ISSN 1211-8796

Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.
CVIII (2023): 1, 57–78, 2023

MINERALOGIE MASIVNÍHO SERPENTINU A KLINOCHLORU Z DOLOMITICKÝCH MRAMORŮ MOLDANUBIKA NA ZÁPADNÍ MORAVĚ (ČESKÝ MASIV)

MINERALOGY OF MASSIVE SERPENTINE AND CLINOCHLORE FROM THE DOLOMITIC MARBLE OF MOLDANUBICUM IN WEST MORAVIA (BOHEMIAN MASSIF)

STANISLAV HOUZAR, JIŘÍ SEJKORA, RADANA MALÍKOVÁ

Abstract

Houzar, S., Sejkora, J., Malíková, R., 2023: Mineralogie masivního serpentinu a klinochloru z dolomitických mramorů moldanubika na západní Moravě (Český masiv). – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 108, 1, 57–78 (with English summary).

Mineralogy of massive serpentine and clinochlore from the dolomitic marble of Moldanubicum in West Moravia (Bohemian Massif)

Massive aggregates of yellow-green, grey-green and brown Mg-rich phyllosilicates occur in dolomite marbles enclosed in Moldanubian gneisses and especially migmatites (Bohemian Massif). Serpentine subgroup minerals and Mg-chlorites were distinguished on the basis of X-ray and chemical studies. The serpentine is represented by Al- and Fe-poor lizardite (~0.01 *apfu* Al; 0.01–0.05 *apfu* Fe). The Mg-chlorite belongs to the clinochlore (so-called *pseudophite*), which, in addition to the significant content of Al (1.54–2.32 *apfu*), has variable content of Fe (0.03–1.07 *apfu*) and relatively low contents of Mn and Ca. Trace contents of Zn (~0.02 *apfu*) in both lizardite and clinochlore from the localities where the marbles have elevated Zn > 500 ppm are notable. Only microscopic phlogopite, fluorapatite, muscovite, titanite and tremolite were identified in the studied massive Mg-phyllosilicates. Serpentine (lizardite) was formed as part of metasomatic reaction veins (calcite-forsterite-diopside skarn), where it forms a separate monomineral zone. Clinochlore was formed by the complete replacement of plagioclase and K-feldspar along the contact of granitoid veins (metatects) intruding to the dolomite marbles, and the veins simultaneously underwent desilification. In both cases, they are products of reactions of dolomite marbles with external fluids and/or melts rich in $SiO_2 \pm Al_2O_3$ at high H_2O activities ($X_{CO_2} < 0.10–0.05$) and at T < 300°C.

Key words: serpentine, lizardite, clinochlore, dolomite marble, Moldanubicum, Bohemian Massif, Czech Republic

Stanislav Houzar, Department of Mineralogy and Petrography, Moravian Museum, Zelný trh 6, 659 37 Brno, Czech Republic, e-mail: shouzar@mzm.cz

Jiří Sejkora, Department of Mineralogy and Petrology, National Museum, Cirkusová 1740, 193 00 Praha-Horní Počernice, Czech Republic

Radana Malíková, Department of Mineralogy and Petrology, National Museum, Cirkusová 1740, 193 00 Praha-Horní Počernice, Czech Republic

1. ÚVOD

Dolomitické mramory východní části moldanubika obsahují různé minerální asociace, které v nich vznikly metamorfními reakcemi zejména v období variské orogeneze.

Výslednými produkty jsou desítky převážně drobně vtroušených vedlejších a akcesorických minerálů (Novák 1987, 1988, 1989, Houzar a Novák 2001, Houzar 2004), vzácněji i asociace metasomatických hořečnatých skarnů (např. Sekanina 1963, Novák 1986, Houzar a Trnka 1983, Houzar 1988).

Avšak téměř žádná bližší pozornost nebyla věnována texturně odchylným, masivním, žlutozeleným, zelenošedým a hnědým anchimonominerálním (tedy tvořených téměř výlučně jedním minerálem) agregátům Mg-fylosilikátů v těchto mramorech. Nejstarší badatelé je označovali názvem *ophit* a *pseudophit* a makroskopicky je odlišovali na základě barvy a celkového vzhledu (Dvorský 1898, Slavík 1901, Uličný 1901).

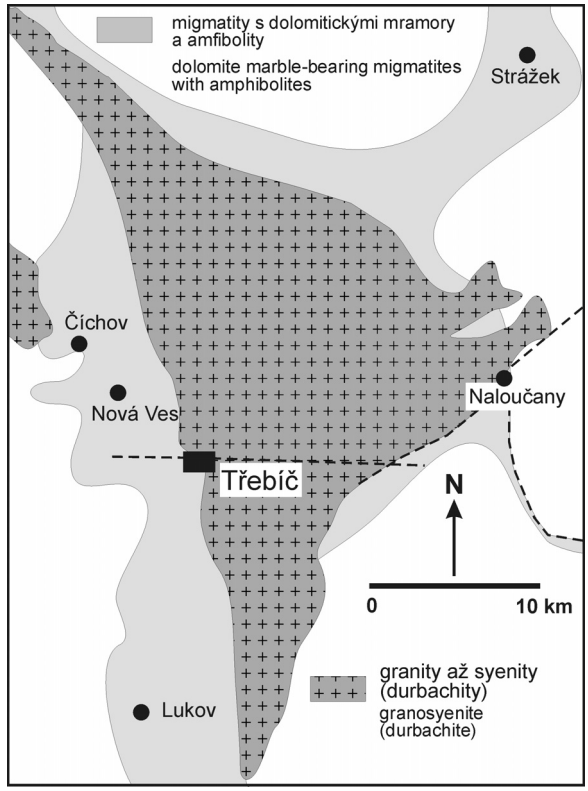
Za zmínku stojí některé historické souvislosti nálezů a výzkumu těchto a jim podobných minerálů, které mají přímý vztah k Českému masivu. Tak ***celistvý chlorit*** nazývaný ***pseudofit*** (složením šlo o pennin-klinochlor) byl poprvé na světě popsán Kenngottem (1855) společně s dalším minerálem – enstatitem (dodnes platným členem mineralogického systému). Šlo tehdy o dva nové minerály ultrabazik ze stejné lokality na severní Moravě, známé jako „Zdjar Berg“ (resp. na mapách byl tamní vrch označen pouze jako „Revier Žďár“) u Rudy nad Moravou. Zájem o tento „nový minerál“ vedl vzápětí k jeho nálezům a popisu v moldanubiku jižních Čech (např. Čkyně, Plav, Vidov). V těchto případech je tam „pseudofit“ v asociaci s mramory, příp. desilikovanými magmatickými žilami, kde vznikl po živcích (V. Zepharovich 1874, C. Rammelsberg 1873 – oba in Kratochvíl 1957 a 1962). Bližší charakteristiku lokalit Vidov a Krty však uveřejnili až daleko později Welser (1998) a Havránek *et al.* (2013).

Jako další zajímavost lze uvést zvýšený zájem o ***serpentinové minerály*** v dolomitických mramorech Českého masivu přibližně ve stejné době. Zvrásněné páskované *serpentiny* v mramorech (tzv. *Eozoon canadense*), nalezené v r. 1864 v Kanadě, byly totiž tehdy pokládány za nejstarší fosílii („obří foraminiferu“), stojící podle Ch. Darwina evolučně na rozhraní neživé a živé přírody. U nás tento názor oslovil pouze badatele v bavorské a české části Českého masivu, kde byly vzápětí popsány nové nálezy této „fosílie“ (*Eozoon bavaricum* a *Eozoon bohemicum*; např. Hochstetter 1866, Frič 1869); blíže o problematice viz Věrtelář (2012), Vrtiška (2019) a Weiss (2022). Je zvláštní, že na Moravě nenalezla tato hypotéza žádnou odezvu.

2. GEOLOGICKÁ SITUACE

Studované vzorky masivních serpentinů a chloritů (tzv. *pseudofit*) pocházejí z dolomitických mramorů západní Moravy. Ty jsou součástí pestré jednotky západomoravského a strážeckého moldanubika podél jejího styku s gföhlskou jednotkou, která tvoří tektonické nadloží (obr. 1.). Tyto jednotky náležejí k litologicky i tektonicky rozsáhlé moldanubické zóně složené z mozaiky vysoce metamorfovaných komplexů prekambrického a spodnopaleozoického stáří náležejících k Variscidám Českého masivu (Fiala *et al.* 1995, Schulmann *et al.* 2005, Finger *et al.* 2007, Lindner *et al.* 2020).

Mramory jako horniny suprakrustálního původu tvoří vložky v biotitických pararulách a migmatitech společně s amfibolity a grafitickými horninami. Primární metamorfogenní minerální asociace dolomit + kalcit + flogopit + forsterit + spinel (± chlorit ± klinohumit) odpovídají převážně prográdní polyfázové metamorfóze, rozsah retrográdní metamorfózy není dosud ve všech případech jasný (např. dedolomitizace Mg-kalcitu, retrográdní reakce Fo + Cal → Dol + Tr, serpentinizace forsteritu). Migmatitizace horninového komplexu se projevila mj. četnými proniky granitoidních žilných metatektů do mramorů a vznikem úzkých lemů skarnů (asociace wollastonit + diopsid + titanit ± grossular) na jejich kontaktech. Tyto bimetasomatické Ca-skarny jsou rozsahem nevýznamné (Novák 1988, 1989, Houzar a Novák 2001, Houzar 2004).



Obr. 1. Lokality masivního serpentinu a chloritu v mramorech moldanubika západní Moravy. Vyznačeny pestré sekvence migmatitů s dolomitickými mramory a amfibolity v okolí durbachitů třebíčského a jihlavského plutonu. Souřadnice GPS studovaných lokalit (EPGS: 4326 – WGS 84, geographic 2D): Číchov – B 49.28771, L 15.76537; Lukov B 49.06996, L 15.80693; Naloučany B 49.25222, L 16.15008; Nová Ves u Třebíče B 49.25421, L 15.80601 a Strážek B 49.44402, L 16.18578.

Fig. 1. Localities of massive serpentine and chlorite in Moldanubian marbles of Western Moravia. Marked varied sequences of migmatites including dolomitic marbles and amphibolites in the vicinity of durbachites of the Třebíč and Jihlava plutons. GPS coordinates of the studied locations (EPGS: 4326 – WGS 84, geographic 2D).

3. METODIKA

Studované vzorky pocházejí převážně ze sbírky Moravského zemského muzea, Brno, z doby před r. 1950, kdy byly menší kamenolomy v mramorech západní Moravy ještě v provozu (např. dnes nedostupný Strážek). Menší část vzorků má původ v novějších sběrech na podobných lokalitách (opuštěné kamenolomy), kde je také v současnosti dosud místy zřetelný i petrologicko-geologický kontext některých odebraných vzorků (Číchov, Lukov, Nová Ves, Naloučany).

Z nich byly vybrány barevně, texturně a parageneticky rozdílné typy, které byly dále studovány rentgenovou práškovou difrakcí (vzorky OFI -1–15). Odděleny byly poté vzorky určené jako mastek a sepiolit a zbylé byly analyzovány na elektronové mikrosondě (9 vzorků). Reprezentativní EPMA a PXRD analýzy serpentinů a chloritů jsou uvedeny v tabulkách 1, 3, 5, 8–11. U vybraných typů masivního serpentinu a klinochloru byly vypočteny

i mřížkové parametry (tab. 4 a 12). Všechny zkratky minerálů jsou uváděny podle doporučení IMA (Warr 2021).

Chemické mikroanalýzy byly provedeny přístrojem Cameca SX-100 ve Společné laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy Masarykovy univerzity a České geologické služby (Brno, Česká republika). Měření byla provedena v disperzním módu vlnové délky za následujících podmínek (analytik J. Haifler): urychlovací napětí 15 kV, proud svazku 10 nA; průměr svazku 5 μm. Standardy byly: Na (Kα) – albit, Ca (Kα) – wollastonit, Al, K (Kα) – sanidin, Al (Kα), Fe (Kα) – almandin, Mn (Kα) – Mn_2SiO_4, Ba (Lα) – baryt, Ti (Kα) – anatas Hardangervida, Si (Kα) – alamosit, Mg (Kα) – pyrop, Zn (Kα) – gahnit, Cr (Kα) – chromit, Ni (Kα) – Ni, P (Kα) – fluorapatit, F (Kα) – topaz, Cl – vanadinit, V (Kα) – $ScVO_4$, Sr (Lα) – $SrSO_4$. Naměřená data byla upravena X-PHI matrix korekcí podle Merleta (1994).

Rentgenová prášková difrakční data studovaných vzorků byla získána pomocí práškového difraktometru Bruker D8 Advance (Národní muzeum, Praha) s polovodičovým pozičně citlivým detektorem LynxEye za užití Cu*K*α záření (40 kV, 40 mA). Práškové preparáty byly naneseny v acetonové suspenzi na nosič zhotovený z monokrystalu křemíku a následně pak byla pořízena difrakční data ve step-scanning režimu (krok 0,01°, načítací čas 8 s/krok detektoru, celkový čas experimentu cca 15 hod.). Pozice jednotlivých difrakčních maxim byly popsány profilovou funkcí Pseudo-Voigt a upřesněny profilovým fitováním v programu HighScore Plus. Mřížkové parametry u vybraných vzorků (označení OFI-1, OFI-6, OFI-8, OFI-9 a OFI-14) byly zpřesněny metodou nejmenších čtverců pomocí programu Celref (Laugier, Bochu 2011).

4. CHARAKTERISTIKA MINERÁLŮ PODSKUPINY SERPENTINU A SKUPINY CHLORITŮ

Minerály podskupiny serpentinu (skupina kaolinit-serpentinu), zejména její hořečnaté členy, představují běžné minerály dolomitických mramorů. V petrologických studiích metamorfních procesů se pro ně obvykle používá jen širší termín ***serpentin*** jako označení hydratovaného Mg-fylosilikátu s chemickým vzorcem $D_3[Si_2O_5](OH)_4$, kde D = Mg, Fe, Al (v jiných horninách vstupuje i Ni, Zn aj. prvky). Někdy se rozlišují, hlavně s využitím rentgenometrických metod, také samostatné serpentiny o téměř shodném složení blízkém $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ jako **antigorit**, **chrysotil** a **lizardit**. V detailu je však rozlišování minerálů serpentinové skupiny poměrně složitou záležitostí (Dungan 1979, Wicks a O'Hanley 1988, Wicks 2000, Deer *et al.* 2009).

V případě ***chloritů*** jde rovněž o vodnaté Mg-fylosilikáty bez alkalických kovů ve struktuře, s chemickým vzorcem $A_{5-6}T_4 Z_{18}$, kde v pozici A dominuje Mg^{2+}, dále Fe^{2+} a Al^{3+} (příp. □ – vakance), v T Si^{4+}, Al^{3+} a Fe^{3+} a v pozici Z O a (OH). Strukturní vzorec je složitější $(R^{2+}_x R^{3+}_y \square_{12x-y})^{VI}_{12} (Si_z R^{3+}_{8-z})^{IV}_8 O_{20} OH_{16}$. V dolomitických mramorech se setkáváme převážně s Mg-chlority, především s **klinochlorem**. Existuje několik bližších klasifikací a dílčích jmen pro jednotlivé chlority, uváděných hlavně ve starších a regionálně zaměřených publikacích (pennin, klinochlor, sheridanit, prochlorit, ripidolit, apod.). Zjednodušené dělení na chlority dvou typů (typ I – trioktaedrické Mg-Fe chlority a typ II; dioktaedrické Al-chlority) uvádějí např. Bayliss (1975), Wiewiora a Weiss (1990) a Zane a Weiss (1998), chemické složení včetně minoritních elementů např. Deer *et al.* (2009). Teplotu vzniku Mg-chloritů lze odhadnout na základě pozitivní korelace obsahu tetraedrického Al^{IV} s růstem teploty podle rovnice T (°C) = -61.92 + 321.98Al^{IV} (Cathelineau 1988), další chloritové termometry shrnuje, společně s podrobnou diskusí složení chloritů a jejich klasifikací, nejnověji Bourdelle (2021).

5. VÝSLEDKY

5.1. Charakteristika vzorků studovaných serpentinů a chloritů

Makroskopicky bylo rozlišeno několik různě zbarvených typů celistvých serpentinů a chloritů, vyznačujících se mastným leskem a barvou kolísající od žlutavě zelené po tmavozelenou, zelenošedou až šedohnědou a hnědou. Tyto chlority mají často v mramorech charakter izolovaných budin o mocnosti cca do 10 cm. Mikroskopicky jde o obou případech o téměř izotropní agregáty fylosilikátů s nízkým dvojlomem, lokálně s vedlejším podílem karbonátů a akcesorickým flogopitem a muskovitem (obr. 2–5).

Rozlišit studované fylosilikáty na minerály podskupiny serpentinu a chlorit – klinochlor umožnil teprve chemický a zvláště pak rentgenometrický výzkum (tato práce). Podobné masivní agregáty v mramoru a zejména tenké povlaky hnědobílé až tmavohnědé barvy, byly rentgenometricky bez výjimky určeny jako mastek a dále nestudovány.

Všechny rozlišitelné typy serpentinu a chloritu jsou uvedeny v následujícím přehledu (typy A–F):

(A) – světlý, celistvý, průsvitný žlutavě zelený ***serpentin*** s úzkými žilkami serpentinového *asbestu* a bělavým diopsidem (obr. 2). Tvoří vnitřní zónu kalcit-forsteritového skarnu na styku s centrální diopsidovou zónou skarnu se sporadickým flogopitem a tremolitem (typický vzorek OFI-1; Číchov, Ve Žlebě). Stejný typ, bez diopsidu a s kalcitem, představuje vzorek ze Strážku (OFI-2).

(B) – tmavěji žlutozelený průsvitný ***serpentin***. Tvoří čočkovité monominerální agregáty max. centimetrové velikosti v kalcit-forsterit-dolomitovém mramoru, bez diopsidu, chloritu a flogopitu (typický vzorek OFI-4; Nová Ves u Třebíče); s žilkami serpentinového *asbestu*. Texturně poněkud odlišný je typ serpentinu s kalcitem a sporadickým flogopitem (tab. 2.), který tvoří centrum serpentin-kalcitové žíly v dolomitickém mramoru na téže lokalitě (obr. 3).

(C) – zelený, průsvitný celistvý agregát s ojedinělým flogopitem, hojně prostoupený tenkými žilkami kalcitu. Tvořil žílu v čistém dolomitickém mramoru. Na vzorku zachován zbytek tenké (mm) okrajové flogopitové zóny. Rentgenometricky byl určen jako chlorit – ***pseudofit*** (typický vzorek OFI-3; Lukov u Moravských Budějovic; obr. 5a). Světlejší varietou tohoto typu je monominerální převážně světle zelený, nepravidelně vybarvený *pseudofit*, který tvoří čočkovité agregáty (budiny?) v dolomitickém mramoru; mimo kontakt s živcovou horninou (typický vzorek OFI-9, obr. 5b; Nová Ves u Třebíče).

(D) – šedozelený, slabě průsvitný ***pseudofit*** na styku s úplně chloritizovaným živcem, na kontaktu s flogopitem. Místy tvoří lem o mocnosti 1 cm na kontaktu desilikované pegmatoidní žíly (s ojedinělým titanitem, flogopitem a světle růžovým klinozoisitem (typické vzorky OFI-5 a OFI-8; Nová Ves u Třebíče).

(E) – silně deformovaný celistvý bílý a šedobílý ***pseudofit*** prorůstá čistý kalcit-dolomitický mramor, místy s flogopitem a povlaky hnědého mastku (typický vzorek OFI-6; Naloučany – Vápenný).

(F) – zelenošedý ***pseudofit*** s ojedinělými žilkami *asbestu* proniká v rozvětvené žíle o mocnosti < 2 cm rekrystalovaným jemnozrnným dolomitovým mramorem, který částečně uzavírá. Při jednom okraji zachován zbytek úzké zóny flogopitu (historický vzorek OFI-13 a identický OFI-14; Strážek).

5.1.1. Minerály podskupiny serpentinu

Minerální asociace

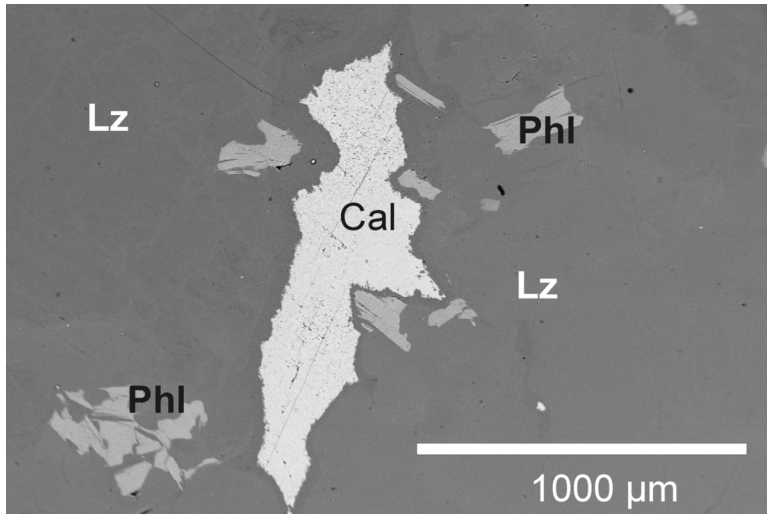
Serpentin (lizardit) tvoří anchimonominerální masivní agregáty (a samostatné zóny) o maximální mocnosti do 30 mm (jen výjimečně i větší). Časté jsou také drobné nepravidelné agregáty velikosti < 10 mm v žilách hrubozrnného kalcitu (± odmíšeným dolomitem) v serpentinovém (±forsterit) mramoru (obr. 3 a 4). Z vedlejších minerálů obsahuje kalcit a vzácněji mikroskopický flogopit a tremolit (Sekanina 1963), tab. 2.

Obr. 2. Lizardit (zelený, celistvý) a diopsid (velké růžově bílé zrno) v pozici mezi vnější forsterit-kalcitovou a vnitřní diopsidovou zónou Mg-skarnu; Číchov „Ve Žlebě“, foto J. Cága, velikost vzorku 100×50 mm.

Fig. 2. Lizardite (green, massive) and diopside (large rose-white grain) in position between outer forsterite-calcite and inner diopside zones of Mg-skarn; Číchov “Ve Žlebě”, photo by J. Cága, sample size 100×50 mm.

Obr. 3. Metasomatická reakční žíla. V centru lizardit s kalcitem, při okrajích silně serpentinizovaná forsterit-kalcitová zóna; nahoře čistý bílý dolomitický mramor; Strážek, foto J. Cága, velikost vzorku 70×60 mm.

Fig. 3. Metasomatic reaction vein. Lizardite with calcite in the centre, strongly serpentinized forsterite-calcite zone at the edges; pure white dolomite marble above; Strážek, photo by J. Cága, sample size 70×60 mm.



Obr. 4. Lizardit (Lz) s ojedinělým flogopitem (Phl) a reliktním kalcitem (Cal; s jemně odmíšeným dolomitem); Strážek, zpětně odražené elektrony, foto J. Haifler.

Fig. 4. Lizardite (Lz) with rare phlogopite (Phl) and relict calcite (Cal; with finely exsoluted dolomite); Strážek, backscattered electrons (BSE), photo J. Haifler.

Chemické složení serpentinu (lizarditu)

Žlutozelený lizardit z Číchova a Strážku se vyznačuje převážně nízkým obsahem železa (0,01–0,03 *apfu* Fe), pouze v případě tmavěji zeleného typu je jeho obsah mírně zvýšený (0,04–0,05 *apfu* Fe). Mírný deficit v pozici D může naznačovat, že část železa je přítomna jako Fe^{3+} nebo v ní existuje vakance. Obsah Al (~ 0,01 *apfu* Al), který v podobných případech může v lizarditu dosahovat až několik málo hm. % (např. Zucali *et al.* 2018), je také velmi nízký. V rámci známého statisticky mírně odlišného složení serpentinů (antigorit, chrysotil, lizardit) odpovídají obsahy Si, Mg a Al průměrnému lizarditu (srov. Page 1968). Mírně zvýšený obsah Na a K (≤ 0,06 Na a ≤ 0,11 K, obě hodnoty v *apfu*) v jednom vzorku lizarditu z Nové Vsi může odpovídat některé ze substitucí známých u minerálů serpentinové podskupiny (Wicks a O'Hanley 1988, Deer *et al.* 2009), ale u K i s možnou přítomností submikroskopického flogopitu. Za zmínku stojí stopový obsah zinku (0,05 *apfu* Zn) v lizarditu ze Strážku, protože tamní dolomitické mramory mají vyšší obsah zinku, a to až přes 500 ppm Zn; forsterit-kalcitové zóny tamních Mg-skarnů i přes 1000 ppm Zn (Novák 1987). Obsahy dalších prvků byly na hranici (Ca, Cl, Mn) a pod hranicí stanovení (Cr, Ba, F, P, Sr, Ti, V). Analýz pro bližší diskusi je však málo (tab. 1); srovnatelná data z jiných serpentinů v mramorech Českého masivu chybějí.

Tabulka 1. Reprezentativní chemické složení serpentinu – lizarditu.
Table 1. Representative chemical composition of serpentine – lizardite.

lokalita vzorek	Číchov OFI-1	Číchov OFI-1	Strážek OFI-2	Strážek OFI-2	Nová Ves OFI-4	Nová Ves OFI-4
SiO_2	42,98	42,55	42,28	42,26	43,30	43,66
Al_2O_3	0,44	0,26	0,07	0,10	0,15	0,21
FeO	0,29	0,70	0,70	0,41	1,16	0,89
MnO	0,03	0,03	0,06	0,08	0,02	0,02
MgO	40,52	39,96	40,32	40,41	39,37	40,34
CaO	0,05	0,05	0,02	0,02	0,08	0,02
ZnO	0,06	0,07	0,36	0,14	b.d.	b.d.
Na_2O	b.d.	b.d.	b.d.	0,06	0,63	0,19
K_2O	b.d.	b.d.	0,02	b.d.	1,76	0,47
H_2O*	12,62	12,45	12,47	12,41	12,68	12,77
Cl	0,06	0,17	0,06	b.d.	b.d.	b.d.
O=CL	-0,01	-0,04	-0,01			
TOTAL	97,04	96,20	96,35	95,96	99,19	98,57
Si^{4+}	2,040	2,042	2,031	2,033	2,043	2,050
Al^{3+}	0,025	0,015	0,004	0,006	0,008	0,012
Fe^{2+}	0,012	0,028	0,028	0,016	0,046	0,035
Mn^{2+}	0,001	0,001	0,002	0,003	0,001	0,001
Mg^{2+}	2,867	2,859	2,887	2,898	2,769	2,823
Ca^{2+}	0,003	0,003	0,001	0,001	0,004	0,001
Zn^{2+}	0,002	0,002	0,013	0,005		
Na^{+}				0,006	0,058	0,017
K^{+}			0,001		0,106	0,028
	2,910	2,908	2,936	2,935	2,992	2,917
H^{+}	3,995	3,986	3,995	3,983	3,990	4,000
Cl^{-}	0,005	0,014	0,005			
O^{2-}	8,995	8,986	8,995	8,983	8,990	9,000
CATSUM	4,948	4,950	4,968	4,967	5,035	4,967
AN SUM	9	9	9	9	9	9

* vypočteno ze stechiometrie; determined by stoichiometry

Celkové Fe jako Fe^{2+}; all Fe as Fe^{2+}

b.d. = pod mezí stanovení; below detection limits (u všech tabulek - for all tables)

Tabulka 2. Složení doprovodných minerálů (flogopit, kalcit) z celistvého serpentinu-lizarditu.
Table 2. Composition of accompanying minerals (phlogopite, calcite) from massive serpentine-lizardite.

Flogopit, phlogopite

lokalita vzorek	Číchov OFI-1	Strážek OFI-2	Strážek OFI-2
SiO_2	41,71	42,58	41,28
TiO_2	0,25	0,31	0,38
Al_2O_3	13,99	13,28	14,05
FeO	0,64	0,49	0,44
MgO	28,42	27,1	27,24
BaO	0,22	0,04	0,10
ZnO	b.d.	0,13	b.d.
CaO	b.d.	0,01	b.d.
Na_2O	0,03	0,49	0,32
K_2O	9,84	9,91	10,10
H_2O*	4,10	3,93	3,82
F	0,42	0,72	0,89
O=F	-0,18	-0,30	-0,37
TOTAL	99,45	98,69	98,25
Si^{4+}	2,907	2,987	2,916
Ti^{4+}	0,013	0,016	0,020
Al^{3+}	1,149	1,098	1,170
Fe^{2+}	0,037	0,029	0,026
Mg^{2+}	2,953	2,834	2,868
Ba^{2+}	0,006	0,001	0,003
Zn^{2+}	–	0,007	–
Ca^{2+}	–	0,001	–
Na^{+}	0,004	0,067	0,044
K^{+}	0,875	0,887	0,910
H^{+}	1,907	1,840	1,801
F^{-}	0,093	0,160	0,199
O^{2-}	11,907	11,840	11,801
CATSUM	7,945	7,925	7,956
AN SUM	12	12	12

* vypočteno ze stechiometrie; determined by stoichiometry

Celkové Fe jako Fe^{2+}; all Fe as Fe^{2+}

Kalcit, calcite

lokalita vzorek	Strážek OFI-2
CaO	52.77
MgO	2.28
MnO	0.09
FeO	0.09
ZnO	0.02
SrO	0.02
CO_2*	44.03
TOTAL	99.30
Ca^{2+}	0.941
Mg^{2+}	0.057
Mn^{2+}	0.001
Fe^{2+}	0.001
Zn^{2+}	0.000
Sr^{2+}	0.000
C^{4+}	1.000
CATSUM	2.000
O	3

* vypočteno ze stechiometrie; determined by stoichiometry

Rentgenometrické studium serpentinu

Rentgenová prášková data společně s chemickými analýzami potvrdila u části vzorků příslušnost k minerálům pod skupiny ***serpentinů***. Data reprezentativního vzorku OFI-1 z lokality Číchov – Ve Žlebě odpovídají trigonálnímu polytypu lizarditu-1*T* (tab. 3) a jeho zpřesněné parametry základní cely jsou v tabulce 4 porovnány s publikovanými údaji.

Tabulka 3. Rentgenová prášková data lizarditu, Číchov (OFI-1).
Table 3. X-ray powder data of lizardite, Číchov (OFI-1).

h	k	l	d_{obs}	I_{obs}	d_{calc}
0	0	1	7,286	100	7,301
0	1	0	4,568	14	4,595
0	0	2	3,647	74	3,651
1	1	0	2,649	3	2,653
1	1	1	2,4954	21	2,4935
0	0	3	2,4360	3	2,4338
1	1	2	2,1450	5	2,1461
0	0	4	1,8231	1	1,8253
1	1	3	1,7954	1	1,7934
1	2	0	1,7362	1	1,7368
0	3	0	1,5337	14	1,5317
1	1	4	1,5046	4	1,5038

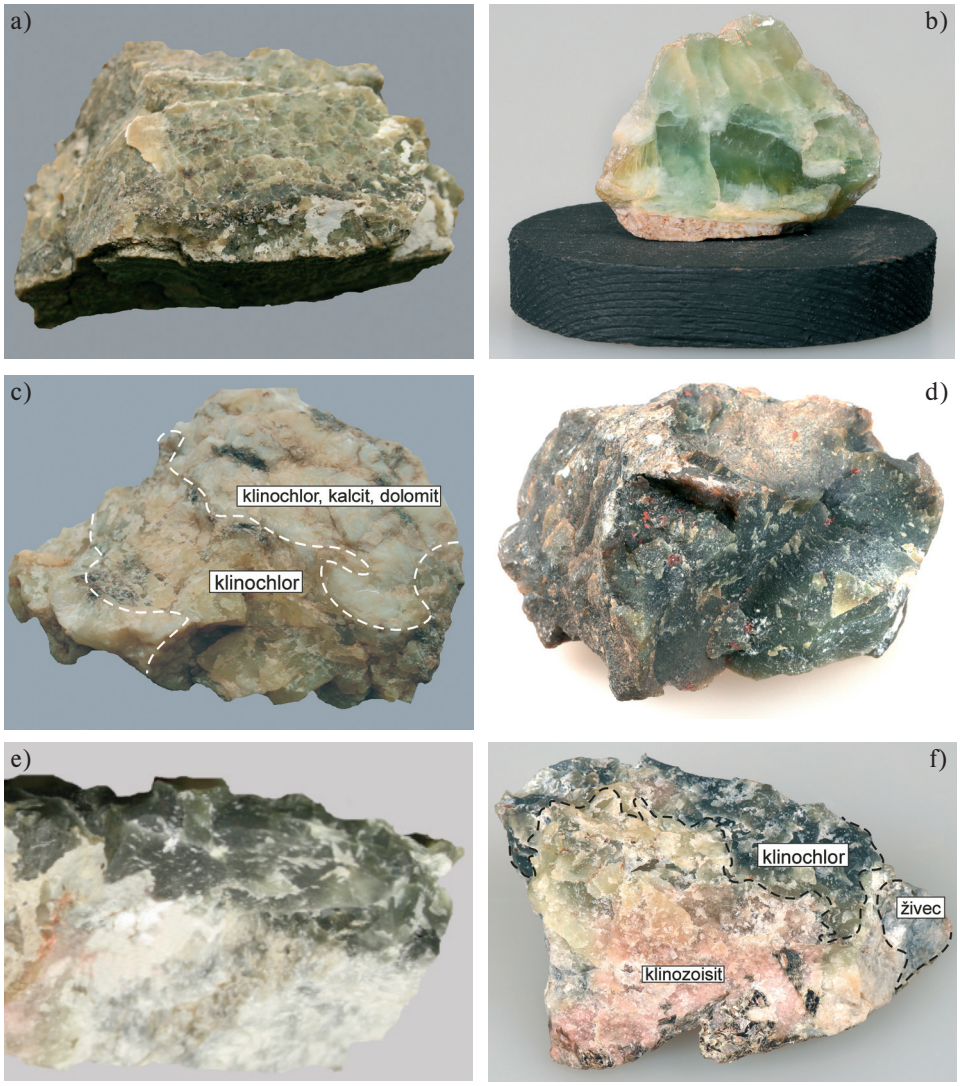
Tabulka 4. Parametry základní cely lizarditu-1T (pro trigonální prostorovou grupu $P3_1m$), OFI-1.
Table 4. Unit-cell parameters of lizardite-1T (for trigonal space group $P3_1m$), OFI-1.

	tato práce	Cressey et al. (2008)	Mellini, Zanazzi (1987)	Mellini, Zanazzi (1987)	Guggenheim, Zhan (1998)
a [Å]	5,306(6)	5,3112(6)	5,332(5)	5,325(5)	5,326(3)
c [Å]	7,3014(1)	7,3062(4)	7,233(7)	7,259(7)	7,288(5)
V [Å^3]	178,0(3)	178,5	178,1(5)	178,3(5)	179,1(2)

5.1.2. Minerály skupiny chloritů

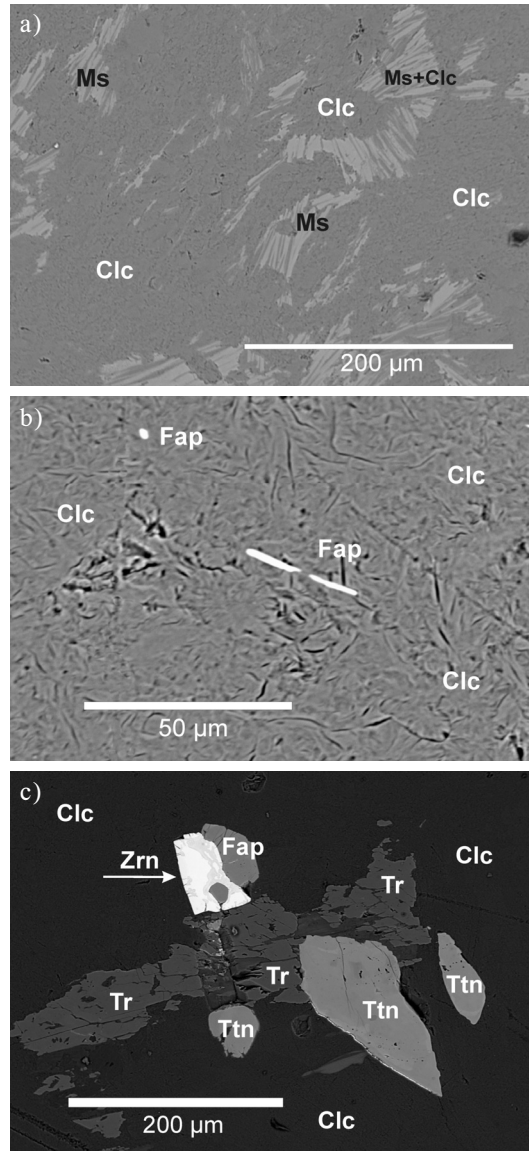
Minerální asociace

Masivní chlority se vyskytují samostatně v mramoru nebo přímo na kontaktech desilikovaných granitoidních hornin. Podle tohoto vztahu je lze rozlišit na „distální“ (obr. 5a–d) a proximální“ (obr. 5e–f). Složením ani asociacemi minerálů se vzájemně neliší. V některých případech byly zjištěny mikroskopicky srůsty klinochloru s muskovitem (obr. 6a a tab 7.), běžným akcesorickým minerálem je jehlicovitý fluorapatit (obr. 6b a tab. 6), vzácněji tremolit, titanit a sporadicky zirkon (obr. 6c, tab 7). V přilehlých žilách přistupuje kromě chloritu, flogopitu a reliktů živců (nebo skapolitu) běžně titanit, diopsid, aktinolit, ojediněle *REE-bohatý epidot* (6 hm. % FeO; 13 hm. % *REE*), mikroskopický zirkon, Th-uraninit, monazit-(Ce) a některá z TiO_2 – fází (nejspíše rutil?).



Obr. 5. Celistvý klinochlor z dolomitických mramorů moldanubika na západní Moravě.
Vzorky a) OFI-3 – Lukov u Mor. Budějovic, velikost vzorku 90 × 50 mm; b) OFI-9 – Nová Ves u Třebíče, velikost vzorku 45 × 40 mm; c) OFI-6 – Naloučany, velikost vzorku 80 × 60 mm; d) OFI-14 – Strážek, velikost vzorku 120 × 70 mm; e) OFI-8 nahoře – (na kontaktu desilikované granitoidní žíly, s živci) – Nová Ves u Třebíče, velikost vzorku 90 × 30 mm; f) OFI-5 – (na kontaktu desilikované granitoidní žíly (s růžovým klinozoisitem a titanitem) – Nová Ves u Třebíče, velikost vzorku 90 × 40 mm (foto J. Cága a P. Hršelová).

Fig. 5. Massive clinochlore from moldanubian dolomite marbles in western Moravia.
Samples: (a) OFI-3 – Lukov u Mor. Budějovic, sample size 90 × 50 mm; (b) OFI-9 – Nová Ves u Třebíče, sample size 45 × 40 mm; (c) OFI-6 – Naloučany, sample size 80 × 60 mm; (d) OFI-14 – Strážek, sample size 120 × 70 mm; (e) OFI-8 above – (at the contact of desilicated granitoid vein, with feldspars) – Nová Ves u Třebíče, sample size 90 × 30 mm; (f) OFI-5 – (at the contact of desilicified granitoid vein (with pink clinozoisite and titanite) – Nová Ves u Třebíče, sample size 90 × 40 mm, (photo by J. Cága a P. Hršelová).

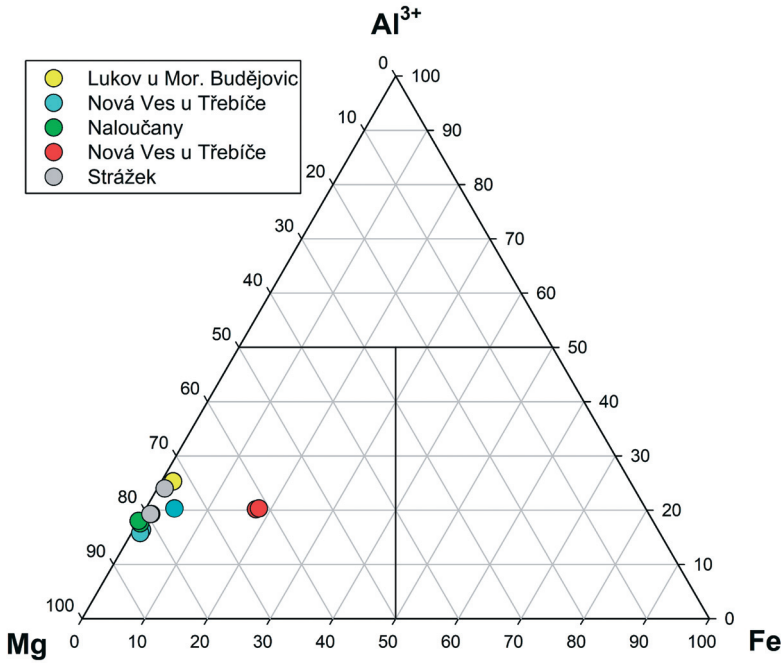


Obr. 6. Mikroskopické srůsty klinochloru (Clc) s muskovitem (Ms), apatitem (Fap), tremolitem (Tr), titanitem (Ttn) a zirkonem (Zrn).
a) Muskovit, srůsty s klinochlorem (OFI-14), Strážek; b) Apatit v klinochloru (OFI-3), Lukov u Mor. Budějovic; c) Akcesorické minerály v klinochloru (OFI-5), Nová Ves u Třebíče (zpětně odražené elektrony, foto J. Haifler).

Fig. 6. Microscopic intergrowths of clinochlore (Clc) with muscovite (Ms), apatite (Fap), tremolite (Tr), titanite (Ttn), and zircon (Zrn).
a) Muscovite, intergrowths with clinochlore (OFI-14), Strážek; b) Apatite in clinochlore (OFI-3), Lukov u Mor. Budejovice; c) Accessory minerals in clinochlore (OFI-5), Nová Ves u Třebíče (BSE, photo J. Haifler).

Chemické složení chloritu

Studované vzorky celistvých chloritů odpovídají podle klasifikace Zaneho a Weisse (1998) chloritům s výraznou dominancí Mg >> Fe, tedy **klinochloru** s 0,03–0,10 *apfu* Fe^{2+} (obr. 7; tab 5). Obsahy dalších prvků kromě hliníku (1,54–2,19 *apfu* Al_{tot}) jsou převážně nízké (0,001–0,02 *apfu* Mn; 0,01–0,10 *apfu* Ca a 0,001–0,02 *apfu* Zn) nebo pod mezí stanovení (Ba, Cl, Cr, F, Sr, Ti a V). Pouze část klinochloru (vz. OFI-8), pocházejícího z přímého kontaktu desilikované žíly (viz níže podkapitola 5. 2.) má zvýšený obsah železa (~ 1,05–1,07 *apfu* Fe) a hliníku (~ 2,32 *apfu* Al_{tot}). Nejnižší obsahy tetraedrického Al^{IV} má klinochlor z Lukova (OFI-3; ≤ 0,63 *apfu*), nejvyšší z Nové Vsi (OFI-8; ≤ 1,12 *apfu*).



Obr. 7. Chemické složení klinochloru v Mg-Al-Fe diagramu (Zane a Weiss 1998). Železem bohatší analýzy odpovídají vzorku OFI-8 z Nové Vsi.

Fig. 7. Chemical composition of clinochlore in Mg-Al-Fe diagram (Zane and Weiss 1998). Analyzes richer in iron correspond to the OFI-8 sample from Nová Ves.

Tabulka 5. Reprezentativní složení klinochloru.

Table 5. Representative composition of clinochlore.

lokalita	Lukov	Lukov	Nová Ves	Nová Ves	Nová Ves	Nová Ves	Nová Ves	Naloučany	Naloučany	Strážek	Strážek	Strážek
vzorek	OFI-3	OFI-3	OFI-5	OFI-5	OFI-8	OFI-8	OFI-9	OFI-6	OFI-6	OFI-14	OFI-14	OFI-14
SiO_2	37,1	37,11	35,67	36,17	29,63	29	32,05	36,02	36,07	33,84	35,5	33,74
Al_2O_3	18,42	18,88	14,45	14,00	20,21	19,92	19,82	15,34	14,97	18,27	19,77	18,19
FeO	1,31	1,36	1,02	1,02	12,88	12,89	3,42	0,35	b.d.	1,05	0,87	0,94
MnO	0,02	0,06	0,06	0,05	0,21	0,17	0,11	b.d.	0,03	0,09	0,06	0,07
MgO	29,3	29,67	34,2	34,68	25,47	24,73	31,61	34,28	33,68	33,58	31,28	33,5
CaO	0,98	0,73	0,11	0,17	0,06	0,03	0,04	0,19	0,28	0,13	0,05	0,09
ZnO	0,01	0,23	0,02	0,01	b.d.	0,15	0,06	0,30	0,27	0,02	0,05	0,30
H_2O*	13,07	13,19	12,76	12,84	12,33	12,09	12,79	12,93	12,79	12,95	13,15	12,91
TOTAL	100,21	101,23	98,29	98,94	100,79	98,98	99,90	99,41	98,09	99,93	100,73	99,74
Si^{4+}	3,403	3,374	3,354	3,379	2,881	2,876	3,005	3,34	3,381	3,134	3,239	3,134
^{IV}Al	0,597	0,626	0,646	0,621	1,119	1,124	0,995	0,660	0,619	0,866	0,761	0,866
suma	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Fe^{2+}	0,101	0,103	0,080	0,080	1,047	1,069	0,268	0,027		0,081	0,066	0,073
Mn^{2+}	0,002	0,005	0,005	0,004	0,017	0,014	0,009		0,002	0,007	0,005	0,006
Mg^{2+}	4,007	4,022	4,793	4,829	3,692	3,657	4,419	4,739	4,707	4,637	4,254	4,638
Ca^{2+}	0,096	0,071	0,011	0,017	0,006	0,003	0,004	0,019	0,028	0,013	0,005	0,009
Zn^{2+}	0,001	0,015	0,001	0,001		0,011	0,004	0,021	0,019	0,001	0,003	0,021
$^{VI}Al_{oct}$	1,394	1,397	0,955	0,92	1,197	1,205	1,195	1,016	1,035	1,128	1,365	1,125
suma	5,601	5,613	5,845	5,851	5,959	5,959	5,899	5,822	5,791	5,867	5,698	5,872

Tabulka 6. Složení akcesorického fluorapatitu z celistvého klinochloru.
Table 6. Composition of accessory fluorapatite from massive clinochlore.

lokalita vzorek	Lukov OFI-3	Nová Ves OFI-4	Nová Ves OFI-5	Nová Ves OFI-8
P_2O_5	42,14	42,29	42,20	42,08
SiO_2	0,17	0,12	0,08	0,51
Y_2O_3	0,13	b.d.	0,08	0,35
Ce_2O_3	0,13	b.d.	0,08	0,13
Nd_2O_3	0,04	b.d.	0,12	0,25
Sm_2O_3	b.d.	0,05	0,01	0,08
CaO	54,55	56,19	55,25	55,11
F	2,19	2,83	2,39	3,48
CL	0,66	0,09	0,39	0,02
H_2O*	0,55	0,44	0,55	0,13
O=F	-0,92	-1,19	-1,01	-1,47
O=CL	-0,15	-0,02	-0,09	
TOTAL	99,49	100,80	100,05	100,67
P^{5+}	3,045	2,973	3,012	2,999
Si^{4+}	0,015	0,010	0,007	0,043
Y^{3+}	0,006	-	0,004	0,016
Ce^{3+}	0,004	-	0,002	0,004
Nd^{3+}	0,001	-	0,004	0,008
Sm^{3+}	-	0,001	-	0,002
Ca^{2+}	4,989	4,999	4,990	4,970
F^-	0,591	0,743	0,637	0,926
Cl^-	0,095	0,013	0,056	0,003
H^+	0,313	0,244	0,307	0,071
O^{2-}	12,461	12,196	12,355	12,168
CATSUM	8,060	7,983	8,018	8,042
AN SUM	13,148	12,952	13,047	13,098

* vypočteno ze stechiometrie; determined by stoichiometry

Tabulka 7. Složení doprovodných minerálů (titanit, tremolit, muskovit) z celistvého klinochloru.
Table 7. Composition of accompanying minerals (titanite, tremolite, muscovite) from massive clinochlore.

lokalita vzorek	Nová Ves OFI-5
SiO_2	30,00
TiO_2	34,80
SnO_2	0,50
ZrO_2	0,18
Ta_2O_5	0,44
Nb_2O_5	1,24
Nd_2O_3	0,47
Pr_2O_3	0,18
La_2O_3	0,10
Ce_2O_3	0,70
Al_2O_3	2,03
Y_2O_3	0,59
Gd_2O_3	0,34
Dy_2O_3	0,05
FeO	0,57
CaO	27,94
F	0,48
O=F	-0,20
TOTAL	100,41
Si^{4+}	0,990
Ti^{4+}	0,864
Sn^{4+}	0,007
Zr^{4+}	0,003
Ta^{5+}	0,004
Nb^{5+}	0,018
Nd^{3+}	0,006
Pr^{3+}	0,002
La^{3+}	0,001
Ce^{3+}	0,008
Al^{3+}	0,079
Y^{3+}	0,010
Gd^{3+}	0,004
Dy^{3+}	0,001
Fe^{2+}	0,016
Ca^{2+}	0,988
F^-	0,050
O^{2-}	4,927
CATSUM*	3,0
AN SUM	4,977

* rozpočteno na sumu 3 kationtů (Si+Ti+Sn+Zr; Ta+Nb; Al+Ce+La+Nd+Pr+Gd+Dy+Y; Ca+Fe)

*calculated for the sum of 3 cations

lokalita vzorek	Nová Ves OFI-5
SiO_2	56,42
TiO_2	0,09
Al_2O_3	0,82
FeO	3,34
MnO	0,14
MgO	21,25
CaO	14,19
ZnO	0,08
K_2O	0,12
Na_2O	0,27
H_2O*	2,06
F	0,18
O=F	-0,08
TOTAL	98,88
Si^{4+}	7,883
Ti^{4+}	0,009
Al^{3+}	0,135
Fe^{2+}	0,390
Mn^{2+}	0,017
Mg^{2+}	4,426
Ca^{2+}	2,124
Zn^{2+}	0,008
K^+	0,021
Na^+	0,073
H^+	1,920
F^-	0,080
O^{2-}	23,920
CATSUM	15,087
AN SUM	24

* vypočteno ze stechiometrie; determined by stoichiometry

Celkové Fe jako Fe^{2+}; all Fe as Fe^{2+}

lokalita vzorek	Naloučany OFI-6	Strážek OFI-14	Strážek OFI-14
SiO_2	45,85	45,35	46,1
TiO_2	0,04	b. d.	0,01
Al_2O_3	36,95	36,64	34,71
FeO	0,03	0,19	0,16
MnO	0,02	0,01	0,03
MgO	0,01	1,48	1,80
CaO	0,02	0,01	0,01
ZnO	b. d.	0,09	0,06
Na_2O	0,89	0,13	0,14
K_2O	10,13	10,97	10,88
H_2O*	4,45	4,45	4,42
F	0,06	0,10	0,07
O=F	-0,03	-0,04	-0,03
TOTAL	98,43	99,38	98,37
Si^{4+}	3,066	3,022	3,101
^{IV}Al	0,934	0,978	0,899
suma	4	4	4
Al^{3+}	1,978	1,900	1,852
Ti^{4+}	0,002		0,001
Fe^{2+}	0,002	0,011	0,009
Mn^{2+}	0,001	0,001	0,002
Mg^{2+}	0,001	0,147	0,180
Ca^{2+}	0,001	0,001	0,001
Zn^{2+}		0,004	0,003
suma	1,985	2,064	2,048
Na^+	0,115	0,017	0,018
K^+	0,864	0,933	0,934
suma	0,979	0,950	0,952
H^+	1,987	1,979	1,985
F^-	0,013	0,021	0,015
O^{2-}	11,987	11,979	11,985
CATSUM	6,965	7,013	6,999
AN SUM	12	12	12

* vypočteno ze stechiometrie; determined by stoichiometry

Celkové Fe jako Fe^{2+}; all Fe as Fe^{2+}

Rentgenometrické studium

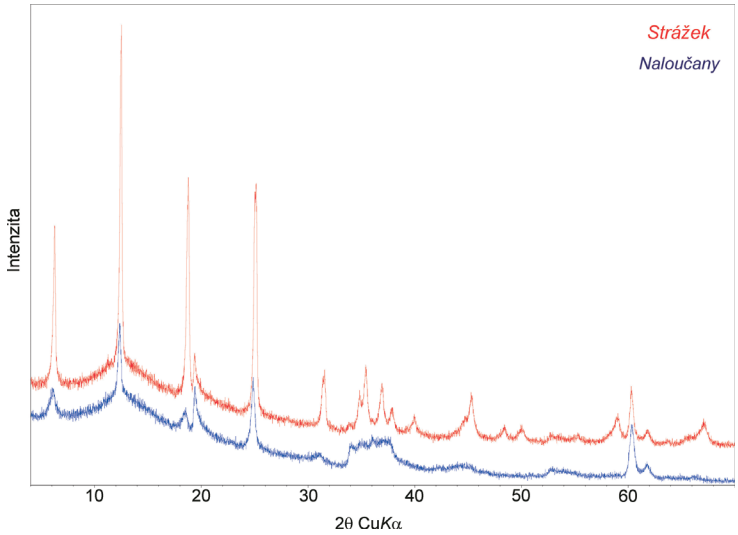
Podle charakteru rentgenových práškových dat je možné ve studovaném souboru *chloritů* – klinochloru rozlišit dvě skupiny – vzorky OFI- 8, 9 a 14 a vzorky OFI-5 a 6. Výrazně nižší absolutní hodnoty intenzit difrakčních maxim vzorků OFI-5 a 6, odlišné relativní intenzity difrakcí a absence části maxim je pravděpodobně způsobena hůře krystalickým charakterem těchto vzorků. Rentgenová prášková data reprezentativních vzorků jsou uvedena v tabulkách 8–11 (vz. OFI-6, OFI-8, OFI-9 a OFI-14) a ve všech případech nejlépe odpovídají hodnotám pro polytyp 1*MIIb*. Zpřesněné parametry základních buněk jsou v tabulce 12 porovnány s publikovanými daty. Vyšší objem základní buňky hůře krystalického vzorku OFI-6 vyvolaný hodnotou parametru *c*, je pravděpodobně odrazem nevelkého zvětšení vzdáleností mezi vrstvami v krystalové struktuře tohoto chloritu.

Tabulka 8. Rentgenová prášková data klinochloru, Nová Ves u Třebíče (OFI-8).
Table 8. X-ray powder data of clinochlore, Nová Ves u Třebíče (OFI-8).

h	k	l	d_{obs}	I_{obs}	d_{calc}
0	0	1	14,321	96	14,219
0	0	2	7,136	100	7,120
0	0	3	4,758	50	4,740
1	1	0	4,571	9	4,604
1	1	1	4,271	2	4,263
-1	1	2	4,051	3	4,045
0	0	4	3,552	36	3,555
0	0	5	2,839	9	2,844
-1	3	1	2,650	2	2,647
-2	0	2	2,5793	33	2,5817
-1	1	5	2,5375	20	2,5300
-2	0	3	2,4365	14	2,4330
-1	3	3	2,3764	12	2,3807
-2	2	2	2,2543	7	2,2542
1	3	4	2,0722	<1	2,0784
1	1	6	2,0325	1	2,0298
-1	3	5	2,0026	14	2,0010
-2	2	5	1,8808	5	1,8793
-1	3	6	1,8205	1	1,8220
-3	1	2	1,7348	<1	1,7321
2	4	2	1,6648	<1	1,6657
-3	3	1	1,5414	8	1,5417
0	6	1	1,5347	<1	1,5326
3	1	4	1,5003	<1	1,4988
-3	3	4	1,4587	<1	1,4607
-3	1	7	1,3966	1	1,3974
2	2	8	1,3454	<1	1,3461

Tabulka 9. Rentgenová prášková data klinochloru, Nová Ves u Třebíče (OFI-9).
Table 9. X-ray powder data of clinochlore, Nová Ves u Třebíče (OFI-9).

h	k	l	d_{obs}	I_{obs}	d_{calc}
0	0	1	14,155	45	14,186
0	0	2	7,089	100	7,093
0	0	3	4,728	51	4,729
0	0	4	3,542	81	3,547
0	0	5	2,833	17	2,837
-1	3	1	2,646	1	2,651
-1	3	2	2,5447	5	2,5462
-2	0	3	2,4320	6	2,4355
-2	0	4	2,2503	5	2,2504
-2	0	5	2,0577	6	2,0572
-2	2	4	2,0247	1	2,0241
2	2	3	1,9978	4	1,9976
-2	0	6	1,8734	3	1,8730
0	2	7	1,8572	2	1,8567
-1	3	6	1,8193	1	1,8214
-3	1	2	1,7328	1	1,7346
2	4	2	1,6676	11	1,6674
2	4	3	1,6015	1	1,6004
-1	5	4	1,5936	<1	1,5923
0	6	1	1,5345	5	1,5349
3	1	4	1,4997	1	1,4989
0	0	10	1,4197	1	1,4186
-1	3	9	1,3916	1	1,3919
-3	3	6	1,3505	1	1,3494
2	2	8	1,3435	<1	1,3442



Obr. 8. Porovnání rentgenových práškových záznamů dvou typů klinochloru (vzorky: Naloučany OFI-6 a Strážek OFI-14); křivky jsou pro jasnost zobrazení vertikálně posunuty, ale absolutní intenzita maxim pro oba dva záznamy je v identickém měřítku. Podmínky experimentu a množství vzorku byly v obou případech stejné.

Fig. 8. Comparison of X-ray powder patterns of two types of clinochlore (samples: Naloučany OFI-6 and Strážek OFI-14); the curves are vertically shifted for clarity of display, but the absolute intensity of the maxima for the two patterns is on an identical scale. The conditions of the experiment and the amount of the sample were the same in both cases.

Tabulka 10. Rentgenová prášková data klinochloru, Naloučany (OFI-6).

Table 10. X-ray powder data of clinochlore, Naloučany (OFI-6).

h	k	l	d_{obs}	I_{obs}	d_{calc}
0	0	1	14,415	25	14,343
0	0	2	7,172	100	7,172
0	2	0	4,677	11	4,625
1	1	0	4,566	60	4,603
0	0	4	3,584	81	3,586
0	0	5	2,877	1	2,869
-1	3	2	2,5456	3	2,5461
2	0	2	2,3971	11	2,4023
1	1	6	2,0426	2	2,0418
-2	2	5	1,8825	3	1,8868
-3	1	2	1,7344	<1	1,7326
-3	3	2	1,5326	68	1,5310
3	1	4	1,5011	7	1,5000
0	6	3	1,4667	10	1,4672
2	4	5	1,4445	11	1,4433
-1	5	6	1,4373	5	1,4359
0	6	4	1,4154	1	1,4163
-2	4	7	1,3784	<1	1,3788
2	4	6	1,3596	<1	1,3616

Tabulka 11. Rentgenová prášková data klinochloru, Strážek (OFI-14).

Table 11. X-ray powder data of clinochlore, Strážek (OFI-14).

h	k	l	d_{obs}	I_{obs}	d_{calc}
0	0	1	14,183	44	14,185
0	0	2	7,100	100	7,093
0	0	3	4,719	63	4,728
1	1	0	4,578	9	4,613
0	0	4	3,540	67	3,546
0	0	5	2,833	16	2,837
-1	3	1	2,647	2	2,652
-1	1	5	2,5350	14	2,5286
-2	0	3	2,4346	10	2,4374
-2	2	2	2,2572	3	2,2587
-1	3	5	2,0009	8	2,0016
-2	2	5	1,8807	2	1,8812
-1	3	6	1,8232	2	1,8218
-2	2	6	1,7367	1	1,7373
-1	3	7	1,6604	1	1,6599
-3	3	2	1,5341	13	1,5338
3	1	4	1,5001	2	1,4992
1	5	5	1,4652	<1	1,4654
3	3	3	1,4225	1	1,4221
-1	1	10	1,3938	3	1,3944
-2	4	7	1,3751	<1	1,3739

Tabulka 12. Parametry základní buňky klinochloru (pro monoklinickou prostorovou grupu $C2/m$).
Table 12. Unit-cell parameters of clinochlore (for the monoclinic space group $C2/m$).

	a [Å]	b [Å]	c [Å]	β [°]	V [Å^3]
tato práce, OFI-6	5,340(7)	9,250(9)	14,43(2)	96,43(3)	708,5(9)
tato práce, OFI-8	5,341(4)	9,249(7)	14,31(12)	96,32(6)	702,5(7)
tato práce, OFI-9	5,349(2)	9,264(4)	14,275(6)	96,39(2)	702,9(5)
tato práce, OFI-14	5,352(5)	9,265(8)	14,28(11)	96,43(9)	703,4(6)
Rule, Bailey (1987)	5,350(3)	9,267(5)	14,27(1)	96,35(5)	703,1
Welch, Marshall (2001)	5,332(1)	9,224(2)	14,414(2)	97,07(2)	703,50(16)

5.2. Diskuse geneze serpentinu a klinochloru

Lizardit

určený ve studovaných vzorcích jako jediný minerál *serpentinové subskupiny* (tato práce) je ve studovaných mramorech součástí metasomatických reakčních žil (Houzar 1988). Ty mají ostrý kontakt *s čistým dolomitickým mramorem* (cca 20 % MgO), s nímž hraničí zelenavě zbarvenou *vnější forsterit-kalcitovou zónou* širokou až několik centimetrů, přičemž podíl forsteritu může dosahovat až přes 30 obj. %. Vnitřní zónu těchto Mg-skarnů, která může např. na lokalitě Číchov – Ve Žlebě dosahovat až téměř metrové mocnosti, tvoří hrubozrnný bílý diopsid (Sekanina 1963). Hořečnaté skarny obsahují vedle forsteritu a diopsidu pouze akcesorické množství flogopitu, tremolitu a chloritu (vesměs mladších minerálů) a jsou produktem reakcí dolomitu s externě přinášeným SiO_2. Avšak zda jde o produkty izochemické metamorfózy silicifikovaného sedimentárního dolomitového protolitu nebo metasomatických reakcí dolomitických mramorů s importovanými externími fluidy bohatými SiO_2 nelze bez specializovaného studia rozhodnout (srov. Ferry *et al.* 2011). V geochemicky jednoduchém systému Mg-Ca-Si-H_2O-CO_2 (MCS-HC) se nejprve uplatnily reakce (1) a (2) probíhající za vyšších teplot (cca > 600 °C) a v podmínkách vyššího X_{H_2O}

(1) $2CaMg(CO_3)_2 + SiO_2 = Mg_2SiO_4 + 2CaCO_3 + 2CO_2$
dolomit + $SiO_{2\ aq.}$ = forsterit + kalcit

(2) $2Mg_2SiO_4 + 4CaCO_3 + 6SiO_2 = 4CaMgSi_2O_3 + 4CO_2$
forsterit + kalcit + $SiO_{2\ aq.}$ = diopsid

Při poklesu teploty (cca pod 300 °C) docházelo za přínosu H_2O fluidy k serpentinizaci forsteritu např. podle rovnice:

(3) $3Mg_2SiO_4 + SiO_2 + 4H_2O = 2Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
forsterit + $SiO_{2\ aq.}$ + $4H_2O$ = *serpentin* (lizardit)

V případě samostatné zóny celistvého lizarditu je však původ komplikovanější. Jeho vznik by vyžadoval totální odnos Ca ze systému, ať by už vznikal ve forsterit-kalcitové zóně skarnu nebo z diopsidu. Monominerální masivní lizardit však další produkty reakcí, které by mohl představovat např. kalcit (z původní reakce 1) téměř postrádá a chybí v něm i relikty staršího forsteritu, příp. dolomitu. Monominerální forsteritové polohy (bez kalcitu a dolomitu), které by se mohly zcela přeměnit v serpentin, nejsou ze zdejších mramorů známy. Není proto vyloučeno, že jde o produkty ***přímé krystalizace lizarditu*** v úzké oslabené propustné zóně Mg-skarnu nebo ve forsteritovém mramoru v podmínkách vysoké aktivity Mg a zejména H_2O, v postmetamorfních podmínkách za velmi nízkých teplot pod 300 °C i níže (Evans 2004, Schwartz *et al.* 2013). Žilky kalcitu jsou v těchto skarnech běžné a často obsahují relikty paralelně vláknitého *serpentinového asbestu*.

V případě jednoduché chemické reakce:

(4) $2Mg_2SiO_4 + 3H_2O = Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + Mg(OH)_2$
forsterit + $3H_2O$ = lizardit + brucit

je nutné uvažovat o odnosu části Mg fluidy (BUCHER a GRAPES 2011), neboť brucit nebyl v žádné takové (ani podobné) asociaci se serpentinem v mramorech moldanubika popsán. Kation Mg^{2+} však mohl při reakci fluid s kalcitem tvořit mladší dolomit II, neboť zcela serpentinizovaná zrna forsteritu mají dolomitové lemy.

Vysoký poměr H_2O/CO_2 (X_{H_2O} < 0,10–0,05) ve fluidech je vzhledem k podstatnému modálnímu množství *serpentinu* mimo jakoukoliv pochybnost (ZUCALI *et al.* 2018).

Klinochlor (*pseudofit*)

V případě klinochloru byl jeho vznik z geochemického hlediska složitější, neboť jednoduchý chemický systém MCS (-HC) byl rozšířen podstatně o Al a o lokálně zvýšené malé množství Fe a K. Na rozdíl od *serpentinu* však byla někdy zřetelně zjištěna jeho přímá vazba na proniky žilných granitoidních hornin (metatektů z okolních migmatitů) do mramorů.

Zmíněné žilné horniny podléhají v dolomitických mramorech ***desilikaci*** v několika fázích a mají na kontaktech vyvinuto několik zón. Vnější forsterit-kalcitová zóna je chudá forsteritem (reakce 1) a vznikla za vyšší teploty (T> 500 °C) při importu SiO_2(aq) do mramoru; při kontaktu s dolomitickým mramorem může forsterit téměř i chybět (HOUZAR 1988). Směrem ke granitoidní žíle forsteritu přibývá a objevuje se flogopit (± lístkovitý chlorit, vzácně i akcesorický spinel), tvořící i samostatnou zónu o mocnosti ≤ 1 cm.

Následuje vnitřní zóna ***celistvého klinochloru*** – *pseudofitu* (obr. 5e, f) který metasomaticky zatlačuje původní žilnou desilikovanou granitoidní horninu. Vznikl reakcí Ca-živců (*bytownit-labradorit*, anortit) s dolomitem mramoru podle rovnice:

(5) $CaAl_2Si_2O_8 + 5CaMg(CO_3)_2 + SiO_2 + 4H_2O = Mg_5Al\ (AlSi_3)\ O_{10}(OH)_8 + 6CaCO_3 + 4CO_2$
anortit + dolomit + $SiO_{2aq.}$ = klinochlor + kalcit

Reakce (5) probíhala po snížení teploty v podmínkách vysokého podílu H_2O a za odnosu Na a CO_2 ve fluidech. Podle chloritového termometru na základě obsahu Al^{IV} (CATHELINEAU 1988) by se minimální teploty vzniku klinochloru pohybovaly převážně mezi 130 až 215 °C, u klinochloru z přímého kontaktu desilikované žíly (vz. Nová Ves, OFI-8) za T = ≤ 300 °C. To odpovídá obvyklé stabilitě klinochloru v retrográdních LT-LP metamorfních podmínkách (např. BUCHER a GRAPES 2011).

O petrogenezi zmíněných desilikovaných žil není v případě moldanubika takřka nic známo. Podle modálního složení jde, po jejich interakci s mramory, o alkalicko-živcové granity až křemenné syenity, monzonity, granodiority až tonality. Neobsahují slídy, které jsou nahrazovány asociací klinopyroxen + K-živec (± amfibol) v prostředí zvýšené alkality. SAFONOV a ARANOVICH (2014), udávají reakci:

(6) biotit +3anortit (v Pl) +18křemen +3(K_2O) = 3klinopyroxen + 7K-živec + (H_2O)

a předpokládají odnos Na fluidy (reakce se neúčastní čistý anortit). Mohla však proběhnout i reakce, kterou lze schematický psát (srov. např. TRACY a FROST 1991):

(7) biotit (s obsahem Ti) + křemen + kalcit = K-živec + Fe-diopsid (nebo Ca-amfibol) + (H_2O, CO_2, F) + TiO_2 (v titanitu),

pro kterou svědčí zvýšené množství akcesorického titanitu v asociaci desilikovaného granitoidu.

Původní draselný živec z žil poskytl draslík pro vznik flogopitu podle reakce:

(8) $K(AlSi_3)O_8 + 3CaMg(CO_3)_2 + H_2O = KMg_3\ (AlSi_3)\ O_{10}(OH)_2 + 3CaCO_3 + 3CO_2$
K-živec + dolomit = flogopit + kalcit

6. ZÁVĚR

V dolomitických mramorech moldanubika, uložených převážně v pararulách a migmatitech, se kromě drobně vtroušených minerálů asociace: flogopit + forsterit + spinel (± chlorit ± klinohumit) nacházejí masivní anchimonominerální agregáty žlutozeleně zeleně, šedozeleně a hnědě zbarvených Mg-fylosilikátů.

Na základě rentgenometrického a chemického studia byly rozlišeny minerály subskupiny serpentinu a masivní Mg-chlority (tzv. *pseudofit*). *Serpentiny* zastupuje hliníkem a železem chudý lizardit (~ 0,01 *apfu* Al); 0,01–0,05 *apfu* Fe), Mg-*chlority* náležejí ke klinochloru, který má kromě podstatného obsahu hliníku (1,54–2,32 *apfu* Al) výrazně kolísavý obsah železa (0,03–1,07 *apfu* Fe) a pouze nízký podíl Mn a Ca. Za zmínku stojí stopové obsah zinku (~ 0,02 *apfu* Zn) v lizarditu i v klinochloru (≤ 0,02 *apfu* Zn) z lokalit, kde mají mramory zvýšený obsah Zn cca > 500 ppm. V minerální asociaci studovaných Mg-fylosilikátů byl zjištěn pouze mikroskopický flogopit, fluorapatit, muskovit a tremolit, ojediněle i titanit a zirkon.

Serpentin vznikl jako součást metasomatických reakčních žil (kalcit-forsterit-diopsidových Mg-skarnů) v nichž tvoří samostatnou zónu. Při vzniku klinochloru se uplatňovalo zatlačování (někdy úplné) plagioklasu a K-živce přímo na kontaktu žil granitoidů (metatektů z okolních migmatitů) intrudujících do dolomitických mramorů, které podlehly desilikaci. V obou případech jde o produkty reakcí dolomitu mramorů s externími fluidy a/nebo taveninami bohatými na SiO_2 ±Al_2O_3 za vysoké aktivity H_2O (X_{CO_2} <0,10-0,05) a za teplot T < 300°C.

PODĚKOVÁNÍ

Odborný článek vznikl na základě institucionální podpory dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumné organizace poskytované Ministerstvem kultury – DKRVO, MK000094862 pro SH a DKRVO 2019/2023 1. II. e, 00023272 pro JS a RM. Děkujeme též J. Cágovi a P. Hršelové za zhotovení fotografií.

LITERATURA

Bayliss, P., 1975: Nomenclature of the trioctahedral chlorite. – Can. Mineralogist, 13, 1, 178–180.

Bourdelle, F., 2021: Low-Temperature Chlorite Geothermometry and Related Recent Analytical Advances: A Review. – Minerals, 11, 130, 1–16.

Bucher, K., Grapes, R., 2011: Petrogenesis of Metamorphic Rocks. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 8. vydání, 428 p.

Cathelineau, M., 1988: Cation Site Occupancy in Chlorites and Illites as a Function of Temperature. – Clay Miner., 23, 471–485.

Cressey, G., Cressey, B. A., Wicks, F. J., 2008: Polyhedral serpentinite: a spherical analogue of polygonal serpentinite? – Mineral. Mag., 72, 1229–1242.

Deer ,W. A., Howie, R. A., J. Zussman, J., 2009: Rock Forming Minerals: Layered Silicates Excluding Micas and Clay Minerals- Volume 3B, Geological Society of London, 314 p.

Dungan, M. A., 1979: A microprobe studium of antigorite and some serpentine pseudomorphs. – Can. Mineralogist, 17, 771 –784.

Dvorský, F., 1898: O předních nalezištích nerostů na západní Moravě. – Annal. Mus. Franciscei. Brno, 4, 91–106.

Evans, B. W., 2004: The serpentinite multisystem revisited: chrysotile is metastable. – International Geology Review 46, 479–506.

Ferry, J. M., Ushikubo, T., Valley, J. V., 2011: Formation of Forsterite by Silicification of Dolomite during Contact Metamorphism. – J. Petrology, 52, 9, 1619–1640.

Fiala, J., Fuchs, G., Wendt, J. I., 1995: Stratigraphy. In: Dallmayer (ed) Pre-Permian geology of Central and Eastern Europe. – Springer, Berlin, Heidelberg, 417–428.

Finger, F., Gerdes, A., Janoušek, V., René, M., Riegler, G., 2007: Resolving the Variscan evolution of the Moldanubian sector of the Bohemian Massif: the significance of the Bavarian and Moravo-Moldanubian tectonometamorphic phases. – J Geosciences, 52, 9–28.

Frič, A., 1869: O vrstvách kůry zemské a o skamenělých tvorech v nich obsažených. – Vyd. Matice lidu, 3, č. 4, 16, 1–231.

Guggenheim, S., Zhan, W., 1998: Effect of temperature on the structures of lizardite-1T and lizardite-2H1. – Can. Mineralogist, 36, 1587–1594.

Havránek, P., Welser, P., Zikeš, J., 2013: Pennin z lomu Krty na Strakonicku. – Minerál, 21, 5, 447–450.

Hochstetter, F., 1866: Über das Vorkommen von Eozoon im krystallinischen Kalke von Krummau im südlichen Böhmen. – Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe 53, 14–25.

Houzar, S., 1988: Metasomatické reakční žíly v dolomitických mramorech moravského moldanubika. – Přírod. Sbor. Západomorav. muz., 16, 1–10.

Houzar, S., 2004: Metamorfované karbonátové horniny v geologické stavbě a vývoji jihovýchodní části Českého masivu. – MS, Disertační práce, Ústav geologických věd PřF Masarykovy university a MZM v Brně, 155 p.

Houzar, S., Novák, M., 2001: Mramory na jihovýchodním okraji Českého masivu. – Vlastiv. Sbor. Vysočiny, Odd. Věd přír., 15, 3–33.

Houzar, S., Trnka, M., 1983: Hořečnatý skarn s indiciemi polymetalického zrudnění z Třebíče – Boroviny. – Sbor. Geol. průzkumu Ostrava, 27, 8, 139–149.

Kenngott, A., 1855: Mineral. Notizen (Enstatit und Pseudophit). Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, 16, 162–170.

Kratochvíl, J., 1957: Topografická mineralogie Čech I (A–G). – Nakl. ČSAV Praha, 455 p.

Kratochvíl, J., 1962: Topografická mineralogie Čech V (O–Ř). – Nakl. ČSAV Praha, 491 p.

Lindner, M., Dörr, W., Reither, D., Finger, F., 2020: The Dobra Gneiss and the Drosendorf Unit in the southeastern Bohemian Massif, Austria: West Amazonian crust in the heart of Europe. – Geological Society, London, Special Publications, 503, 185–207.

Mellini, M., Zanazzi, P. F., 1987: Crystal structures of lizardite-1T and lizardite-2H1 from Coli, Italy. – Am. Mineralogist, 72, 9–10, 943–948.

Merlet, C., 1994: An accurate Computer Correction Program for Quantitative Electron Probe Microanalyses. – Microchimica Acta, 115, 363–376.

Novák, M., 1986: Metasomatic reaction veins in dolomitic marbles of the Strážek Moldanubicum. – Acta Mus. Morav., Sci. nat., 71, 5–14.

Novák, M., 1987: Metamorfované karbonátové horniny při severovýchodním okraji moldanubika. – Acta Mus. Morav., Sci. nat., 79, 5–28.

Novák, M., 1988: Petrologie metamorfovaných dolomitických hornin při severovýchodním okraji moldanubika. – MS, Kandidátská disertační práce, Přírod. fak. UK Praha. 1–127.

Novák, M., 1989: Metamorfóza dolomitických hornin při severovýchodním okraji moldanubika. – Acta Mus. Morav., Sci. nat., 74, 7–51.

Page, N. J., 1968: Chemical differences among the serpentines. – Amer. Mineralogist, 53, 201–215.

Rule, A. C., Bailey, S. W., 1987: Refinement of the crystal structure of a monoclinic ferroan clinochlore. – Clays and clay minerals 35, 129–138.

Safonov, O. G., Aranovich L. Y., 2014: Alkali control of high-grade metamorphism and granitization. – Geoscience Frontiers, 5, 5, 711–727.

Sekanina, J., 1963: Hořečnatý skarn v dolomitu u Číchova na západní Moravě. – Čas. Mineral. Geol., 8, 178–188.

Schulmann, K., Kröner, A., Hegner, E., Wendt, I., Konopásek, J., Lexa, O., Štípská, P., 2005: Chronological constraints on the pre-orogenic history, burial and exhumation of deep-seated rocks along the eastern margin of the Variscan orogen – Bohemian Massif, Czech Republic. – Amer J. Sci., 305, 407–448.

Schwartz, S., Guillot, S., Reynard, B. Lafay, R.,Debret, B., Nicollet, Ch., Lanari, P., Auzende, A-L., 2013: Pressure–temperature estimates of the lizardite/antigorite transition in high pressure serpentinites. – Lithos, 178, 197–210.

Slavík, F., 1901: Mineralogické zprávy ze západní Moravy. Nerosty z prahorního vápence u Čichova nedaleko Okříšek. – Rozpravy Čes. Akad. Věd Cís. Frant. Josefa, Třída 2 přírod., 10, 8, 10–13.

Tracy, R. J., Frost, B. R., 1991: Phase equilibria and thermobarometry of calcareous, ultramafic and mafic rocks, and iron formations. In: Kerrick, M. D. ed.: Contact metamorphism. – Reviews in Mineralogy, 26, Mineral. Soc. Amer., 207–289.

Uličný, J., 1901: Mineralogické paběrky ze západní Moravy. – Věstník Kl. přírod. v Prostějově, 4, 113–116.

Věrtelář, J., 2012: Krouna má tajemství evoluce – počátku vývoje života na Zemi. – Hlinecké noviny, 14, 9, 6.
Vrtiška, O., 2019: Eozoon, nejstarší organismus. – Vesmír, 98, 6, 379.
Warr, L. N., 2021: IMA-CNMNC approved mineral symbols. – Mineral Mag 85, 3, 291–320.
Weiss, S., 2022: Serpentin als Pseudofossil im Marmor: Das "Eozoon bavaricum". – Lapis, 47, 11, 8.
Welch, M. D., Marshall, W. G., 2001: High-pressure behavior of clinochlore. – Am. Mineralogist, 86, 11–12, 1380–1386.
Welser, P. 1998: Mineralogický výzkum anomální akumulace Mg-chloritu v metamorfitech v lomu nedaleko Vidova u Českých Budějovic. – Sbor. Jihočes. Muz. v Čes. Budějovicích, Přír. vědy, 38, 19–26.
Wicks, F. J., 2000: Status of the reference X-ray powder-diffraction patterns for the serpentine minerals in the PDF database-1997. – Powder Diffraction, 15, 42–50.
Wicks, F. J. and O'Hanley, F. C., 1988: Serpentine minerals: Structures and petrology. In S.W. Bailey, Ed., Hydrous Phyllosilicates (exclusive of micas). – Reviews in Mineralogy, 19, 91–159, Mineralogical Society of America.
Wiewiora, A., Weiss, Z., 1990: Crystallochemical clasifications of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition: II. The chlorite group. – Clay Minerals, 25, 83–92.
Zane, A., Weiss, Z., 1998: A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data. Rend Fis Acc Lincei, 9, 1, 51–56.
Zucali, M., Marinoni, N., Diella, V., Croce A., Rinaudo, C., Fontana, E., 2018: Deciphering the tectonic-geodynamic context of the gem-quality "noble serpentine" deposit formation combining microstructural, chemical and micro-Raman analyses in Palaeozoic olivine-bearing marbles and serpentine-hosting rocks (Pizzo Tremogge, Margna unit – Austroalpine, Val Malenco – Central Alps, Italy). – Ore Geology Reviews, 92, 257–270.

INTERNETOVÉ ZDROJE

Laugier, J., Bochu, B., 2011: LMGP-suite of programs for the interpretation of X-ray experiments. http://www.ccp14.ac.uk/ tutorial/lmgp, přístup duben 2011.