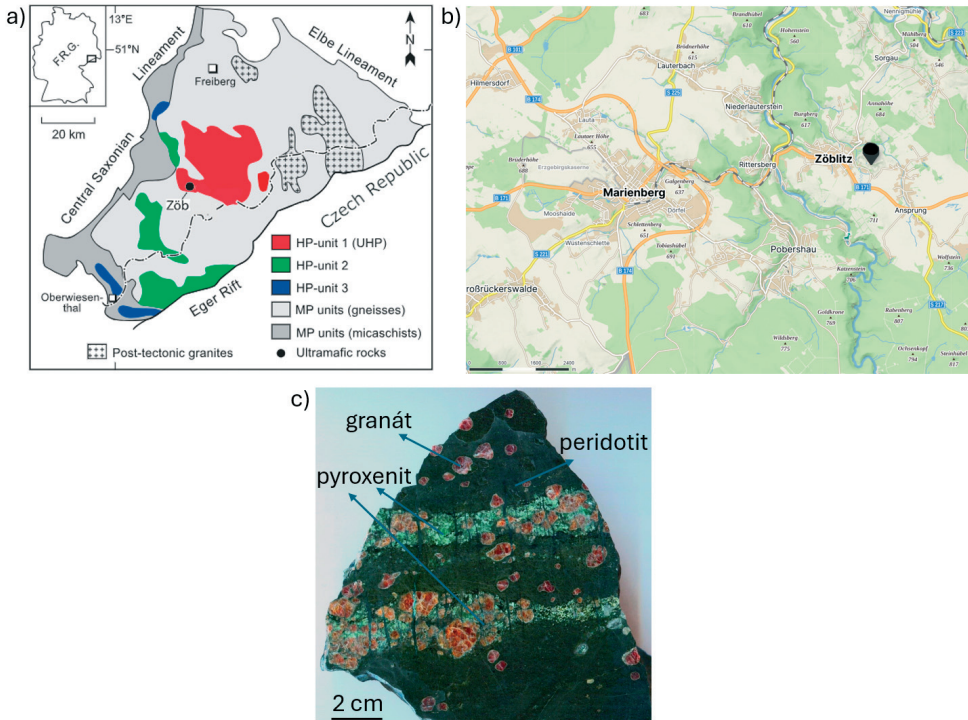
MSI byly popsány v posledních letech i v plášťových horninách Českého masivu, a to v granátických peridotitech a pyroxenitech z vrty T7 u obce Staré v oblasti saxothuringika překrytého křídovými platformními sedimenty (ČOPIJKOVÁ a KOTKOVÁ 2018; KOTKOVÁ *et al.* 2021), v eklogitech saxothuringika (BORGHINI *et al.* 2023), v eklogitech a peridotitech moldanubika (FARYAD *et al.* 2013; 2018; KUBEŠ *et al.* 2024; NAEMURA *et al.* 2015; 2018; TALACKO 2024) a v peridotitech kutnohorského krystalinika (ACKERMAN *et al.* 2020).

Tento článek prezentuje výsledky studia MSI v granátech z pyroxenitových žil v peridotitovém tělese u Zöblitz v saxothuringiku. Na základě studia minerálních asociací v MSI, chemického složení minerálů v MSI a přepočteného celkového chemického složení MSI jsme interpretovali charakter metasomatického média zachyceného v granátech. Ten byl srovnán s MSI popsanými z jiných metasomatizovaných granátických peridotitů na území Českého masivu a byl posouzen význam metasomatózy  $\text{CO}_2$ -bohatými fluidy a taveninami v plášťových horninách této oblasti.

## GEOLOGICKÁ SITUACE

Český masiv, představující východní část evropského variského pásma, obsahuje četná drobná tělesa orogenních peridotitů, často v asociaci se žilami pyroxenitů, které jsou uložené v (U)HP metamorfovaných horninách, granulitech a rulách. Studované pyroxenitové žíly a jejich hostitelské peridotity se nachází v oblasti saxothuringika Českého masivu v geologické jednotce krušnohorské krystalinikum. SCHMÄDICKE a EVANS (1997) na základě petrografických, metamorfních a strukturních vlastností rozlišili v krušnohorském krystaliniku tři ultravysokotlaké jednotky (UHP 1, UHP 2, UHP 3). Granátické peridotity jsou v Krušných horách vzácné, jako jediná je obsahuje UHP 1 (SCHMÄDICKE a EVANS 1997; SCHMÄDICKE a WILL 2023; ČOPIJKOVÁ a KOTKOVÁ 2023).

V této jednotce se nachází velký opuštěný lom severně od vesnice Zöblitz, kde jsou odkryty granátické peridotity ojediněle se žilami granátických pyroxenitů o mocnosti cca do 2 cm (viz obr. 1a, b, c). Granátické peridotity obsahují porfyroklasty granátu a matrix tvořenou olivínem, ortopyroxenem a klinopyroxenem s granoblastickou texturou. Dále se zde vyskytují polohy a čočky granátovců a eklogitů (SCHMÄDICKE a WILL 2023). SCHMÄDICKE a EVANS (1997) stanovili PT podmínky vysokotlaké metamorfózy peridotitů z Zöblitz a východněji situovaného tělesa peridotitů u Ansprungu a jeho pyroxenitových žil na 850–900  $^{\circ}\text{C}$  a 3,0–3,5 GPa.



Obr. 1: a) – Pozice lokality Zöblitz ve schematizované geologické mapě krušnohorského krystalinika (podle SCHMÄDICKE a WILL 2023); b) – Pozice lokality Zöblitz v topografické mapě (Mapy.cz 2023); c) – Žíly granátického pyroxenitu v granátickém peridotitu.

Fig. 1: a) – Position of the Zöblitz locality on a schematic geological map of the Erzgebirge Crystalline Complex (Saxothuringian Zone), modified from SCHMÄDICKE and WILL (2023); b) – Position of the Zöblitz locality on a topographic map (Mapy.cz 2023); c) – Veins of garnet pyroxenite within garnet peridotite.

## METODIKA

Ze žil granátického pyroxenitu v peridotitu z lomu Zöblitz byly připraveny leštěné výbrusy, které byly studovány optickým mikroskopem Olympus BX43 v procházejícím (PPL) a odraženém (RL) světle za účelem lokalizace MSI v granátu. V odraženém světle byly vytvářeny nealterované MSI na povrchu výbrusu pro následné studium pomocí SEM a EPMA. Výbrusy byly následně pokoveny uhlíkem. BSE snímky vybraných MSI byly pořízeny s použitím elektronového rastrovacího mikroskopu Tescan Mira 3 (Česká geologická služba, Praha). Pomocí EDS spekter bylo určeno minerální složení multifázových pevných inkluzí.

Ve vybraných místech bylo s použitím elektronové mikroskopy (EPMA) Cameca SX 100 v laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy Ústavu geologických věd Masarykovy univerzity v Brně analyzováno chemické složení jednotlivých minerálů v MSI. Zařízení pracovalo ve vlnově disperzním módu s urychlovacím napětím 15 kV, proudem paprsku 10–20 nA a průměrem elektronového svazku 1–5  $\mu\text{m}$ . Časy načítání jednotlivých prvků se pohybovaly mezi 10–30 sekundami. Pro silikátové minerály jako jsou slidy, amfiboly, pyroxeny a olivíny byly použity následující standardy a spektrální linie: sanidin (Si, K -  $K\alpha$ ), wollastonit (Ca, Si -  $K\alpha$ ), albit (Na -  $K\alpha$ ), pyrop (Mg -  $K\alpha$ ), almandin (Fe -  $K\alpha$ ),

spessartin (Mn -  $K\alpha$ ), titanit (Ti -  $K\alpha$ ),  $Ni_2SiO_4$  (Ni -  $K\alpha$ ), topaz (F -  $K\alpha$ ) a vanadinit (Cl -  $K\alpha$ ). Pro minerály spinelové skupiny a ilmenit byly použity tyto standardy:  $MgAl_2O_4$  (Mg, Al -  $K\alpha$ ), hematit (Fe -  $K\alpha$ ), chromit (Cr -  $K\alpha$ ),  $ZnAl_2O_4$  (Zn) -  $K\alpha$ , spessartin (Mn -  $K\alpha$ ), anatas/titanit (Ti -  $K\alpha$ ), pyrop (Mg -  $K\alpha$ ),  $Ni_2SiO_4$  (Ni -  $K\alpha$ ), titanit (Ca -  $K\alpha$ ), kolumbit (Nb -  $L\alpha$ ),  $CrTa_2O_6$  (Ta -  $M\alpha$ ), zirkon (Zr -  $L\alpha$ ),  $ScVO_4$  (Sc -  $K\alpha$ ) a vanadinit (V -  $K\alpha$ ). Pro apatit byly použity standardy: fluorapatit (P, Ca -  $K\alpha$ ), topaz (F -  $K\alpha$ ), vanadinit (Cl -  $K\alpha$ ), arsenopyrit (As -  $L\alpha$ ) a monazit/REE fosfáty (La, Ce -  $L\alpha$ ). Pro karbonáty byly použity kalcit (Ca -  $K\alpha$ ), magnezit (Mg -  $K\alpha$ ), siderit (Fe -  $K\alpha$ ), rhodochrozit (Mn -  $K\alpha$ ),  $SrSO_4$  (Sr -  $L\alpha$ ) a  $BaSO_4$  (Ba -  $L\alpha$ ). Pro monazit byly použity standardy  $LaPO_4$  (La -  $L\alpha$ ),  $CePO_4$  (Ce -  $L\alpha$ ), Nd-sklo (Nd - L),  $PrPO_4$  (Pr - L),  $ThO_2$  (Th -  $M\alpha$ ),  $UO_2$  (U - M), YAG (Y -  $L\alpha$ ), galenit (Pb -  $M\alpha$ ), arsenopyrit (As -  $L\alpha$ ),  $SrSO_4$  (Sr -  $L\alpha$ ) a fluorapatit (P -  $K\alpha$ ).

Chemické analýzy jednotlivých minerálů byly přepočteny na krystalochemické vzorce podle stechiometrie. Normalizace byla provedena na 4 atomy kyslíku pro spinel, monazit a olivín, na 23 atomů kyslíku pro amfibol, na 11 atomů kyslíku pro barnatou slidu, na 3 atomy kyslíku pro magnezit a dolomit a na 12,5 atomů kyslíku pro apatit. Obsah trojmocného železa byl dopočítán pro spinel ze stechiometrické rovnováhy. Stejným způsobem byl přepočítán i granát, u něhož byla normalizace provedena na 12 atomů kyslíku. Celkový obsah železa  $Fe_{tot}$  byl rozdělen na  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$  na základě stechiometrické rovnováhy a z empirického vzorce byly následně odvozeny koncové členy granátu. Použité zkratky pro názvy minerálů jsou podle práce WARRA (2021).

Dále proběhlo studium na Ramanově spektrometru LabRAM HR Evolution firmy Horiba na Ústavu geologických věd Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Pro analýzu byl použit modrý laser s vlnovou délkou 488 nm. Měření bylo prováděno v rozsahu 50–2000  $cm^{-1}$  pro ověření přítomnosti grafitu v MSI a následně ve vyšším rozlišení v rozsahu 1000–2000  $cm^{-1}$  pro detailní charakterizaci spekter grafitu. Ramanova spektra byla načítána při zvětšení objektivem 50 $\times$ , ojedíněle v případě menších zrn grafitu byl použit objektiv 100 $\times$ . Doba načítání (20–60 s) a počet akumulací (2–3) byly optimalizovány v závislosti na pozici grafitu ve výbrusu (na povrchu vs. hlouběji pod povrchem).

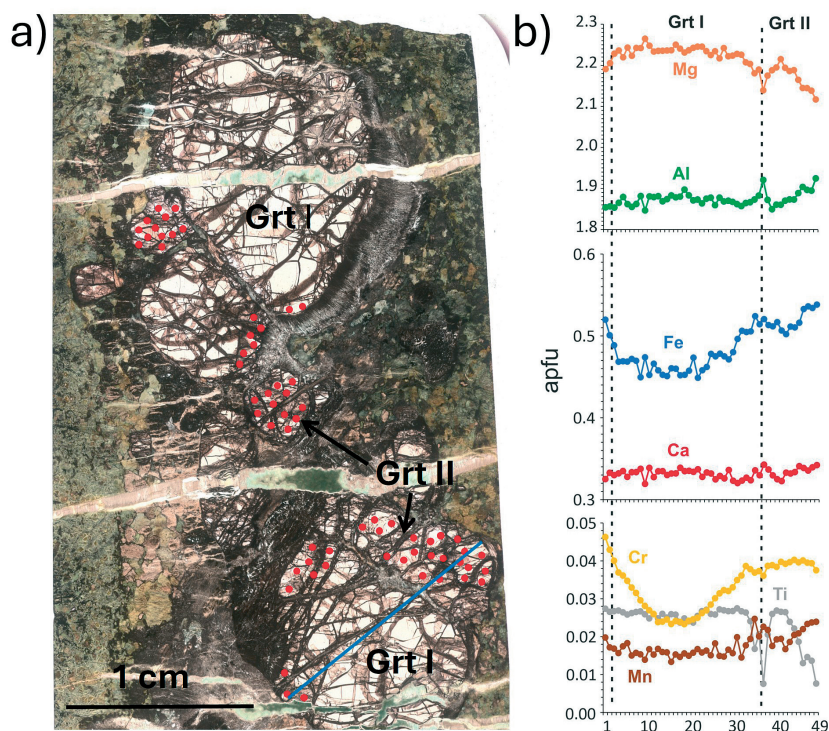
Celkové chemické složení MSI bylo spočteno z modálního zastoupení fází v MSI, hustoty a chemického složení jednotlivých fází. Jedná se o metodiku používanou ke stanovení chemického složení MSI (FERRANDO *et al.* 2005b, 2009; FREZZOTTI *et al.* 2007; NAEMURA *et al.* 2018; ROLLINSON 2019; KOTKOVÁ *et al.* 2021) zejména v případech, kdy není možná homogenizace inkluzí, jako právě v případě inkluzí vzniklých ze zachycených karbonát-silikátových tavenin. Chemické složení jednotlivých fází bylo stanoveno jako průměr z mikrosondových analýz. U minerálů, které nebyly analyzovány EPMA pro svoji malou velikost, jsme využili teoretické chemické složení těchto fází v hm%. Modální zastoupení fází v MSI bylo stanoveno z 2D řezu inkluzemi z celkem 38 BSE fotografií pečlivě vybraných reprezentativních nealterovaných a nedekreptovaných MSI pomocí obrazové analýzy v programu Fiji. Hustota jednotlivých minerálů byla spočtena ze stanovené hustoty jednotlivých koncových členů daného minerálu (ANTHONY *et al.* 1991, 1995, 1997, 2001, 2003) a zastoupení koncových členů rozpočtených na základě EPMA analýz.

## VÝSLEDKY VÝZKUMU

### Petrografická charakteristika granátického pyroxenitu

Hlavní minerály pyroxenitu jsou granát a klinopyroxen, vedlejší minerál je flogopit a akcesorické minerály jsou rutil a ilmenit. Směrem ke kontaktu s peridotitem jsou v pyroxenitu časté velké pseudomorfózy serpentinu, které vznikly pravděpodobně serpentinizací ortopyroxenu. Klinopyroxen je lokálně zatlačovaný amfibolem. Hornina obsahuje dvě generace granátu, a to granát I, který tvoří zrna velká 0,5–1,5 cm a granát II, jenž tvoří nesouvislé okraje narůstající na granát I nebo samostatná drobná zrna. Multifázové pevné inkluze jsou svým výskytem vázané na granát II (viz obr. 2a).

Granát v pyroxenitu odpovídá pyropu  $\text{Prp}_{69-75}\text{Alm}_{13-19}$  a ve srovnání s okolním peridotitem má nízký obsah  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0,4–0,8 hm. %). Velká zrna granátu I vykazují chemickou zonálnost projevující se růstem Fe a Cr a poklesem Mg od jádra k okraji. Granát II, který obsahuje četné MSI, vykazuje další výrazný nárůst Fe, Mn, ale i Ca, provázený poklesem Mg a Ti (obr. 2b). Klinopyroxen odpovídá diopsidu s  $\text{Mg}\#$  (0,91–0,92), středním obsahem  $\text{Na}_2\text{O}$  (1,8–2,2 hm. %) a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2,5–3,3 hm. %) a proměnlivým obsahem  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0,2–0,7 hm. %). Flogopit ( $\text{Mg}\#$  0,90–0,93) je obohacený BaO (3,9–5,6 hm. %) a  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,9–1,4 hm. %) a má vysoký obsah Cl (0,3–0,8 hm. %).



Obr. 2: a) – Sken výbrusu s texturním odlišením granátu I a II a vyznačenou distribucí MSI (oblast s přítomností MSI je vyznačená červeným tečkováním); b) – Vývoj chemického složení granátu podél profilu vyznačeného v obrázku 2a indikuje, že granát I je obrůstán granátem II a zprava srůstá s menším zrnem granátu II.

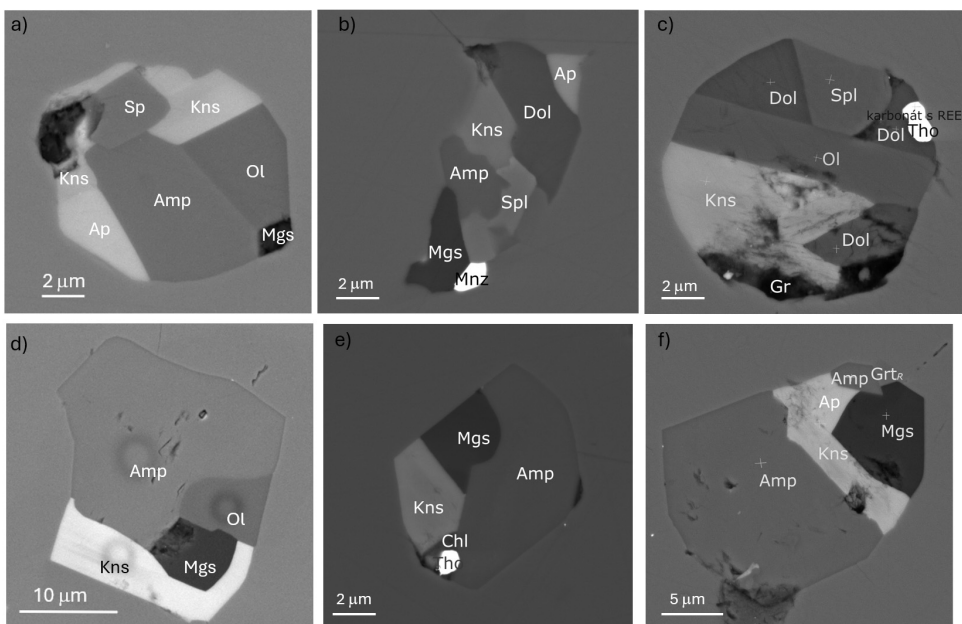
Fig. 2: a) – Thin section scan showing the textural distinction between garnet I and garnet II, with marked distribution of MSI (the area containing MSI is indicated by red stippling); b) – Chemical zoning profile across garnet from Fig. 2a, showing garnet I overgrown by garnet II and merging with a smaller grain of garnet II on the right.

### Charakteristika MSI a jejich minerální asociace

MSI jsou svým výskytem omezeny na granát II, kde jsou hojné a jsou pravidelně rozptýlené, a nejsou vázané na žádné růstové domény granátu II ani na vyhojené trhliny. MSI jsou nejčastěji pravidelné, izometrické a polygonální, odpovídající negativnímu krystalovému tvaru granátu (obr. 3a, c, d, e, f), někdy jsou mírně protažené (obr. 3b), vzácně nepravidel-

ného tvaru. Jejich velikost se pohybuje nejčastěji v rozmezí 3 až 10  $\mu\text{m}$ , větší inkluze až do 30  $\mu\text{m}$  v průměru jsou vzácné. Vzácně byly pozorovány projevy dekrepitace MSI ve formě radiálně uspořádaných prasklin někdy vyplněných materiálem inkluzí (tzv. offshoots; viz obr. 3f).

V MSI bylo zjištěno více než 20 různých minerálů. Vzácně byly pozorovány malé dutiny, a to nejvíce na okraji MSI při styku s hostitelským granátem. Zbytková fluida nebyla Ramanovou spektroskopií potvrzena. V MSI byly na základě chemického složení stanoveného s využitím SEM a EPMA identifikovány tyto fáze: amfibol (pargasit), barnatá slída, magnetit, dolomit, spinel, apatit, grafit, olivín, scheelit, thorianit, monazit, blíže neurčený REE karbonát, rutil, sulfidy (pentlandit, galenit, pyrhotin, arsenopyrit, chalkopyrit, gersdorffit), ilmenit a minerály ze skupiny crichtonitu. Identifikace jednotlivých fází byla provedena na základě jejich chemického složení zjištěného pomocí elektronové mikrosondy (EPMA).



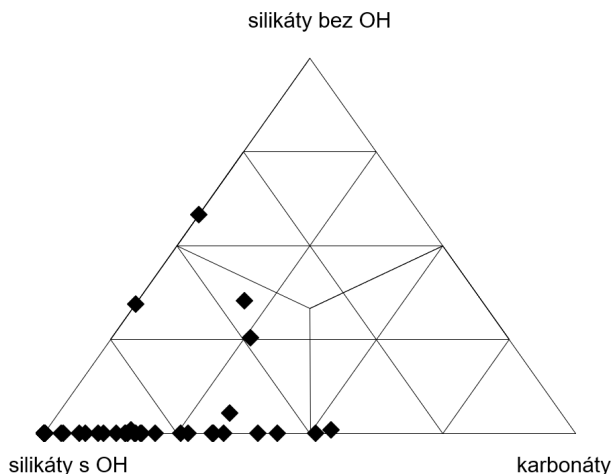
Obr. 3: BSE snímky multifázových pevných inkluzí a) – MSI s pravidelným izometrickým tvarem obsahující olivín; b) – BSE snímek s mírně protaženou MSI; c) – MSI s pravidelným izometrickým tvarem obsahující REE karbonát a grafit; d) – MSI obsahující olivín se zaoblenými hranami; e) – MSI s polygonálním tvarem a projevy dekrepitace; f) MSI obsahující granát s projevy dekrepitace (tzv. offshoots). Zkratky: Sp (spinel), Kns (Ba-slída složením odpovídající flogopitu až kinoshitalitu), Ol (olivín), Hbl (amfibol), Mgs (magnetit), Dol (dolomit), Ap (apatit), Chl (chlorit), Mnz (monazit), Tho (thorianit), Gr (grafit), Grt<sub>R</sub> (granát).

Fig. 3: BSE images of multiphase solid inclusions; a) MSI with a regular isometric shape containing olivine; b) BSE image of a slightly elongated MSI; c) MSI with a regular isometric shape containing REE carbonate and graphite; d) MSI containing olivine with rounded edges; e) MSI with a polygonal shape showing evidence of decrepitation; f) MSI containing garnet with signs of decrepitation and offshoots. Abbreviations: Sp (spinel), Kns (Ba-mica, corresponding to phlogopite to kinoshitalite), Ol (olivine), Hbl (amphibole), Mgs (magnetite), Dol (dolomite), Ap (apatite), Chl (chlorite), Mnz (monazite), Tho (thorianite), Gr (graphite), Grt<sub>R</sub> (garnet)

Největší podíl v objemovém zastoupení minerálů (tab. 1) zaujímá amfibol (pargasit; 49 obj. %). Po amfibolu má velké objemové zastoupení barnatá slída (22 obj. %) a karbonáty (magnezit 12 obj. %; dolomit 5 obj. %). Více než 2 obj. % MSI tvoří olivín, apatit a spinel. Zbylé fáze jsou zastoupeny méně než 1 obj. %. Ačkoli olivín se vyskytuje pouze v některých MSI, pokud je přítomen, tvoří větší zrna. Granát (Gr<sub>T</sub>), mírně odlišného složení než hostitelské zrno, je vzácně přítomen jako nesouvislý lem při kontaktu hostitelského granátu a ostatních minerálů v MSI (obr. 3f). Někdy je v MSI přítomen chlorit, jedná se však o sekundární fázi, vznikající při alteraci amfibolu. Chlority nebyly do výpočtu chemického složení MSI započítány. V MSI tedy převažují minerály obsahující vodu (OH), významně jsou zastoupené karbonáty (obr. 4). Bezvodé silikáty (olivíny) jsou vzácné, ale mohou dosahovat vyššího objemového podílu v některých inkluzích.

Tabulka 1. Průměrné modální zastoupení minerálů v MSI spočtené ze 38 studovaných MSI (v obj. %).  
Table 1. Average modal mineral proportions in MSI, calculated from 38 studied inclusions (in vol. %)

MSI	pargasit	Ba slída	magnezit	dolomit	olivín	spinel	apatit	grafit	monazit	thorianit	chlorit	scheelit	sulfidy	rutil
Zöblitz	49,3	21,5	12,2	5,0	4,0	2,2	2,3	0,8	0,9	0,07	0,7	0,6	0,4	0,03



Obr. 4: Objemové zastoupení vodnatých a bezvodých silikátů a karbonátů v MSI.  
Fig. 4: Volumetric proportions of hydrous and anhydrous silicates and carbonates in MSI.

### Výsledky Ramanovy spektroskopie

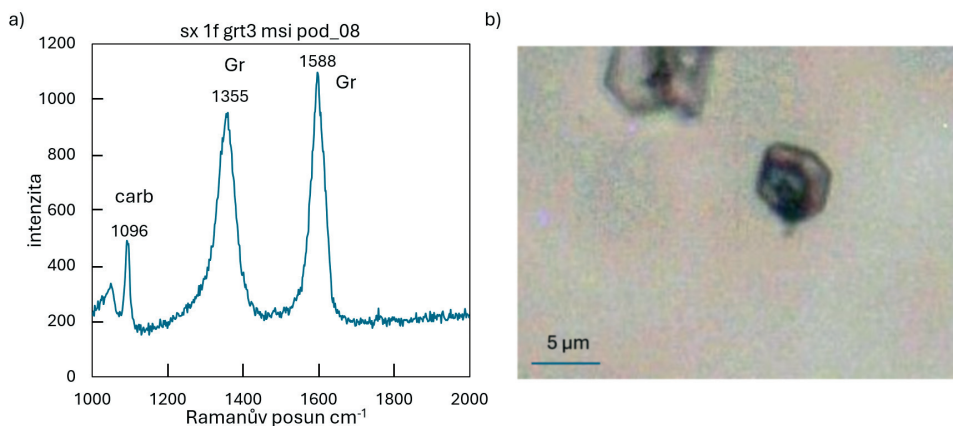
Pomocí Ramanovy spektroskopie byla potvrzena přítomnost grafitu v MSI na povrchu a pod povrchem výbrusů (obr. 5). Spektrum grafitu je charakterizováno dvěma intenzivními pásy v oblasti  $1355\text{ cm}^{-1}$  a  $1588\text{ cm}^{-1}$ .

### Chemické složení minerálů v MSI

Na elektronové mikrosondě bylo určeno chemické složení amfibolu, barnaté slídy, olivínu, magnezitu, dolomitu, spinelu, apatitu a monazitu (tab. 2). Ca-amfibol obsahuje 3,39–4,51 hm. %  $\text{Na}_2\text{O}$  a 15,74–21,70 hm. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , jeho  $X_{\text{Mg}}$  ( $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ ) je 0,90–0,94. Podle klasifikačního diagramu (obr. 6a) chemické složení amfibolu odpovídá pargasitu až sadanagaitu.

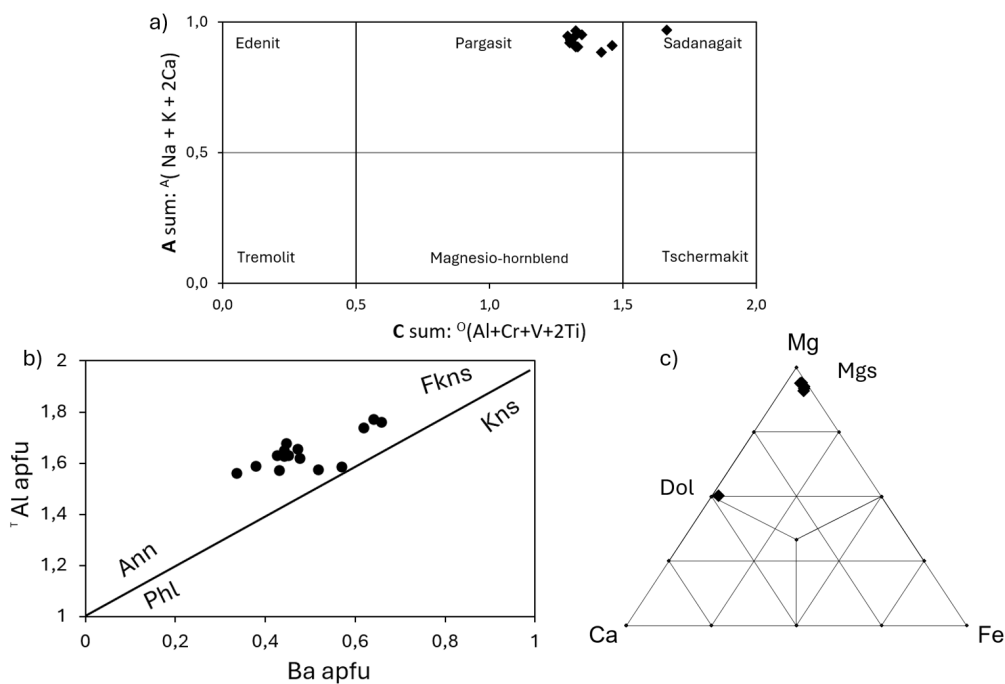
Tabulka 2. Průměrné chemické složení minerálů v MSI.  
Table 2. Average chemical composition of minerals in MSI.

hm.%	spinel	monazit	apatit	magnezit	dolomit	pargasit	Ba slída	olivín	apftu	spinel	monazit	apatit	magnezit	dolomit	pargasit	Ba slída	olivín
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	24,83	34,32	0,03	bdl	0,02	0,01	-	P	-	0,834	2,771	0,000	0,000	0,000	0,000	-
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	1,54	0,62	-	-	-	-	-	As	-	0,037	0,036	-	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	0,52	3,93	1,81	0,45	0,30	43,10	29,79	42,39	Si	0,013	0,156	0,173	0,006	0,004	6,062	2,350	1,006
TiO <sub>2</sub>	0,03	-	bdl	bdl	bdl	1,25	3,64	bdl	Ti	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,132	0,216	0,000
UO <sub>2</sub>	-	0,51	bdl	-	-	-	-	-	U	-	0,005	0,000	-	-	-	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	Zr	-	-	-	-	-	-	-	-
ThO <sub>2</sub>	-	14,54	bdl	-	-	-	-	-	Th	-	0,131	0,000	-	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63,95	-	1,18	0,10	0,09	16,69	18,15	0,08	Al	1,884	-	0,133	0,002	0,002	2,767	1,690	0,002
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,99	0,00	-	bdl	bdl	0,41	0,24	bdl	Cr	0,059	0,000	-	0,000	0,000	0,046	0,015	0,000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,60	1,14	-	-	-	-	-	-	Fe <sup>3+</sup>	0,031	0,000	-	-	-	-	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	-	-	bdl	bdl	bdl	0,03	bdl	V	0,000	-	-	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	26,97	0,41	-	-	-	-	-	La	-	0,394	0,014	-	-	-	-	-
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	21,82	0,62	-	-	-	-	-	Ce	-	0,317	0,022	-	-	-	-	-
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,93	bdl	-	-	-	-	-	Pr	-	0,013	0,000	-	-	-	-	-
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	1,65	bdl	-	-	-	-	-	Nd	-	0,023	0,000	-	-	-	-	-
BaO	-	-	-	bdl	0,13	0,34	15,68	bdl	Ba	-	-	-	0,000	0,001	0,019	0,489	0,000
FeO	4,48	1,14	0,82	4,79	1,59	2,71	3,82	5,69	Fe <sup>2+</sup>	0,093	0,038	0,065	0,054	0,019	0,319	0,254	0,113
ZnO	0,66	-	bdl	bdl	bdl	bdl	0,02	bdl	Zn	0,012	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
MgO	23,80	-	bdl	45,13	22,90	18,00	19,61	52,80	Mg	0,887	-	0,000	0,911	0,494	3,774	2,304	1,867
CaO	0,60	1,64	45,03	1,23	30,25	11,35	0,21	0,02	Ca	0,017	0,070	4,602	0,018	0,469	1,711	0,017	0,001
MnO	0,03	-	bdl	0,16	0,07	0,01	bdl	0,05	Mn	0,000	-	0,000	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001
CoO	0,09	-	-	-	-	-	-	-	Co	0,000	-	-	-	-	-	-	-
NiO	0,19	-	-	bdl	bdl	0,04	0,10	0,19	Ni	0,004	-	-	0,000	0,000	0,004	0,006	0,004
PbO	-	0,21	-	-	-	-	-	-	Pb	-	0,002	-	-	-	-	-	-
SrO	-	0,44	5,46	bdl	0,74	bdl	0,01	bdl	Sr	-	0,008	0,231	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
Na <sub>2</sub> O	-	-	0,24	bdl	bdl	3,97	1,04	bdl	Na	-	-	0,044	0,000	0,000	1,082	0,157	0,000
K <sub>2</sub> O	-	-	-	bdl	bdl	0,27	3,09	bdl	K	-	-	-	0,000	0,000	0,049	0,310	0,000
Cl	-	-	5,93	bdl	bdl	0,65	1,73	bdl	Cl	-	-	0,959	0,000	0,000	0,155	0,235	0,000
F	-	-	0,34	bdl	bdl	0,20	0,22	bdl	F	-	-	0,101	0,000	0,000	0,090	0,054	0,000



Obr. 5: a) - Ramanovo spektrum grafitu a karbonátu; b) - MSI obsahující grafit.

Fig. 5: a) - Raman spectrum of graphite and carbonate; b) - MSI containing graphite.



Obr. 6: a) - Klasifikační diagram Ca amfibolu v MSI; b) - Zastoupení Ba a  ${}^1\text{Al}$  v barnaté slídě indikující substituční trend od flogopitu (Phl) ke kinoshitalitu (Kns); c) - Ternární graf chemického složení karbonátů v MSI (podle HAWTHORNE *et al.* 2012).

Fig. 6: a) - Classification diagram of Ca-amphibole in MSI; b) - Ba and  ${}^1\text{Al}$  content in Ba-mica indicating a substitution trend from phlogopite (Phl) to kinoshitalite (Kns); c) - Ternary diagram of carbonate compositions in MSI (after HAWTHORNE *et al.* 2012).

Barnatá slída obsahuje 11,6–19,8 hm. % BaO (0,33–0,61 *apfu* v I-pozici) a má Mg# v rozmezí 0,87–0,94. Jde o pevný roztok flogopitu a kinoshitalitu (obr. 6b). Obsahy Na (0,09–0,29 *apfu*), Sr (0–0,01 *apfu*), Cl (0,08–0,33 *apfu*) a F (0–0,13 *apfu*) jsou nízké. Hodnoty Mg# ~ 0,94 u olivínu odpovídají téměř čistému forsteritu, zatímco obsah Ni (0,005–0,006 *apfu*) a Mn (0–0,016 *apfu*) je v olivínu nízký.

Karbonáty v MSI odpovídají dolomitu a magnezitu. Obsah FeO je vyšší v magnezitu (4,13 hm. % oproti 1,49 hm. % v dolomitu; obr. 6c).

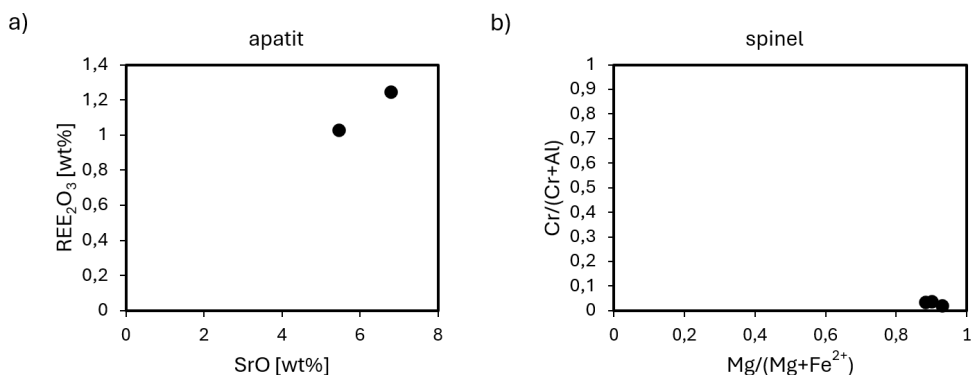
Spinel má vysoké Mg# ( $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ ) v rozmezí 0,87–0,93 a nízké Cr# ( $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ ) 0,02–0,04 (obr. 7b). Obsahy  $\text{Fe}^{3+}$  jsou ve spinelu velmi nízké (0,01–0,07 *apfu*), hodnoty Ti se pohybují kolem meze detekce EPMA.

Apatit má vysoké obsahy SrO (5,46–6,8 hm. %) a Cl (5,75–5,93 hm. %; 0,79–0,96 *apfu*), dále je obohacen o LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\sum\text{REE}_2\text{O}_3$  1,02–1,24 hm. %; obr. 7a). Jeho obsahy F (0–34 hm. %; 0–0,10 *apfu*) a OH (0–0,21 *apfu*) jsou nízké. Podle IMA nomenklatury (PASERO *et al.* 2010) odpovídá tento apatit chlorapatitu.

Monazit je charakteristický extrémním nabožením LREE, přičemž La je převažující REE prvek, jedná se tedy o monazit-(La). Monazit-(La) je bohatý ThO<sub>2</sub> (14,54 hm. %) a chudý U<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,51 hm. %).

### Chemické složení MSI

Chemické složení bylo přepočteno pro 38 izometrických MSI, bez výraznějších projevů alterace, retrográdních reakcí, rekrystalizace hostitelského granátu či difúzních lemů. Předpokládáme, že rozdíly v chemickém složení pro jednotlivé MSI souvisí s malou plochou minerálů v jednotlivých MSI, a že zachycené médium mělo uniformní chemické složení. Spočtené průměrné chemické složení MSI (viz tab. 3) nám tedy poskytuje dobrou příbližnou charakteristiku metasomatického média.



Obr. 7: a) – Obsah REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a SrO v apatitu; b) – Poměr Mg# a Cr# ve spinelu.

Fig. 7: a) – REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SrO content in apatite; b) – Mg# vs. Cr# ratio in spinel.

Tabulka 3. Průměrné celkové chemické složení MSI (n = 38).

Table 3. Average bulk chemical composition of MSI (n = 38).

MSI	Zöblitz	vrt T7	Plešovice	MSI	Zöblitz	vrt T7	Plešovice
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,21	3,77	1,63	BaO	3,65	2,11	1,46
SiO <sub>2</sub>	29,22	25,99	19,57	SrO	0,18	0,52	0,43
TiO <sub>2</sub>	1,48	4,61	0,72	FeO	3,16	3,60	1,32
ThO <sub>2</sub>	0,27	0,12	-	NiO	0,05	0,06	-
UO <sub>2</sub>	0,05	0,00	-	ZnO	0,02	0,06	-
CO <sub>2</sub>	8,14	7,10	22,09	PbO	0,00	0,00	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,76	15,89	9,44	CoO	0,00	0,00	-
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,00	-	Na <sub>2</sub> O	2,14	2,15	0,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,34	0,17	1,12	K <sub>2</sub> O	0,81	0,34	5,18
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,00	-	C	0,61	0,00	-
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39	0,36	-	S	0,17	0,00	-
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,33	0,37	-	Pb	0,33	0,03	-
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,03	-	Ni	0,11	0,00	-
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,06	-	As	0,15	0,00	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,00	-	Cu	0,01	0,00	-
WO <sub>3</sub>	0,79	0,23	-	Fe	0,09	0,00	-
SO <sub>3</sub>	-	-	0,02	F	0,15	0,11	0,09
CaO	8,31	12,29	16,63	Cl	0,83	0,50	0,03
MnO	0,03	0,05	0,05	H <sub>2</sub> O	1,62	1,54	2,21
MgO	21,71	18,10	18,13	O = F, Cl	-0,22	-0,16	-0,04

## DISKUSE

### Zachycení metasomatického média a vznik MSI

Pravidelná distribuce MSI v granátu II v pyroxenitu ze Zöblitz svědčí pro primární zachycení metasomatického média současně s růstem této generace granátu.

MSI mají typicky negativní krystalový tvar granátu, který je daný strukturou hostitelského granátu, a minimální projevy dekrepitace, což indikuje, že složení zachyceného metasomatického média nebylo výrazně modifikováno jeho únikem během dekrepitace. Slabé projevy dekrepitace byly pozorovány také u MSI z vrtu T7 (ČOPIJKOVÁ a KOTKOVÁ 2018; KOTKOVÁ *et al.* 2021). Oproti tomu v některých jiných plášťových horninách, např. gföhlské jednotky moldanubika, jsou projevy dekrepitace výrazné, projevující se vznikem offshootů (trhlin) a haló tvořeného četnými drobnými fluidními inkluzemi kolem MSI i nápadnou rekrystalizací a difúzní modifikací chemického složení hostitelského granátu kolem MSI (TALACKO 2024; KUBEŠ *et al.* 2024).

Pokud porovnáme velikost MSI ze Zöblitz s velikostí MSI z vrtu T7 (ČOPIJKOVÁ a KOTKOVÁ 2018; KOTKOVÁ *et al.* 2021), ale také s velikostí MSI z peridotitů v moldanubiku (ACKERMAN *et al.* 2020; NAEMURA *et al.* 2015; 2018; TALACKO 2024), tak MSI ze Zöblitz jsou z nich nejmenší. S jejich malou velikostí mohou souviset i pozorované velmi slabé projevy dekrepitace (FREZZOTTI a FERRANDO 2007; 2015). Malá velikost MSI z lokality Zöblitz může souviset s rychlým růstem hostitelského granátu v době jejich zachycení, což mohlo omezit prostor pro vývoj větších inkluzí.

Vrcholné podmínky metamorfózy (850–900 °C a 3,0–3,5 GPa; SCHMÄDICKE a EVANS 1997) a růstu granátů v hostitelském peridotitu odpovídají pravděpodobně i růstu granátů I v pyroxenitové žíle. K růstu granátů II a zachycení MSI tak došlo patrně za nižších PT podmínek již během inerciálního výzdvihu hornin. Během dalšího výzdvihu horniny dochází potom ke krystalizaci fází v MSI ze zachyceného média, ale i k úniku fluid z MSI dekrepitací (FREZZOTTI a FERRANDO 2015). Slabé projevy dekrepitace, absence fluid, absence dutin v MSI (po fluidech) a vysoký podíl pevné fáze svědčí pro vysokou hustotu zachyceného metasomatického média.

### Minerální asociace MSI

Převažující subhedrální až euhedrální hranice mezi fázemi a polygonální stavba v MSI indikuje, že většina fází v MSI je v rovnováze. Pokud se v MSI nachází olivín, množství amfibolu je relativně nízké (viz obr. 8a). Sporadický výskyt olivínu může indikovat, že se jedná o pevnou fázi zachycenou společně s metasomatickými fluidy (tzv. incidentally trapped phase; ROEDDER 1965). Avšak rovnovážné hranice s ostatními minerály v MSI a jeho výskyt výhradně v MSI, nepokračující do hostitelského granátu (obr. 3a, d) hovoří proti této teorii. Další možné vysvětlení je, že olivín krystalizoval ze zachyceného média dříve a posléze je zatlačován amfibolem, jak by mohly dokládat zaoblené hranice pozorované někdy mezi olivínem a amfibolem (obr. 3d). Další možné vysvětlení přítomnosti olivínu je kombinace obou zmíněných procesů, jak předpokládá ACOSTA-VIGIL *et al.* (2024). Avšak převažující pravidelné, rovnovážné hranice mezi olivínem a amfibolem svědčí spíše pro jejich současnou re/krystalizaci (obr. 3a, c). Únik fluid doložený trhlinami kolem MSI může být další možností, jak vysvětlit vznik vysokého podílu olivínu a nízkého podílu amfibolu v některých MSI.

Vysoký podíl karbonátů indikuje, že se jedná o zachycenou karbonát-silikátovou taveninu. Objemový podíl Ba slídy roste společně s rostoucím podílem karbonátů (obr. 8b), což podporuje vznik barnaté slídy z Ba vázaného na karbonátovou komponentu taveniny. Na druhou stranu, objemové zastoupení amfibolu a olivínu klesá se stoupajícím obsahem karbonátů (obr. 8c; korelační koeficient 0,72) a barnaté slídy (viz obr. 8d). Amfibol a olivín představují hlavní minerály vznikající ze silikátové komponenty taveniny.

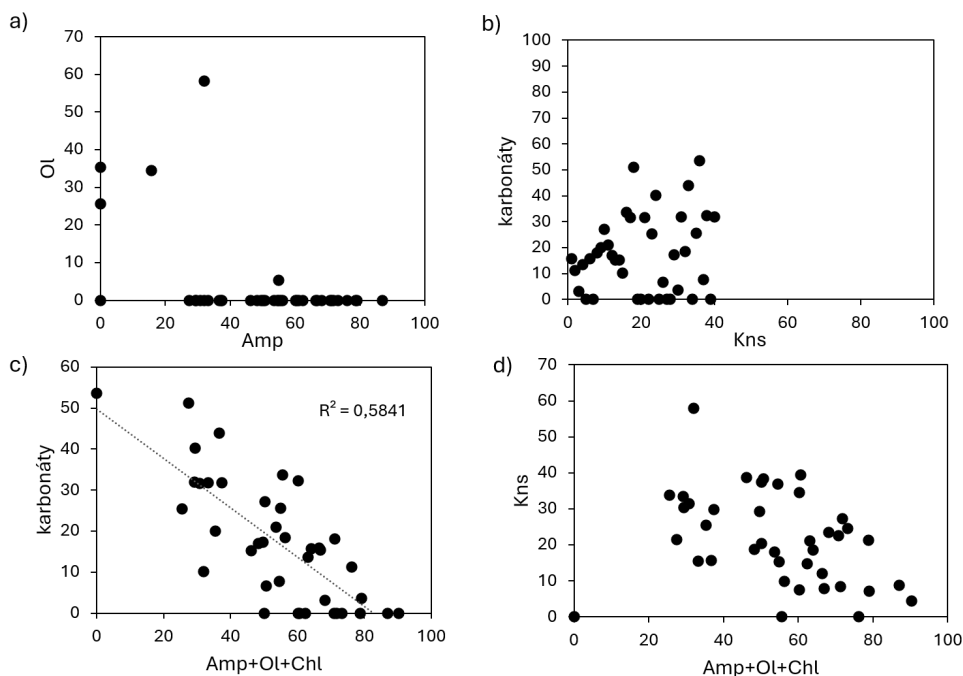
Granát (Gr<sub>T</sub>) tvořící ojediněle nesouvislý lem při kontaktu hostitelského granátu a ostatních minerálů v MSI (obr. 3f) představuje produkt rozpouštění hostitelského granátu a reprecipitaci nového granátu (Gr<sub>T</sub>) s mírně odlišným chemickým složením. MSI obsahující tento typ granátu nebyly použity při výpočtu chemického složení MSI.

Minerální asociace v MSI je neobvykle pestrá. Minerální asociace a modální zastoupení minerálů v MSI byly porovnány s jinými asociacemi popsány z plášťových hornin Českého masivu. Nalezené minerální asociace v MSI v pyroxenitu z Zöblitz jsou v mnoha ohledech velmi blízké asociaci v MSI v pyroxenitu i okolním peridotitu ve vrtu T7 (KOTKOVÁ *et al.* 2021; ČOPIJKOVÁ a KOTKOVÁ 2018). Na obou lokalitách byly nalezeny silikáty (pargasit, Ba slída složením odpovídající flogopitu až kinoshitalitu), karbonáty (s převahou magnezitu nad dolomitem), oxidy (spinel, rutil, thorianit, ilmenit), fosfáty (apatit, monazit), sulfidy (pyrhotin, galenit, pentlandit, arsenopyrit, chalkopyrit, gersdorffit), selenit a grafit. Rovněž modální zastoupení fází si je blízké, ačkoli ve vrtu T7 výrazněji kolísá v závislosti na litologii, tzn. zda se jedná o MSI v granátech pyroxenitu, lherzolitu či harzburgitu (KOTKOVÁ *et al.* 2021). Avšak nejvýraznější rozdíl je absence olivínu v MSI z vrtu T7.

V MSI, uzavřených ve spinelu, v peridotitu od Plešovic v moldanubiku jižních Čech je vyšší podíl karbonátů (dolomit, kalcit, magnezit a norsetit) a barnaté slídy. Amfibol zde chybí (NAEMURA *et al.* 2015; 2018). Rovněž pro MSI z Plešovic je charakteristická pestrá asociace vedlejších a akcesorických minerálů zahrnující apatit, monazit, thorianit, grafit a Ti-oxidy. MSI z Plešovic obsahují i řadu dalších akcesorických minerálů (witherit, strontianit, koragoit, maucherit a burbankit), které nebyly nalezeny ani v MSI z Zöblitz ani

v MSI z vrtn T7. Minerální asociace v MSI v granátech z peridotitů a s nimi asociujících pyroxenitů gřohlské jednotky z moravské části moldanubika (lokality Nové Dvory a Drahonín; KUBEŠ *et al.* 2024; TALACKO 2024) a kutnohorského krystalinika (lokality Bečváry a Úhrov; ACKERMAN *et al.* 2020) jsou výrazně odlišné, charakteristické vysokým podílem Ti-minerálů (Rt, Ilm) a spinelu, které převažují nad silikáty (Opx a Amp), případně s výskytem bimodální asociace, Ti-bohatých oxidických MSI (s převahou rutilu/ilmenitu a spinelu nad silikáty Ol+Opx+Amp±Cpx) a karbonáto-silikátových MSI s relativně jednoduchou minerální asociací Amp±Spl±Mgs±Dol±Phl±Ap±Gr±Pnt.

MSI v eklogitech z lokality Nové Dvory se vyznačují jednoduchou asociací Hbl+Chl+Phl+Dol, doplněnou o albit, draselný živec, kalcit a apatit (FARYAD *et al.* 2013). Naproti tomu multifázové inkluze v eklogitech krušnohorského krystalinika uložené v rulách (tzv. seidenbachitech s výskytem mikrodiamantů) obsahují granitickou asociaci (tzv. nanogranity). Převažuje v nich kumdykolit, křemen, kokchetavit, biotit a fengitická světlá slída, minoritně je zastoupený kalcit, rutil, apatit, grafit a sulfidy (BORGHINI *et al.* 2023). Taveniny metasomatizující eklogity byly tedy derivované z hostitelských rul.



Obr. 8: a) – Korelace výskytu amfibolu a olivínu; b) – Korelace výskytu kinoshitalitu a karbonátu; c) – Korelace výskytu karbonátu vs. amfibolu, olivínu a chloritu; d) – Korelace výskytu kinoshitalitu vs. amfibolu, olivínu a chloritu; V případě přítomnosti chloritu v MSI, bylo jeho objemové zastoupení připočteno k amfibolu vzhledem k jeho sekundárnímu vzniku.

Fig. 8: a) – Correlation between amphibole and olivine occurrence; b) – Correlation between kinoshitalite and carbonate occurrence; c) – Correlation between carbonate vs. amphibole, olivine, and chlorite occurrence; d) – Correlation between kinoshitalite vs. amphibole, olivine, and chlorite occurrence; In cases where chlorite is present in MSI, its volume proportion was added to amphibole due to its secondary origin.

## Chemické složení metasomatického média

Ačkoli chemické složení metasomatického média po jeho zachycení granátem může být částečně modifikováno řadou dalších procesů, jako je dekrepitace, rozpouštění a reprecipitace hostitelského granátu nebo difúzní výměna prvků (FREZZOTTI a FERRANDO 2015), spočtené průměrné chemické složení MSI poskytuje jeho dobrou přibližnou charakteristiku. Vliv výše uvedených procesů jsme se pokusili minimalizovat výběrem vhodných MSI. Chemické složení MSI z granátického pyroxenitu ze Zöblitz můžeme interpretovat jako zachycenou karbonáto-silikátovou taveninu. Dále v ní byly významně zastoupeny volatilie, mimo  $\text{CO}_2$  také  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cl} \gg \text{F}$ ,  $\text{P}$  a  $\text{S}$ . Vysoké obsahy některých prvků, které jsou v plášti nekompatibilní, jako jsou  $\text{Ba}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Th}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{LREE}$ ,  $\text{W}$  a  $\text{As}$  indikují, že tyto taveniny nemohly být pouze generované tavením pláště, ale došlo zde k přínosu prvků z korových hornin.

Celkové chemické složení MSI ze Zöblitz je velmi blízké MSI z vrhu T7 u obce Staré (KOTKOVÁ *et al.* 2021). Obsahují srovnatelné obsahy  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  a  $\text{CaO}$  (viz obr. 9a). MSI z pyroxenitů jsou různou měrou nabožacené  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  a  $\text{CO}_2$  oproti plášti, přičemž MSI z Zöblitz jsou relativně bohatší  $\text{K}_2\text{O}$  a  $\text{BaO}$ , zatímco obsah  $\text{TiO}_2$  je nižší. Nabožacení  $\text{K}$  a  $\text{Ba}$  odráží větší zastoupení barnaté slídy v MSI z Zöblitz. Vyšší obsah  $\text{TiO}_2$  v pyroxenitu z vrhu T7 se odráží i v přítomnosti hojných Ti-minerálů v matrix a jednofázových inkluzích v granátech. Oproti tomu pyroxenit z lokality Zöblitz má nápadně nižší zastoupení  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{BaO}$  a  $\text{SrO}$  v porovnání s pyroxenitem z vrhu T7 (viz obr. 9a). To odráží vyšší zastoupení flogopitu a apatitu v pyroxenitu z vrhu T7. MSI z obou lokalit mají srovnatelné nabožacení  $\text{LREE}$  a tvar  $\text{REE}$  křivky (viz obr. 9b) kopírující tvar  $\text{REE}$  křivky v pyroxenitu.

Multifázové pevné inkluze v granátickém pyroxenitu z lokality Zöblitz jsou oproti peridotitu z Plešovic (NAEMURA *et al.* 2018) bohatší silikátovou komponentou ( $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dále i  $\text{BaO}$ , a extrémně nabožacené  $\text{Na}_2\text{O}$ , ale jsou chudší zejména o  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SrO}$  a  $\text{CO}_2$  (viz obr. 9a). Tyto rozdíly odráží vyšší podíl karbonátů a fosfátů, absenci pargasitu a vyšší podíl  $\text{Ba}$  slídové komponenty ve slídách v MSI z Plešovic.

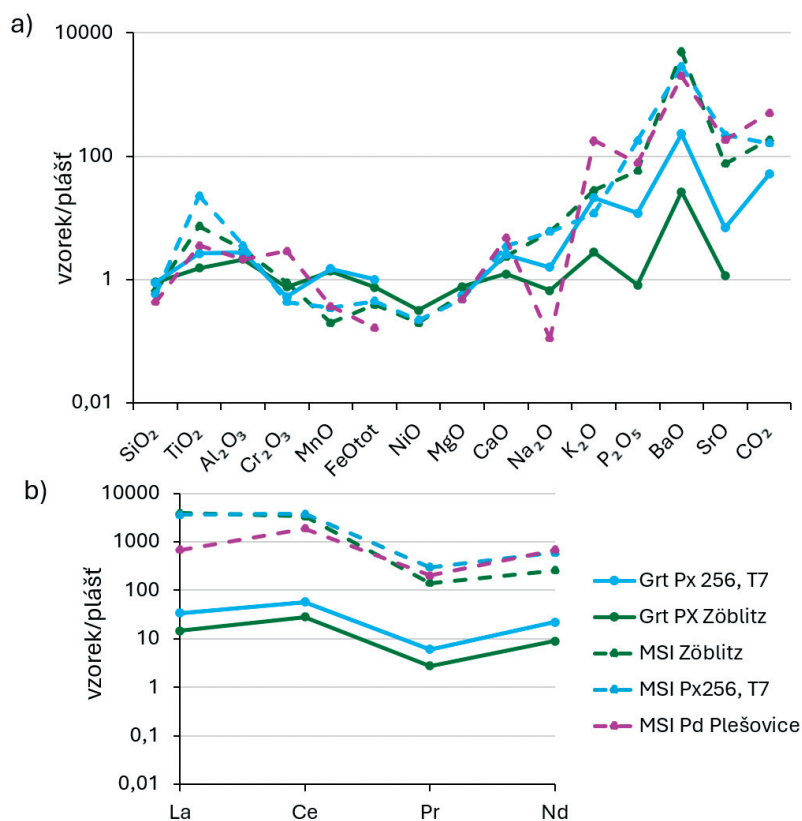
Karbonát-silikátové taveniny v Plešovicích vykazují vyšší podíl karbonátové komponenty a jsou na rozdíl od studovaných pyroxenitů uzavřeny ve spinelu, tedy zachyceny v mělčích patrech metasomatizovaného pláště před jeho subdukcí (NAEMURA *et al.* 2018).

## Plášťová metasomatóza v Českém masivu - význam $\text{CO}_2$ -bohatých fluid a tavenin

$\text{CO}_2$  bohatá fluida a taveniny představují významný metasomatický činitel v litosférickém plášti (FREZZOTTI a TOURET 2014). Vzhledem k nestabilitě primárních karbonátů v plášti je však mnohdy problém tato fluida v plášťových horninách doložit. V teplotním rozsahu mezi 800 a 1100 °C a při poklesu tlaku pod 2–2,4 GPa během dekomprese je reakční kinetika velmi rychlá a primární karbonáty (obvykle magnezit a dolomit) se rozkládají a uvolňují  $\text{CO}_2$  a dochází rychle k degazaci pláště (FREZZOTTI a TOURET 2014). Právě MSI, drobné polyfázové inkluze uzavřené v granátech a uchráněné před degazací během dekomprese, nám poskytly cenné informace o přítomnosti a charakteru  $\text{CO}_2$ -bohatých metasomatických fluid a tavenin v plášťových horninách Českého masivu.

Při metasomatóze pláště karbonát-silikátovými taveninami podobnými kimberlitovým taveninám jsou v MSI přítomné komplexní minerální asociace s exotickými minerály, jako je tomu na lokalitách v saxothuringiku (Zöblitz a vrt T7) a na lokalitě Plešovice (gföhlská jednotka moldanubika jižních Čech). Přičemž charakteristický je zvýšený obsah prvků typických pro přínos korové komponenty (ČOPIAKOVÁ a KOTKOVÁ 2018; KOTKOVÁ *et al.* 2021; NAEMURA *et al.* 2018). Tyto taveniny jsou charakterizovány hojným výskytem MSI a slabými projevy dekrepitace. Naopak C-O-H(N) fluida, derivovaná z bazaltických tavenin, které se uplatňovaly při metasomatóze peridotitů na lokalitách Nové Dvory a Drahonín (gföhlská jednotka moravské části moldanubika) či Bečváry (kutnohorské krystali-

nikum), vykazují jednodušší minerální asociace s menším počtem fází v MSI (ACKERMAN *et al.* 2020; KUBEŠ *et al.* 2024; TALACKO 2024). Po zachycení vykazují tyto MSI velmi výraznou dekrepitaci, a tedy částečný únik metasomatického média.



Obr. 9: a) - Graf ukazující průměrné celkové chemické složení MSI a chemické složení hostitelského pyroxenitu z Zöblitz, vrtu T7 a Plešovic; hodnoty normalizované plášťem (MCDONOUGH a SUN 1995); b) - Obsahy LREE v MSI a hostitelském pyroxenitu z Zöblitz, vrtu T7 a Plešovic; hodnoty normalizované plášťem (MCDONOUGH a SUN 1995).

Fig. 9: a) - Diagram showing average bulk chemical composition of MSI and chemical composition of host pyroxenite from Zöblitz, drill core T7, and Plešovice; values normalized to the primitive mantle (MCDONOUGH and SUN, 1995); b) - LREE concentrations in MSI and host pyroxenite from Zöblitz, drill core T7 and Plešovice; values normalized to the primitive mantle (MCDONOUGH and SUN, 1995).

## ZÁVĚR

Studium multifázových pevných inkluzí v žíle granátického pyroxenitu peridotitového tělesa u Zöblitz, zachycených v granátu, poskytlo informace o procesech metasomatózy v plášti v podmínkách stability granátu.

Mísení plášťového materiálu s korovou komponentou je vidět v pestrosti minerální asociace v multifázových pevných inkluzích obsahujících pargasit, Ba slídu, magnezit, dolomit, spinel, apatit, grafit, olivín, scheelit, thoranit, monazit-(La), REE karbonát, pentlandit, galenit, pyrhotin, arsenopyrit, chalkopyrit, gersdorffit, rutil, ilmenit a minerály crichtonitové skupiny. Velká pestrost minerální asociace v MSI z pyroxenitu z Zöblitz a jejich chemické složení je velmi blízké MSI popsaným z vrhu T7 (KOTKOVÁ *et al.* 2021) v Českém masivu.

Celkové chemické složení multifázových pevných inkluzí indikuje vznik ze zachycené karbonát-silikátové taveniny, která byla v hornině přítomna během krystalizace druhé generace granátu, patrně během iniciální dekomprese. Oproti tomu velká zrna granátu I, neobsahující MSI, rostla za vrcholných metamorfických podmínek stanovených na 850–900 °C a 3,0–3,5 GPa (SCHMÄDICKE a EVANS 1997).

Během metasomatózy došlo k přenosu prvků z kůry do pláště v subdukčním prostředí. MSI obsahovaly významný podíl prvků (Ba, K, Na, Th, U, LREE, W, CO<sub>2</sub>, P, H<sub>2</sub>O a Cl), které jsou nekompatibilní s plášťovými minerály.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento výzkum byl podpořen z projektu 22-33820S financovaného Grantovou agenturou ČR.

## POUŽITÉ ZDROJE

- ACKERMAN, L., KOTKOVÁ, J., ČOPIAKOVÁ, R., SLÁMA, J., TRUBAČ, J., DILLINGEROVÁ, V., 2020: Petrogenesis and Lu-Hf dating of (ultra) mafic rocks from the Kutná Hora Crystalline Complex: implications for the Devonian evolution of the Bohemian Massif. – *Journal of Petrology*, 61, 8, 1–31.
- ACOSTA-VIGIL, A., KOTKOVÁ, J., ČOPIAKOVÁ, R., WIRTH, R., HERMANN, J., 2024: Experimental constraints on the nature of multiphase solid inclusions and their bearing on mantle wedge metasomatism, Bohemian Massif. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 179, 71, 1–23. doi: 10.1007/s00410-024-02132-1.
- ANTHONY, W., BIDEAUX, R. A., BLADH, K. W., NICHOLS, M. C. (Eds.), 1991, 1995, 1997, 2001, 2003: *Handbook of Mineralogy*, Mineralogical Society of America, Chantilly, VA 20151-1110, USA. Vol I (588), Vol II (904), Vol III (628), Vol IV (680), Vol V (813).
- BORGHINI, A., NICOLI, G., FERRERO, S., O BRIEN, P., LAURENT, O., REMUSAT, L., BORGHINI, G., MILANI, S., 2023: The role of continental subduction in mantle metasomatism and carbon recycling revealed by melt inclusions in UHP eclogites. – *Science Advances*, 9, 6, 1–11.
- CARSWELL, D. A., VAN ROERMUND, H. L. M., 2005: On multi-phase mineral inclusions associated with microdiamond formation in mantle-derived peridotite lens at Bardane on Fjortoft, west Norway. – *European Journal of Mineralogy*, 17, 31–4.
- ČOPIAKOVÁ, R., KOTKOVÁ, J., 2018: Composition of barian mica in multiphase solid inclusions from orogenic garnet peridotites as evidence of mantle metasomatism in a subduction zone setting. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173, 106, 1–19.
- ČOPIAKOVÁ, R., KOTKOVÁ, J., 2023: Metasomatóza plášťových hornin v oblasti Saxothuringika, lokalita Zöblitz. – In: Majzlan, J., Ozdin, D. (Eds.): *Mineralogická konferencia, Volary 18. května 2023. Zborník abstraktov*, Vyšná Boca.
- DOBZHINETSAYA, L. F., GREEN, H. W., BOZHILOV, N. K., MITCHELL, T. E., DICKERSON, R. M., 2003a: Crystallization environment of Kazakhstan microdiamond: Evidence from nanometric inclusions and mineral associations. – *Journal of Metamorphic Geology*, 21, 425–437.
- DOBZHINETSAYA, L. F., GREEN, H. W., WESCHLER, M., DARUS, M., WANG, H. J., MASSONNE, H. J., STÖCKHERT, B., 2003b: Focused ion beam technique and transmission electron microscope studies of microdiamonds from the Saxonian Erzgebirge, Germany. – *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 399–410.

- DOBZHINETSAYA, L. F., 2012: Microdiamonds—Frontier of ultrahigh-pressure metamorphism: A review. — *Gondwana Research*, 21, 207–223.
- FARYAD, S. W., JEDLICKA, R., ETTINGER, K., 2013: Subduction of lithospheric upper mantle recorded by solid phase inclusions and compositional zoning in garnet: Example from the Bohemian Massif. — *Gondwana Research*, 23, 3, 944–955.
- FARYAD, S. W., JEDLICKA, R., HAUZENBERGER, C., RACEK, M., 2018: High-pressure crystallization vs. recrystallization origin of garnet pyroxenite-eclogite with in subduction related lithologies. — *Mineralogy and Petrology*, 112, 603–616.
- FERRANDO, S., FREZZOTTI, M. L., DALLAI, L., COMPAGNONI, R., 2005a: Fluid-Rock Interaction in UHP phengite-kyanite-epidote eclogite from the Sulu orogen, Eastern China. — *International Geology Review*, 47, 7, 750–774.
- FERRANDO, S., FREZZOTTI, M. L., DALLAI, L., COMPAGNONI, R., 2005b: Multiphase solid inclusions in UHP rocks (Su-Lu, China): Remnants of supercritical silicate-rich aqueous fluids released during continental subduction. — *Chemical Geology*, 223, 1-3, 68–81.
- FERRANDO, S., FREZZOTTI, M. L., PETRELLI, M., COMPAGNONI, R., 2009: Metasomatism of continental crust during subduction: The UHP whiteschists from the Southern Dora-Maira Massif (Italian Western Alps). — *Journal of Metamorphic Geology*, 27, 739–756.
- FREZZOTTI, M. L., FERRANDO, S., 2007: Multiphase solid inclusions in ultrahigh-pressure metamorphic rocks: A petrographic approach. — *Periodico di Mineralogia*, 76, 2-3, 113–125.
- FREZZOTTI, M. L., FERRANDO, S., 2015: The chemical behavior of fluids released during deep subduction based on fluid inclusions. — *American Mineralogist*, 100, 352–377.
- FREZZOTTI, M. L., TOURET, J., 2014: CO<sub>2</sub>, carbonate-rich melts, and brines in the mantle — *Geoscience Frontiers*, 5, 5, 697–710.
- HAWTHORNE, F. C., OBERTI, R., HARLOW, G. E., MARESC, W. V., MARTIN, R. F., SCHUMACHER, J. C., WELCH, M. D., 2012: Nomenclature of the amphibole supergroup. — *American Mineralogist*, 97, 2031–2048.
- HWANG, S., SHEN, P., YUI, T., CHU, H., 2003: Metal-sulfur-COH-silicate fluid mediated diamond nucleation in Kokchetav ultrahigh-pressure gneiss. — *European Journal of Mineralogy*, 15, 503–511.
- HWANG, S., SHEN, P., CHU, H., YUI, T., LIU, J. G., SOBOLEV, N. V., SHATSKY, V. S., 2005: Crust-derived potassic fluid in metamorphic microdiamond. — *Earth and Planetary Science Letters*, 231, 295–306.
- HWANG, S., CHU, H., YUI, T., SHEN, P., SCHERTL, H. P., LIU, J. G., SOBOLEV, S. V., 2006: Nanometer-size P/K-rich silica glass (former melt) inclusions in microdiamond from the gneisses of Kokchetav and Erzgebirge massifs: diversified characteristics of the formation media of metamorphic microdiamond in UHP rocks due to host-rock buffering. — *Earth and Planetary Science Letters*, 243, 94–106.
- KOTKOVÁ, J., ČOPIJKOVÁ, R., ŠKODA, R., 2021: Multiphase solid inclusions reveal the origin and fate of carbonate-silicate melts in metasomatised peridotite. — *Lithos*, 398–399, 1–25.
- KUBEŠ, M., ČOPIJKOVÁ, R., KOTKOVA, J., ACKERMAN, L., HAIFLER, J., VÝRAVSKÝ, J., HOLA, M., ŠKODA, R., LEICHMANN, J., 2024: Unravelling different mechanisms of metasomatism and geodynamic evolution of pyroxenite-veined subcontinental lithospheric mantle beneath the Central European Variscides. — *Journal of Petrology*, 65, 11, 1–35.
- NAEMURA, K., SHIMIZU, I., SVOJTKA M., HIRAJIMA, T., 2015: Accessory priderite and burbankite in multiphase solid inclusions in the orogenic garnet peridotite from the Bohemian Massif, Czech Republic. — *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 110, 1, 20–28.
- NAEMURA, K., HIRAJIMA, T., SVOJTKA, M., SHIMIZU, I., IZUKA, T., 2018: Fossilized melts in mantle wedge peridotites. — *Scientific Reports*, 8, 1, 1–12.
- Mapy.cz., 2023: Zöblitz. — Online: <https://mapy.cz/zakladni?l=0&q=Z%C3%B6blitz&source=osm&id=113845&ds=1&x=13.7121304&y=50.0186654&z=8> [cit. 2023-10-08]
- MALASPINA, N., SCAMBELLURI, M., POLI, S., ROERMUND, H. L. M., LANGENHORST, F., 2010: The oxidation state of mantle wedge majoritic garnet websterites metasomatised by C-bearing subduction fluids. — *Earth and Planetary Science Letters*, 298, 417–126.
- MCDONOUGH, W. F., SUN, S. S., 1995: The composition of the Earth. — *Chemical Geology* 120, 1305, 223–253.
- PASERO, M., KAMPF, A. R., FERRARIS, C., PEKOV, I. V., RAKOVAN, J., WHITE, T. J., 2010: Nomenclature of the apatite supergroup minerals. — *European Journal of Mineralogy*, 22, 163–179.
- ROEDDER, E., 1965: Liquid CO<sub>2</sub> inclusions in olivine-bearing nodules and phenocrysts from basalt. — *Journal of Geology*, 73, 5, 628–644.
- ROERMUND, H. L. M., CARSWELL, D. A., DRURY, M. R., HEIJBOER, T. C., 2002: Microdiamond in a megacrystic garnet websterite pod from Bardane on the island of Fjærtoft, western Norway: Evidence for diamond formation in mantle rocks during deep continental subduction. — *Geology*, 30, 959–962.
- ROLLINSON, H., 2019: Dunites in the mantle section of the Oman ophiolite – the boninite connection. – *Lithos*, 310–311, 381–391.

- SCHMÄDICKE, E., EVANS, B. W., 1997: Garnet-bearing ultramafic rocks from the Erzgebirge, and their relation to other settings in the Bohemian Massif. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127, 1-2, 57-74.
- SCHMÄDICKE, E., WILL, T. M., 2023: Origin of Erzgebirge ultrahigh-pressure garnetite: Formation from a basaltic protolith by serpentinization-assisted metasomatism? – *Journal of Metamorphic Geology*, 41, 9, 1-23.
- STÖCKHERT, B., DUYSER, J., TREPMMANN, C., MASSONNE, H. J., 2001: Microdiamond daughter crystals precipitated from supercritical CO<sub>2</sub> + silicate fluids included in garnet, Erzgebirge, Germany. – *Geology*, 29, 391-394.
- STÖCKHERT, B., TREPMMANN, C. A., MASSONNE, H. J., 2009: Decrepitated UHP fluid inclusions: About diverse phase assemblages and extreme decompression rates (Erzgebirge, Germany). – *Journal of Metamorphic Geology*, 27, 673-684.
- TALACKO, J., 2024: Inkluze v granátech jako indikátory metasomatózy plášťových peridotitů z Nových Dvůrů. – MS, diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Brno.
- VRJMOED, J. C., SMITH, D. C., ROERMUND, H. L. M., 2008: Raman confirmation of microdiamond in the Svartberget Fe-Ti type garnet peridotite, Western Gneiss Region, Western Norway. – *Terra Nova*, 20, 295-301.
- WARR, L. N., 2021: IMA-CNMNC approved mineral symbols. – *Mineralogical Magazine*, 85, 291-320.
- ZHANG, Z. M., SHEN, K., LIU, J. G., DONG, X., WANG, W., YU, F., LIU, F., 2011: Fluid-rock interactions during UHP metamorphism: A review of the Dabie Sulu orogen, east-central China – *Journal of Asian Earth Sciences*, 42, 316-129.