

Identifikácia rotácie staurolitu z metapelitov počítačovým mikrotomografom (Záhorská Bystrica, Malé Karpaty)

PETER VOJTKO¹, IGOR BROSKA¹ a ROBERT ŠEVČÍK²

¹Geologický ústav SAV, Dúbravská cesta 9, P. O. Box 106, 840 05 Bratislava

²Ústav merania SAV, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Identification of the rotation of staurolite from metapelites by computed microtomography (Záhorská Bystrica, Malé Karpaty Mts.)

Sigmoidal pattern of ilmenite crystals was discovered during testing of a computed microtomography on a samples from the staurolite metapelites from the locality Hrubý Pleš near Záhorská Bystrica in Malé Karpaty Mts. Staurolite in metapelites is mainly 0.3 to 0.5 cm in size and occurs in association Grt + Bt + Ms + Chl + Qtz forming chlorite-staurolite metamorphic zone with only rare occurrence of chlorite. Rotation of staurolite is interpreted as a growth of staurolite within ductile shear zone during peak of metamorphism, when staurolite gradually enclosed ilmenite and garnet.

Key words: computed microtomography, staurolite, staurolite bearing metapelites, sigmoidal pattern, rotation, ductile shear zone, Malé Karpaty Mts.

Úvod

Vznik RTG počítačovej tomografie sa datuje na koniec 60. a začiatok 70. rokov 20. storočia, keď bol počítačový tomograf prvýkrát vyvinutý na medicínske účely. Podobne ako v medicínskych CT systémoch, aj v geológii je možné uplatniť princíp variabilnej hustoty jednotlivých minerálnych fáz, len v prípade medicínskej aplikácie nerotuje analyzovaný objekt, ale zdroj žiarenia s detektorom. Na základe hustotných rozdielov jednotlivých fáz sa dajú získavať informácie o zložení rozličných geologických materiálov. Okrem hustoty študovaných materiálov zohráva významnú úlohu tiež veľkosť vzorky a intenzita použitého RTG žiarenia. Počítačová mikrotomografia umožňuje štúdium vnútornej stavby rozličných materiálov, distribúciu inklúzií, tuhých minerálnych fáz, ale tiež identifikáciu pórov, puklín a dutín. Počítačová mikrotomografia nám navyše ako jediná nedeštruktívna metodika umožňuje štúdium minerálov a hornín v 3D režime, čo nachádza mimoriadne uplatnenie najmä pri štúdiu distribúcie vnútorných štruktúr v mineráloch a horninách. Metóda počítačovej mikrotomografie pracuje vo dvoch po sebe nasledujúcich etapách. V prvej dochádza k postupnému presvecovaniu rotujúceho objektu RTG žiarením a zozbieraní veľkého množstva „surových“ dát v podobe dvojdimenzionálnych projekcií. Druhú fázu predstavuje tomografická 3D rekonštrukcia projekcií, ktorá umožňuje vyhotoviť unikátne 3D animácie.

Cieľom príspevku bolo otestovať vhodnosť a možnosti aplikácie počítačovej mikrotomografie na štúdium izolovaných kryštálov staurolitu z metapelitov Malých

Karpát. Ďalším z cieľov bolo porovnanie výhod a nevýhod štúdia vnútornej stavby minerálu, resp. distribúcie inklúzií, pomocou počítačovej mikrotomografie oproti klasickému mikroskopickému prístupu.

Geológia bratislavského masívu Malých Karpát

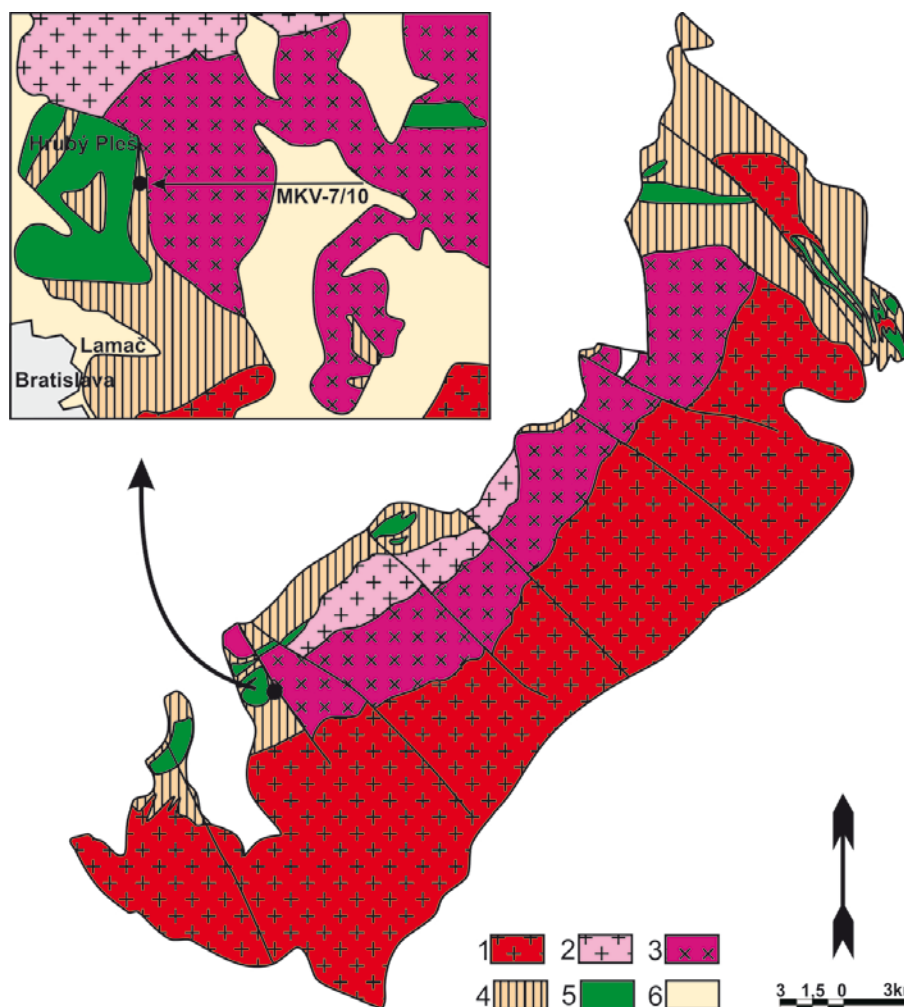
Malé Karpaty sú najzápadnejším jadrovým pohorím Slovenska a sú všeobecne chápané ako spojovací článok medzi východoalpiským a západokarpatským priestorom. Geológii územia Malých Karpát sa venovala pozornosť už na začiatku 20. storočia (napr. Richarz, 1908), pričom sa tieto práce významne podieľali na poznávaní metabázických a granitických hornín Malých Karpát. Neskôr v 40. rokoch 20. storočia, vznikla prvá detailnejšia štúdia venovaná kryštalíniku Malých Karpát. Už vtedy mnohí autori poukazovali na komplikovaný polymetamorfný vývoj Malých Karpát (Koutek a Zoubek, 1936). Kryštalínikum Malých Karpát je najzápadnejší segment tatrika a je tvorené bratislavským a modranským granitovým masívom s príslušným metamorfným obalom. Vek týchto hornín bol metódou Rb-Sr izochrony stanovený na 348 ± 3 mil. rokov pre bratislavský masív a na 327 ± 10 mil. rokov pre modranský masív (Cambel, 1990). Neskôr bol vek bratislavského masívu U-Th-Pb datovaním monazitu vypočítaný na 345 ± 22 Ma (Finger et al., 2003) a nakoniec U-Th-Pb (SHRIMP) datovaním zirkónov na 355 ± 5 Ma (Kohút et al., 2009). Komplex metamorfovaných magmatitov a metamorfovaných hornín kryštalínika Malých Karpát, pôvodne považovaný za autochtónny (Cambel, 1962), je v príkrovovej pozícii (Mahel, 1980) a vek týchto

hornín bol pomocou izotopov $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ stanovený na 380 ± 20 mil. rokov. Uvedený vek môžeme považovať za vek prvej metamorfózy týchto hornín (Cambel, 1990). Paleozoikum Malých Karpát sa v súčasnosti delí na štyri litostratigrafické skupiny – pezinskú, mariánsku, kuchynskú a perneckú, ktoré majú nasledujúce formácie: limbašskú, mariánsku, lamačskú pre bratislavský masív; harmónsku, dubovskú a formácie Čertovho kopca a Svätého vrchu pre modranský masív (Putiš et al., 2006). Prevládajúcimi horninovými typmi v staropaleozoickom fundamente Malých Karpát sú metabazity (pernecká skupina) a metasedimenty (pezinská skupina), s menším zastúpením čiernych bridlíc a zriedkavým výskytom vápencov (Ivan a Méres, 2006; Putiš, 2006), ktoré predstavujú metamorfny obal granitoidných telies Malých Karpát. Metamorfny proces tu prebehol v dvoch metamorfných udalostiach. Prvý proces predstavuje variská regionálne periplutonická metamorfóza späť s intrúziou variských granitov bratislavského masívu, po ktorej nasledovala kontaktná metamorfóza vplyvom intrúzie granitov modranského masívu (Korikovskij et al., 1984; Cambel a Vilinovič, 1987; Krist et al., 1992). Na základe geotermobarometrie stanovili Perchuk et al. (1984) a Korikovskij et al. (1984) P-T podmienky regionálne

periplutonické metamorfózy metapelitov bratislavského masívu v rozpätí $500 - 580^\circ\text{C}$ a $3 - 3,5$ kbar, neskôr Dyda (1997) na $580 - 620^\circ\text{C}$ a $5 - 6$ kbar. P-T podmienky rekryštalizácie biotitických pararúl s granátom, staurolitom a sillimanitom z lokality v Bratislave-Lamači stanovil Dyda (1980) a Dyda et al. (1981) na základe indexu stlačenia granátu a biotitu na 575°C a $5,2$ kbar. Neskôr Dyda (2000) stanovil P-T podmienky metamorfnej kulminácie týchto hornín na $601 \pm 19^\circ\text{C}$ a $5,82 \pm 0,41$ kbar. Podobné výsledky boli dosiahnuté termodynamickým modelovaním vzoriek pararúl s minerálnou asociáciou $\text{St} + \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Chl} + \text{Qtz}$ z lokality Hrubý Pleš, kde boli P-T podmienky stanovené na $580 - 610^\circ\text{C}$ pri tlaku $5 - 7$ kbar (Vojtko et al., 2011).

Staurolit v metapelitoch kryštalinika Malých Karpát

Na základe pozorovania minerálnych asociácií malo-karpatských metapelitov vyčlenil Janák (1980) a Broska a Janák (1985) štyri metamorfne zóny: chloritovú, biotitovo-granátovú, staurolitovú a sillimanitovú. Túto metamorfnnú zonálnosť neskôr modifikoval Korikovskij et al. (1984) a vyčlenil tak zóny: biotitovú, granátovú, staurolitovo-chloritovú a staurolitovo-sillimanitovú. Staurolitovo-



Obr. 1. Zjednodušená geologická mapa študovanej oblasti (upravené podľa Vaškovský et al., 1988). 1 – muskoviticko-biotitické granity až granodiority s hojným výskytom pegmatitov; 2 – biotitické a dvojsludné granity až granodiority (jemno- až strednozrnné); 3 – leukokrátne muskovitické a dvojsludné granity až granodiority (strednozrnné); 4 – metapelity; 5 – metabáziká a metatufy (zelené bridlice až amfibolity); 6 – neogén.

Fig. 1. Simplified geological map of studied area (modified after Vaškovský et al., 1988). 1 – muscovite-biotite granites/granodiorites rich in pegmatites; 2 – biotite and two mica granites/granodiorites (fine to medium grained); 3 – muscovite and two mica leucogranites/granodiorites (medium grained); 4 – metapelites; 5 – metabasites and metatuffs (green schists to amphibolites); 6 – Neogene.

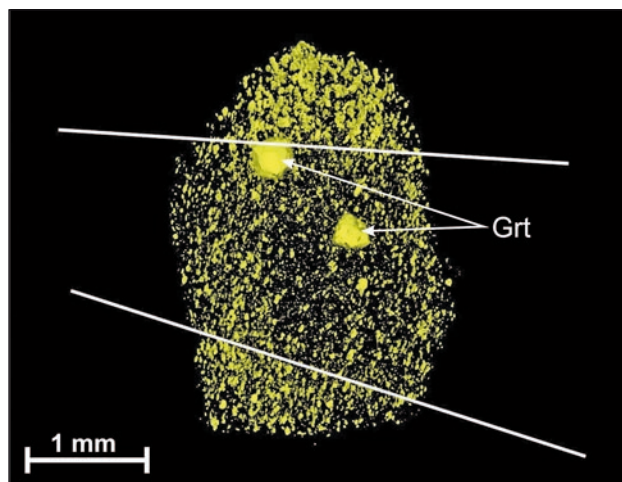


Obr. 2. Počítačový mikrotomograf Nanotom 180, umiestnený v Ústave merania SAV.

Fig. 2. Computed microtomograph Nanotom 180 situated in Institute of Measurement SAV.

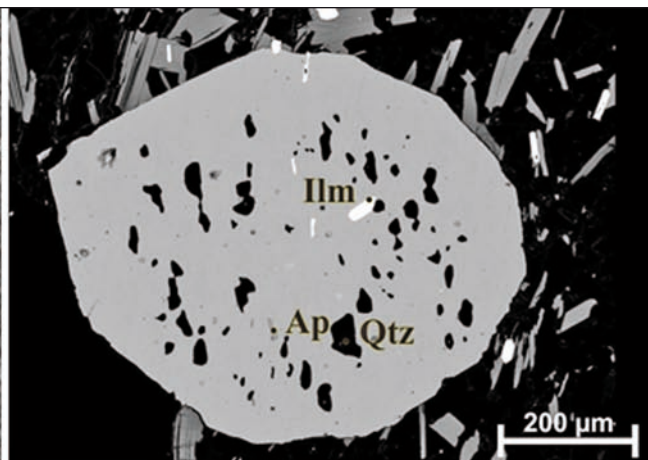
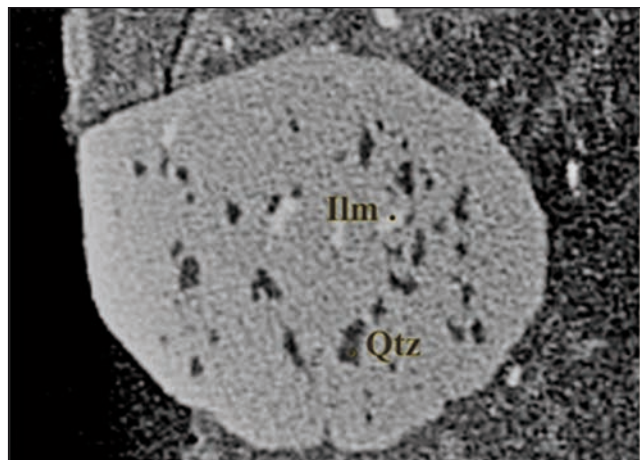
-chloritová zóna je tvorená svormi až pararulami a leží na kontakte s leukokratickým granitom bratislavského masívu. Korikovskij et al. (1984) vyčlenili v staurolitovo-chloritovej zóne nasledujúce minerálne paragenézy: $St+Chl+Bi+Gr_{Mn-Mg}-Fe+Pl+Qtz$, $St+Bi+Gr+Mu+Pl+Qtz$, $Bi+Gr+Mu+Pl+Qtz$ a $Bt+Chl+Mu+Pl+Q$. Lokalita Hrubý Pleš bola zvolená na štúdium izolovaných kryštálov počítačovým mikrotomografom z dôvodu prítomnosti veľkých porfyroblastov staurolitu, čo zaručuje vysoké rozlíšenie meraní. Vo vzorkách z lokality Hrubý Pleš (MKV-7/10, obr. 1) staurolit vytvára miestami takmer idioblastické zrná a zrasty. Staurolit obsahuje aj početné uzavreniny granátu, ktorý tiež vystupuje v podobe takmer idioblastických zrn. Granáty nejavia žiadne známky korózie (obr. 7). Z toho vyplýva, že asociácia granát-staurolit je výsledkom

rozpadu chloritu a muskovitu a vznikala prostredníctvom reakcie $16Chl+13Ms = 2St+11Grt+13Bt+60H_2O$ (Dyda a Miklós, 1993). Okrem inklúzií granátu obsahuje staurolit aj početné inklúzie kremeňa. Minerálna asociácia v študovaných metapelitoch je tvorená St , Grt , Bt , Ms , Chl , Qtz a teploty kontaktnej metamorfozy neboli dostatočne vysoké na rozpad staurolitu a vznik nových vyššie-teplotných fáz. Svedčí o tom neprítomnosť produktov rozpadu staurolitu, napríklad sillimanitu, andaluzitu, kordieritu alebo biotitu vo vzorkách z lokality Hrubý Pleš.



Obr. 4. Snímka staurolitu zostrojená z 3D projekcií na počítačovom mikrotomografe. Na snímke vidíme rozdielnu koncentráciu ilmenitu v hornine a v staurolite. Koncentrácia ilmenitu v hornine je porovnateľne vyššia ako v staurolite. Biele čiary vyznačujú hranice medzi zrnom staurolitu a okolitou horninou (priestor medzi čiarami tvorí staurolit).

Fig. 4. Staurolite image constructed from 3D projections of computed microtomography. On the image we see a different concentration of ilmenite in the metapelitic rock and in staurolite. Concentration of ilmenite in rock is comparatively higher than in staurolite. White lines indicate a border between grain of staurolite and surrounding rock (area between lines is staurolite).

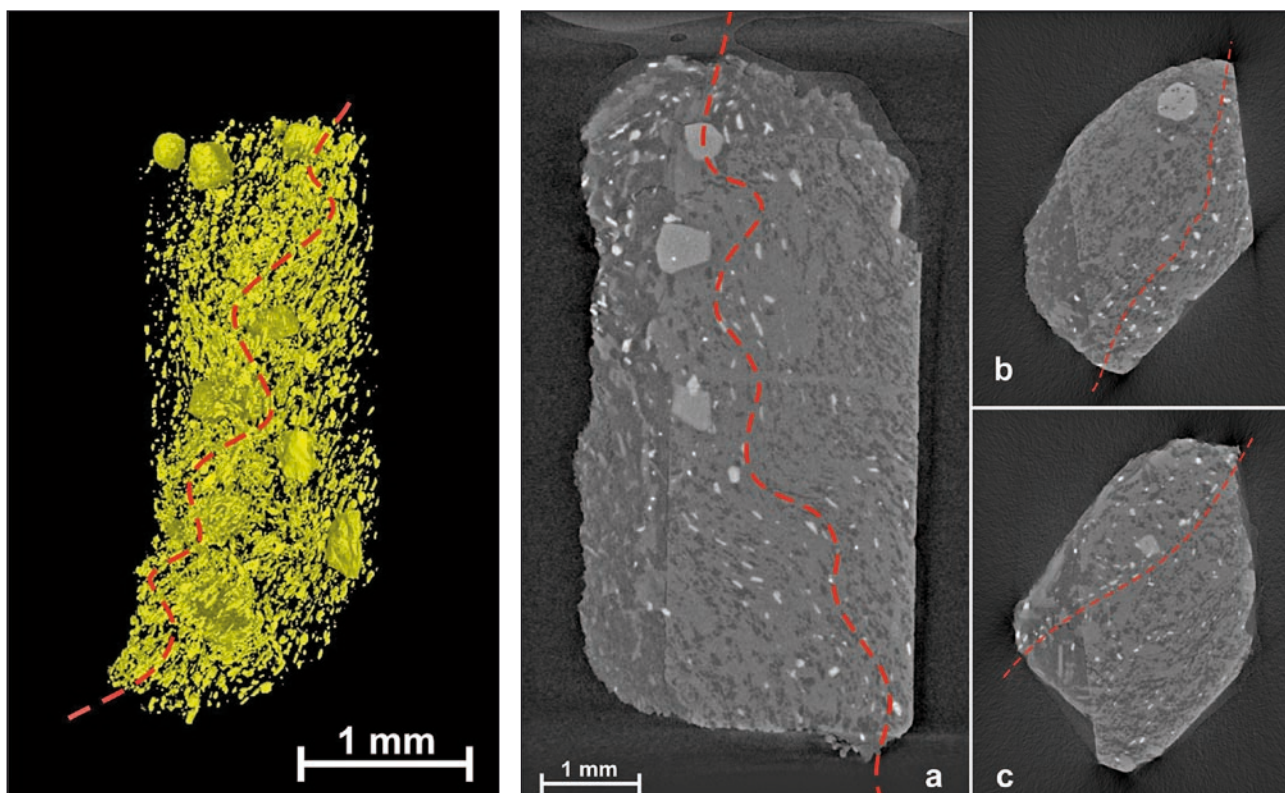


Obr. 3. Porovnanie snímky z počítačového mikrotomografu (vľavo) a snímky v odrazených elektrónoch – BSE (vpravo). Na snímkach je zobrazené zrnó granátu s inklúziami ilmenitu (Ilm), kremeňa (Qtz) a apatitu (Ap).

Fig. 3. Comparison of tomography image (left) and back scattered electron image – BSE (right). Images depict a grain of garnet with inclusions of ilmenite (Ilm), quartz (Qtz) and apatite (Ap).

Tab. 1
Chemické analýzy staurolitu, granátu a ilmenitu, MKV-7/10 (v hm. %)
Chemical analyses of staurolite, garnet and ilmenite, MKV-7/10 (wt.%)

Chemické zloženie granátu (hm. %)				Chemické zloženie ilmenitu (hm. %)				Chemické zloženie staurolitu (hm. %)			
Vzorka	MKV-7/10			Vzorka	MKV-7/10			Vzorka	MKV-7/10		
analyzovaný bod	stred	okraj		analyzovaný bod	v staurolite	v granáte	v hornine	analyzovaný bod		okraj	
SiO ₂	36,99	36,7		SiO ₂	0,05	0,02	0,04	SiO ₂		27,19	
TiO ₂	0,06	0,02		TiO ₂	52,02	51,95	51,28	TiO ₂		0,72	
Al ₂ O ₃	21,02	20,83		Al ₂ O ₃	0,01	0,03	0,04	Al ₂ O ₃		53,77	
Cr ₂ O ₃	0,02	0,00		Cr ₂ O ₃	0,02	0,00	0,00	Cr ₂ O ₃		0,08	
FeO	29,5	31,38		V ₂ O ₃	0,13	0,11	0,11	V ₂ O ₃		0,02	
MnO	8,72	6,64		FeO	44,56	43,96	43,77	FeO		13,61	
MgO	2,32	2,45		MnO	1,69	1,71	2,01	MnO		0,35	
CaO	1,43	1,15		MgO	0,32	0,58	0,18	MgO		1,77	
Na ₂ O	0,02	0,00		CaO	0,00	0,01	0,03	CaO		0,02	
								ZnO		0,24	
Suma	100,08	99,17		Suma	98,80	98,37	97,46	Suma		97,77	
počet katiónov na základe 12 at. kyslíka				prepočet na 2 katióny				prepočet na 46 katiónov			
Si	2,99	3,00		Si	0,00	0,00	0,00	Si		7,57	
Ti	0,00	0,00		Ti	1,00	1,00	1,00	Ti		0,15	
Al	2,00	2,00		Al	0,00	0,00	0,00	Al		17,66	
Cr	0,00	0,00		Cr	0,00	0,00	0,00	Cr		0,02	
Fe	2,00	2,14		V	0,00	0,00	0,00	V		0,00	
Mn	0,60	0,46		Fe	0,94	0,94	0,94	Fe		3,17	
Mg	0,28	0,30		Mn	0,04	0,04	0,04	Mn		0,08	
Ca	0,12	0,10		Mg	0,01	0,02	0,01	Mg		0,74	
Na	0,00	0,00		Ca	0,00	0,00	0,00	Ca		0,01	
								Zn		0,05	
Suma	8,00	8,00		Suma	1,99	2,00	1,99	Suma		29,45	
				Xilm	1,00	1,00	1,00				



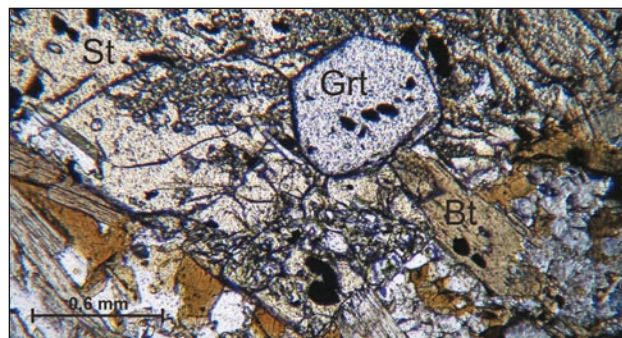
Obr. 5, 6. Sigmoidálne usporiadanie inklúzií ilmenitu a granátu v staurolite vzniklo rastom staurolitu v plastickom prostredí v strižnej zóne. Snímka vytvorená z 3D projekcie (naľavo); 2D rezy vedené osami x-z (a) a x-y (b, c) (vpravo).

Fig. 5, 6. Sigmoidal pattern of ilmenite and garnet inclusions in staurolite resulting from its growth in a ductile environment in a shear zone. 3D display on the left, 2D slices right represent planes determined by axes x-z (a) and x-y (b, c).

Počítačová mikrotomografia

Na štúdium vnútornej stavby staurolitu pomocou počítačovej mikrotomografie boli použité separované kryštály staurolitu odobraté v lokalite Hrubý Pleš na rozhraní katastrov Bratislava-Lamač a Záhorská Bystrica s GPS súradnicami (N 48°12'37.11", E 17°0,3'08.12") a nadmorskou výškou približne 325 m n. m.. Staurolit bol získaný z granátovo-staurolitových svorov až rúl, kde veľkosť študovaných kryštálov bola v rozpätí 2 – 5, maximálne 0,75 mm. Príprava vzoriek bola veľmi jednoduchá, pričom boli splnené len dve požiadavky – aby vzorka mohla voľne rotovať a aby jej veľkosť zodpovedala intenzite RTG žiarenia, resp. aby bola presvietená v celom svojom objeme. Staurolit sa nalepil na koniec sklenenej tyčinky, ktorá sa ukázala ako ideálny nosič drobných minerálov. Žiadna iná príprava vzorky nebola už ďalej nutná. Merania prebiehali v laboratóriu RTG mikrotomografie v ústave merania Slovenskej akadémie vied na RTG mikrotomografe Phoenix Nanotom 180 od firmy General Electric Measurements & Control Solutions phoenixx-ray (obr. 2) so submikrónovým rozlíšením 200 – 300 nm (maximálne rozlíšenie môže dosiahnuť, podľa vlastností vzorky, hodnoty menšie ako 0,5 μm), vysoko výkonnou wolfrámovou nanotubou s výkonom 180kV/15W a rozlíšením detektora 2 300 x 2 300 bodov. Kryštál bol po meraní

počítačovým mikrotomografom fixovaný do nábrusu a bol z neho vyhotovený rez v smere približne kolmom na os Z tak, aby vo výreze bol prítomný aj zistený granát. Výsledky vizualizácie z počítačovej tomografie boli konfrontované s BSE snímkami z elektrónového mikroanalýzátora a kontrastné minerálne fázy z počítačovej tomografie boli analyzované. Meranie chemického zloženia a vyhotovenie BSE obrazov prebiehalo s použitím prírodných štandardov na prístroji CAMECA – SX100, ktorý je umiestnený v Štátnom geologickom ústave D. Štúra. Vzorka staurolitu bola analyzovaná v presne definovanom reze počítačovej mikrotomografie.



Obr. 7. Idioblast granátu ako uzavrenina v staurolite.

Fig. 7. Idioblastic garnet as inclusion in staurolite.

Výsledky

Na obrázkoch z počítačovej mikrotomografie bola v staurolite zistená prítomnosť odlišných minerálnych hustotných fáz, ktoré po analyzovaní elektrónovou mikroanalýzou (EMPA) boli identifikované ako uzavreniny granátu, ilmenitu a kremeňa. Štúdiom orientovaného rezu sa pri porovnaní s BSE snímkami ukázalo, že obidve navzájom korešpondujú, pričom snímka z CT mala dostatočné rozlíšenie (obr. 3). Porovnanie distribúcie uzavrenín ilmenitu v staurolite a v okolitej hornine ukázalo zvýšenú koncentráciu ilmenitu v okolitej hornine. V staurolite bol zistený plynulý prechod „esovito“ usporiadaného ilmenitu z horniny do staurolitu (obr. 4). Vzhľadom na to, že chemické zloženie ilmenitu v hornine, v staurolite a v granáte je totožné, ilmenit je najstaršia minerálna fáza (tab. 1). Na základe 3D, ale i 2D zobrazenia na počítačovom mikrotomografe bolo v staurolite identifikované „sigmoidálne“ (esovité) usporiadanie uzavrenín ilmenitu (obr. 5, 6), čo poukazuje na vývoj krenulačnej kliváže a syntektonický rast staurolitu v plastických podmienkach za súčasnej pozvolnej rotácie tohto porfyroblastu. Okrem prehriatia a s tým súvisiacej zmeny reológie materských hornín, rotácia musela byť spätá s kryštalizáciou staurolitu v extenzných podmienkach. Podobný jav nebol pozorovaný v zrnách granátu, čo indikuje, že granát pravdepodobne rástol o niečo skôr ako staurolit.

V porovnaní s klasickým mikroskopickým štúdiom sú výhody použitia počítačovej mikrotomografie nesporné, keďže inklúzie v rámci jedného izolovaného zrna je možné študovať vo veľkom počte rezov. V prípade vzorky staurolitu z lokality Hrubý Pleš to bolo 660 rezov v smere osí x-z a 1 004 rezov v smere osí x-y. Možnosť 3D vizualizácie rezov pomocou 3D tomografickej rekonštrukcie navyše umožňuje študovať usporiadanie vnútornej stavby jedného kryštálu vo všetkých smeroch, čo mikroskopickým štúdiom vôbec nie je možné.

Aplikácia počítačovej mikrotomografie pre minerály a horniny

Počítačová mikrotomografia sa v poslednej dobe stáva populárnou, pretože ide o jednu z mála metód, ktorá nám umožňuje nedeštruktívne štúdium objektov v 3D zobrazení, pričom výsledkom je rotujúci objekt v podobe 3D animácie. Okrem toho ide o metódu, pomocou ktorej je možné nahliadnuť do vnútra rôznych netransparentných materiálov a študovať ich inklúzie a vnútorné štruktúry (Mees et al., 2003; Zandomenighi et al., 2010; Ketcham, 2005). Metodika sa napríklad ukázala ako vynikajúci nástroj na opis mikroštruktúr v porfyroblastoch granátu, kde pomocou mikrotomografie Huddleston-Holmes a Ketcham (2005) skúmali usporiadanie inklúzií (tzv. inclusion trails). Iným príkladom je 3D štúdium nukleácie a rastu granátov z Harpswell Neck, Maine v Spojených Štátoch. Táto práca bola zameraná na sledovanie zonálnosti granátov, pričom pomocou 3D animácií autori zistili, že veľa granátov vzniklo postupným zrastaním viacerých nukleí, ktoré napokon vytvorili jeden kryštál (Daniel a Spear, 1998). Carlson et al.

(2003) úspešne aplikovali počítačovú mikrotomografiu pri štúdiu eklogitov, migmatitov a bazaltov, ale aj pri výskume meteoritov. Zobrazenie priestorovej distribúcie minerálneho zloženia eklogitu z masívu Kreuzeck (Východné Alpy) aplikovaním počítačovej mikrotomografie prezentuje práca Ružička et al. (2011). Počítačovú tomografiu je možné aplikovať aj na štúdium akcesorických minerálov, kde sa pomocou 3D máp prvkov (Zr, REE) dajú získať zaujímavé textúry zirkónov a REE minerálov (Gualda et al., 2010). Metóda je v neposlednom rade užitočným nástrojom aj pri komerčných aplikáciách, napr. pri štúdiu technologických vlastností mramoru (Ružička et al., 2011), pieskovcov a iných materiálov. Počítačová mikrotomografia predstavuje unikátnu metódu pre 3D analýzu vnútorných štruktúr materiálov a meranie ich rozmerov, nedeštruktívne testovanie, vyhľadávanie defektov, inklúzií a štúdium ich distribúcie, posudzovanie puklinovitosti a pórovitosti. Metodika sa dá aplikovať len na fázy s dostatočným kontrastom absorpcií, resp. dostatočnými rozdielmi v hustote. Prednosti tejto metódy sú v možnosti štúdia vnútornej stavby minerálov *in situ*.

Záver

Použitie počítačovej mikrotomografie na štúdium vnútorných štruktúr, uzavrenín a textúr izolovaného kryštálu staurolitu predstavuje prvú aplikáciu na mineráloch v kryštaliku Západných Karpát. Aplikáciou počítačovej mikrotomografie sa v staurolite identifikovalo esovité usporiadanie uzavrenín granátu, ilmenitu a kremeňa, čo poukazuje na vývoj krenulačnej kliváže a jeho rast v strižnej zóne v píkových podmienkach metamorfózy. Vývoj krenulačnej kliváže nasvedčuje tomu, že staurolit rástol v plastických podmienkach deformácie, kde dochádzalo k jeho rotácii a postupnému uzatváraniu inklúzií granátu a ilmenitu, pravdepodobne ako dôsledku intrúzie bratislavského masívu. Plasticita prostredia, v ktorom staurolit rástol, súvisí s nárastom teploty do 580 – 610 °C pri tlaku 5 – 7 kbar (Vojtko et al., 2011) počas prográdneho vývoja metamorfózy.

Podakovanie. Táto publikácia bola vytvorená realizáciou projektu *Vytvorenie CE na výskum a vývoj konštrukčných kompozitných materiálov pre strojársku, stavebnú a medicínske aplikácie*, na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj, financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Za asistenciu pri meraní na mikrosonde autori ďakujú RNDr. V. Kolárovej, PhD., za cenné pripomienky ďakujeme RNDr. Mariánovi Janákovi, DrSc.. Terénne práce a mikrosondové analýzy minerálov boli financované z grantu VEGA 2/0031/09.

References

- BROSKA, I. & JANÁK, I., 1985: Akcesorické minerály metapelitov a ich vzťah k metamorfóze v oblasti Záhorskej Bystrice (Malé Karpaty). In: *Akcesorické minerály, ich petrogenetický a metalogenetický význam*. Bratislava, GÚDŠ, 101 – 106.
- CAMBEL, B., 1962: Pre-Mesozoic complexes of the Malé Karpaty

- Mts. In: *Explanations to the geological map of Czechoslovakia 1 : 200 000. sheet Wien-Bratislava. Geofond Publ.*, 28 – 73.
- CAMBEL, B., 1990: Izotopová geochronológia kryštalinika Západných Karpát. *Bratislava, Veda*, 183 s.
- CAMBEL, B., DYDA, M. & SPIŠIAK, J., 1981: Thermodynamic measurement of origin of minerals in the area of crystalline complex of Malé Karpaty Mts. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 32, 745 – 768.
- CAMBEL, B. & VILINOVIČ, V., 1987: Geochémia a petrológia granitoidných hornín Malých Karpát. *Bratislava, Veda*, 248 s.
- CAMBEL, B., MIKLÓŠ, J., KHUN, M. & VESELSKÝ, J., 1990: Geochémia a petrológia ílovito-kremitých metamorfovaných hornín kryštalinika Malých Karpát. *Bratislava, GÚ SAV*, 267 s.
- CARLSON, W. D., ROWE, T., KETCHAM, R. A. & COLBERT, M. W., 2003: Applications of high-resolution X-ray computed tomography in petrology, meteoritics and paleontology. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, 215, 7 – 22.
- DANIEL, Ch. G. & SPEAR, F. S., 1998: Three-dimensional patterns of garnet nucleation and growth. *Geology*, 26, 6, 503 – 506.
- DYDA, M., 1980: Metamorphic grade and packing index in garnets. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 31, 359 – 374.
- DYDA, M., 1981: Metamorphic grade and packing index of coexisting biotites and garnets from the Malé Karpaty Mts. metapelitic rocks. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 32, 2, 289 – 296.
- DYDA, M., 1997: Disturbance of the Variscan metamorphic complex indicated by mineral reaction, P-T data and crystal size of garnets (Malé Karpaty Mts.). In: *Grecula, P., Hovorka, D. & Putiš, M. (eds.): Geological evolution of the Western Carpathians. Bratislava, Miner. Slov., Monograph.*, 333 – 342.
- DYDA, M., 2000: Exhumation and cooling rates of the Variscan basement metamorphic complex inferred from petrological data (Malé Karpaty Mts.). *Slovak Geol. Mag.*, 6, 2 – 3, 293 – 297.
- DYDA, M. & MIKLÓŠ, J., 1993: Periplutonické zóny bratislavského granitoidného masívu (Malé Karpaty); rekryštalizácia, dehydratačné a objemové zmeny. *Miner. Slov. (Bratislava)*, 25, 93 – 103.
- FINGER, F., BROSKA, I., HAUNSCHMID, B., HRAŠKO, L., KOHÚT, M., KRENN, E., PETRIK, I., RIEGLER, G. & UHER, P., 2003: Electron-microprobe dating of monazites from Western Carpathian basement granitoids: Plutonic evidence for an important Permian rifting event subsequent to Variscan crustal anatexis. *Int. J. Earth Sci.*, 92, 86 – 98.
- GUALDA, G. A. R., PAMUKCU, A. S., CLAIBORNE, L. L. & RIVERS, M. L., 2010: Quantitative 3D petrography using X-ray tomography 3: Documenting accessory phases with differential absorption tomography. *Geosphere*, 6, 6, 782 – 792.
- HUDDLESTONE-HOLMES, R. C. & KETCHAM, R. A., 2005: Getting the inside story: Using computed X-ray tomography to study inclusion trails in garnet porphyroblasts. *Amer. Mineralogist*, 90, 1 – 17.
- IVAN, P. & MÉRES, Š., 2006: Litostratigrafické členenie a pôvod staropaleozoickej časti kryštalinika Malých Karpát – nový pohľad na základe výsledkov geochemického výskumu. *Miner. Slov. (Bratislava)*, 38, 2, 165 – 181.
- JANÁK, M., 1980: Štúdium metapelitov z oblasti bratislavského granitoidného masívu. [Diplomová práca.] *Manuskript. Bratislava, archív Kat. geochémie a mineralógie PF UK*, 80 s.
- KETCHAM, R. A., 2005: Computational methods for quantitative analysis of three-dimensional features in geological specimens. *Geosphere*, 1, 1, 32 – 41.
- KOHÚT, M., UHER, P., PUTIŠ, M., ONDREJKA, M., SERGEEV, S., LARIONOV, A. & PADERIN, I., 2009: SHRIMP U-Th-Pb zircon dating of the granitoid massifs in the Malé Karpaty Mountains (Western Carpathians): evidence of Meso-Hercynian successive S- to I-type granitic magmatism. *Geol. Carpath.*, 60, 5, 345 – 350.
- KORIKOVSKIJ, S. P., CAMBEL, B., MIKLÓŠ, J. & JANÁK, M., 1984: Metamorphism kristallínikuma Malých Karpát. Zonálnosť, etapy, sviaz s granitoidami. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 35, 437 – 462.
- KOUTEK, J. & ZOUBEK, V., 1936: Zpráva o geologických studiích a mapování v okolí Bratislavy. *Věst. St. geol. Úst.*, 12, 67.
- KRIST, E., KORIKOVSKIJ, S. P., PUTIŠ, M., JANÁK, M. & FARYAD, S. W., 1992: Geology and petrology of metamorphic rocks of the Western Carpathian crystalline complexes. *Bratislava, Vyd. UK*, 324 s.
- MAHEL, M., 1980: Sú granitoidné príkrovy Malých Karpát príkrovmi? *Miner. Slov. (Bratislava)*, 12, 185 – 187.
- MEES, F., SWENNEN, R., VAN GEET, M. & JACOBS, P., 2003: Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, 215, 1 – 6.
- PERCHUK, L. L., LAVRENTJEVA, I. V., KOTELNIKOV, A. R. & PETRIK, I., 1984: Sravnitel'naja charakteristika termodinamičeskich režimov metamorfizma parod glavnogo Kavkazskogo chrebt'a i Zapadnyh Karpát. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 37, 3, 335 – 363.
- PUTIŠ, M., 2006: Litostratigrafia a predalpínsky geodynamický vývoj staropaleozoických komplexov Malých Karpát – prehľad poznatkov vs. nové členenia. *Miner. Slov. (Bratislava)*, 38, 2, 181 – 186.
- RICHARZ, S., 1908: Der sildliche Teil der Kleinen Karpathen und die Hainburger Berge. *Jb. K.-Kön. geol. Reichsanst. (Wien)*, 53, 1 – 48.
- RUŽIČKA, P., HAIN, M., DURMEKOVÁ, T. & ŠEVČÍK, R., 2011: 3D vizualizácia mikroštruktúrnych zmien slovenských mramorov vystavených pôsobeniu kryštalizácie solí aplikáciou rtg. mikrotomografie. In: *Hain, M., Karovič, K. & Jerz, J. (eds.): Použitie moderných nedeštruktívnych meracích metód vo výskume nových materiálov v rámci centra excelentnosti CEKOMAT. Bratislava, Ústav merania SAV*, 1 – 100.
- RUŽIČKA, P., HAIN, M., MICHÁLEK, M. & DYDA, M., 2011: Aplikácia rtg. mikrotomografie na zobrazenie priestorovej distribúcie minerálneho zloženia eklogitu z masívu Kreuzeck (Východné Alpy). In: *Hain, M., Karovič, K. & Jerz, J. (eds.): Použitie moderných nedeštruktívnych meracích metód vo výskume nových materiálov v rámci centra excelentnosti CEKOMAT. Bratislava, Ústav merania SAV*, 1 – 100.
- VAŠKOVSKÝ, I., KOHÚT, M., NAGY, A., PLAŠIENKA, D., PUTIŠ, M., VAŠKOVSKÁ, E. & VOZÁR, J., 1988: Geologická mapa Bratislavy a okolia 1 : 25 000. *Bratislava, GÚŠS*.
- VOJTKO, P., JANÁK, M. & BROSKA, I., 2011: Thermodynamic modelling of P-T conditions in staurolite-bearing metapelites of the Malé Karpaty Mts. In: *Termodynamické modelovanie petrologických procesov. Bratislava, Petros, Vyd. UK*, 69 s.
- VOJTKO, P., BROSKA, I., ŠEVČÍK, R. & HAIN, M., 2011: Distribúcia Fe-Ti oxidov v mineráloch a horninách: predbežné výsledky z počítačovej mikrotomografie. In: *Hain, M., Karovič, K. & Jerz, J. (eds.): Použitie moderných nedeštruktívnych meracích metód vo výskume nových materiálov v rámci centra excelentnosti CEKOMAT. Bratislava, Ústav merania SAV*, 1 – 100.
- ZANDOMENEGHI, D., VOLTOLINI, M., MANCINI, L., BRUN, F., DREOSSI, D. & POLACCI, M., 2010: Quantitative analysis of X-ray microtomography images of geomaterials: Application to volcanic rocks. *Geosphere*, 6, 6, 793 – 804.

Rukopis doručený 14. 3. 2011

Revidovaná verzia doručená 12. 9. 2011

Rukopis akceptovaný red. radou 13. 9. 2011

Identification of the rotation of staurolite from metapelites by computed microtomography (Záhorská Bystrica, Malé Karpaty Mts.)

The Malé Karpaty Mts. are situated in the western part of the Slovak Republic as the westernmost crystalline complex of the Western Carpathians. The Malé Karpaty Mts. consist of two parts, being divided by the Pezinok-Pernek crystalline complex to Bratislava and Modra granitoid massifs. The age of the Bratislava massif was estimated by Rb-Sr isochrone to 348 ± 3 Ma (Cambel, 1990), later by U-Th-Pb dating of monazite to 345 ± 22 Ma (Finger et al., 2003) and recently by U-Th-Pb SHRIMP dating to 355 ± 5 Ma (Kohút et al., 2009). Metamorphic cover of granitoid rocks is composed mainly of metabasites (Pernek units), and metapelites (Pezinok unit). Metamorphic overprint in the Malé Karpaty Mts. is represented by two metamorphic events, the regional and periplutonic metamorphism connected with the intrusion of Bratislava massif. Convention geothermobarometry yield the P-T conditions of contact periplutonic metamorphism of metapelitic rocks of Bratislava massif in a range of temperatures from 500 to 580 °C and pressures from 3 to 3.5 kbar (Korikovskij et al., 1984; Perchuk et al., 1984). Dyda (1981, 1997, 2000) estimated P-T conditions to 580–620 °C with pressures from 5 to 6 kbar.

The P-T conditions estimated by thermodynamic modelling by Perplex software, presented in this work, showed the temperatures from 580–610 °C and pressures 5 to 7 kbar. The hill Hrubý Pleš near Záhorská Bystrica, formed by metapelitic rocks, is situated in the western part

of the Bratislava granitoid massif near the contact with granitoids. Blastomylonites of staurolite are characteristic for the metapelites from this studied locality. The metapelite represents the staurolite-chlorite metamorphic zone, showing a typical mineral association of staurolite, garnet, biotite, muscovite, chlorite and quartz. The staurolite crystals large 0.75 cm have been liberated from the staurolite gneisses (locality Hrubý Pleš) and computed microtomography showed the internal structure and several inclusions inside the studied crystal. The inclusions have been identified by microprobe analyses as ilmenite, garnet and quartz. Similar composition of ilmenite, obtained from both staurolite crystal and surrounding host rock, were interpreted as an evidence of identical origin. Mineral inclusions of ilmenite are scattered in the staurolite and host rock, but with the higher density in the host rock. Analyses of garnet inclusions showed almandine composition with small spessartine components. Garnet showed very slight zonality from the core to rim.

A sigmoidal pattern of ilmenite crystals was found in the staurolite, indicating the staurolite rotation during its growth. Staurolite rotation was interpreted as a growth during a peak of metamorphism in a ductile shear zone, when the staurolite gradually enclosed ilmenite and garnet grains, generating the sigmoidal pattern. This process was contemporaneous with the intrusion of the Bratislava granitoid massif.