

Asociácia biotit - granát - sillimanit v granitoch S-typu: *P-T* podmienky kryštalizácie granitov Malej Magury bratislavského masívu a Považského Inovca (Slovenská republika)

Association of biotite - garnet - sillimanite in S-type granites: *P-T* conditions of granite crystallization in the Malá Magura, Malé Karpaty and Považský Inovec Mts. (Slovak Republic)

ŠTEFAN ČÍK* A IGOR PETRÍK

Geologický ústav SAV, Dúbravská 9, 84 005 Bratislava, Slovenská republika; * e-mail: geolcist@savba.sk

ČÍK S., PETRÍK I. (2012) Asociácia biotit - granát - sillimanit v granitoch S-typu: *P-T* podmienky kryštalizácie granitov Malej Magury bratislavského masívu a Považského Inovca (Slovenská republika). *Bull. mineral.-petrolog. Odd. Nár. Muz. (Praha) 20, 2, 197-207. ISSN 1211-0329.*

Abstract

The S-type granitic rocks that contain informative mineral assemblages, e.g. biotite + garnet ± aluminosilicate may be used for calculation of *P-T* conditions. In the Western Carpathians such assemblages occur in several cores of Strážovské vrchy (Malá Magura core), Považský Inovec and Malé Karpaty (Bratislava massif) Mts. In this work we present results of *P-T* calculations obtained from these granites. The first two contain biotite + garnet + sillimanite, in the Malé Karpaty granites sillimanite is absent. By application of the thermodynamic database and principle of equilibrium reactions (Holland, Powell 1998, 2011, Thermocalc) we have calculated intersections of equilibrium reactions among the above phases. The results gave $T = 727 - 777$ °C at $P = 570 - 680$ MPa (Malá Magura). Univariant curves for the Malé Karpaty and Považský Inovec granites yielded ca 690 - 730 and 650 - 680 °C, respectively, for the pressure range obtained from Malá Magura granites. All temperatures obtained reached the muscovite dehydration melting interval, the highest values reached also the lower *T* boundary for biotite dehydration melting. Muscovite dehydration produced peritectic sillimanite abundant in metatectites (melanosomes) and diatectites. Garnet present in granites is probably magmatic due to its homogeneity and relatively high MnO (up to 18 mol. % spessartine). A pervasive retrogression produced ubiquitous muscovite (± quartz) replacing sillimanite. The lack of garnet in migmatite neosomes prevents calculation of *P-T* conditions, however, muscovite dehydration melting is documented by sillimanite-rich melanosomes. Another metatectite type without sillimanite, garnet and muscovite suggests that fluid-present melting may have been operative at the same conditions.

Keywords: granite, garnet, biotite, sillimanite, *P-T* conditions, Thermocalc, Malé Karpaty Mts., Malá Magura Mts., Považský Inovec Mts., Západné Karpaty

Použité skratky minerálov: Ab - albit, Alm - almandín, An - anortit, Ann - annit, Bt - biotit, Cel - celadonit, Eas - eastonit, Fe-cel - fero-celadonit, Grs - grossulár, Grt - granát, Kfs - K-živec, L - tavenina, Ms - muskovit, Pg - paragonit, Phl - flogopit, Pl - plagioklas, Prp - pyrop, Qtz - kremeň, Sill - sillimanit, spessartin - Sps.

Úvod

Predalpínsky fundament Západných Karpát je tvorený metamorfovanými až migmatizovanými horninami, para- a ortorulami, amfibolitmi, do ktorých intrudovali telesá variských granitoidov. Granitoidné horniny sa významne podieľajú na stavbe kryštalinika, kde sú významným horninovým typom hlavne v tatickej a veporickej tektonickej jednotke, v podobe drobných telies sa vyskytujú aj v gemeriku (Plašienka et al. 1997; Petřík, Kohút 1997; Broska, Uher 2001). Zatiaľ čo metamorfovaným horninám sa venovalo mnoho prác (Korikovskij et al. 1987; Spišiak et al. 1988; Krist et al. 1992; Janák et al. 1999a,b; Dyda 1990; Faryad 1995; Radvanec et al. 2007), problematike geotermobarometrie granitoidov z územia Západných Karpát sa venovala menšia pozornosť. Výsledky štúdia *P-T-X* podmienok granitoidov I-typu sú v prácach, Petřík, Broska (1994), Bónová et al. (2010). Menej je petrolo-

gických prác o granitoch S-typu (Petřík, Konečný 2009) a o špecializovaných granitoch S-typu (Faryad, Dianiška 1989; Kubiš, Broska 2005).

Pri výbere granitov na štúdium geotermobarometrie bola určujúca prítomnosť vhodnej minerálnej asociácie (Bt + Grt ± Sill + Ms), ktorá sa vyskytuje hlavne v (leuko) granitoch S-typu, a je známa z oblasti kryštalinika Suchého a Malej Magury (Hovorka, Fejdi 1983; Korikovskij et al. 1987), Považského Inovca (Korikovskij, Putiš 1986) a bratislavského masívu Malých Karpát (Korikovskij et al. 1984; Cambel, Viliňovič 1987). Z oblasti Malej Magury patria predkladané termobarometrické výpočty k prvým presnejšie stanoveným *P-T* podmienkam z granitoidov S-typu v Západných Karpatoch.

Cieľom tejto práce je interpretácia termodynamických výpočtov tlaku a teploty, prípadne len teploty minerálnej asociácie granitov S-typu, ktoré zodpovedajú podmien-

kam dehydratačného tavenia muskovitu, prípadne spodnej hranici dehydratačného tavenia biotitu.

Geologická charakteristika študovaného územia

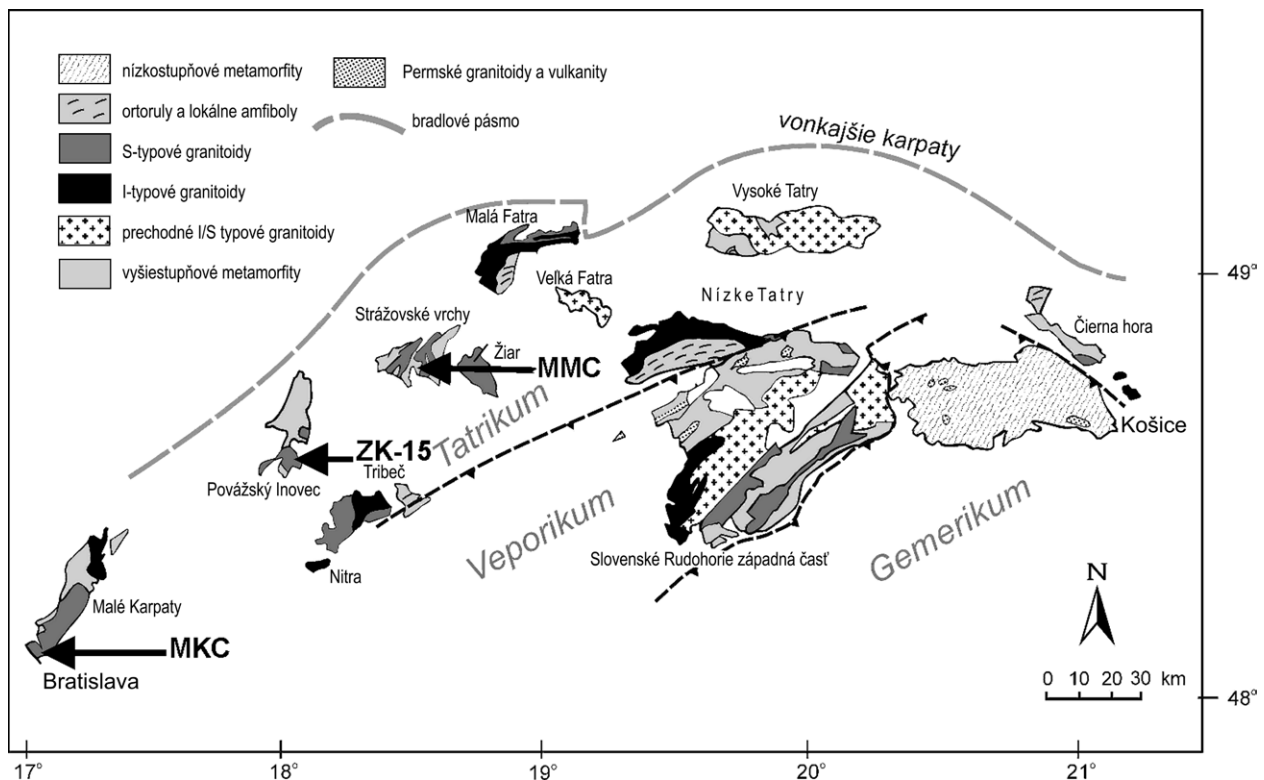
Predalpínsky fundament vystupuje v Strážovských vrchoch v podobe dvoch jadier nazývaných Suchý a Malá Magura podľa najvyšších vrchov (obr. 1). Strážovské vrchy sú však budované predovšetkým mezozoikom a to najmä vápencami strážovského príkrovu (Maheľ 1985). Obidve jadrá sú tvorené rulovo-migmatitovým komplexom, ktorý je v centrálnych častiach prenikaný telesami peraluminiových a pegmatitických granitoidov (Kahan 1979, 1980). Vek granitoidov z Malej Magury je 356 ± 9 mil. r. podľa datovania jednotlivých zirkónov evaporačnou metódou (Kráľ et al. 1997). Metapeliti a ruly, ktoré tvoria okraj jadier prechádzajú do metatektických migmatitov. Tieto sú charakteristické výskytom mezosomu a leukosómu často plasticky zvrásneného. Metatektity miestami obsahujú polohy injektovaných amfibolitov a intaktných biotitických rúl (metagrauvakov), (obr. 2a). Veľmi často sú prenikané hrubými (do 50 cm) žilami pegmatitov a pegmatitických granitov (obr. 2b). Smerom k centrálnym častiam jadier sa metatektity nárastom podielu leukogranitu postupne menia na diatexity až hybridné granitoidy. Tieto tvoria 1 km mocné pásmo kde granitická hmota úplne prevláda a migmatitickú zložku reprezentujú rekryštalizované mafické šlíry (palimpsesty). Šlíry sú tvorené biotitom, kremeňom, sillimanitom a muskovitom. Centrá obidvoch jadier tvoria hrubozrnné pegmatoidné granity a strednozrnné granátické aplity (obr. 2d) v intruzívnom vzťahu k horninám migmatitového pásma. V profile od okraja k centru jadier možno pozorovať množstvo vzťahov medzi rulami, amfibolitmi, a migmatitmi (metatexitmi, diatexitmi - hyb-

ridnými granitmi) a pegmatitickými granitmi. V oblasti diatexitov možno pozorovať aj homogénne, prípadne porfyrické biotitické tonality, ktoré pravdepodobne nesúvisia s migmatitovým pásmom (Viliničová 1990). Tieto horniny neobsahujú muskovit, granát ani sillimanit a neboli predmetom nášho štúdia.

Alumosilikáty v granitoidných horninách

Prítomnosť sillimanitu a andaluzitu v granitoidoch je mineralogickým vyjadrením ich peraluminiového zloženia: najčastejšie patria k S-typu asociujúceho s metapelitmi - rulami a migmatitmi (Pattison et al. 1982; Sevigny et al. 1989; Alasino et al. 2010; Wang, Shu 2012; Pedrosa-Soares et al. 2011). Pattison et al. (1982) opísali výskyt sillimanitu v niektorých vzorkách granitoidov, a vypočítali aj priemerné *P-T* podmienky. Sillimanit v granitoidnom plutóne S-typu z orogénu Wopmay (Kanada) asociuje s granátom, cordieritom, biotitom, plagioklasom a K-živcom. Z termobarometrických výpočtov umožnených prítomnou asociáciou v študovaných vzorkách získali teploty medzi 800 - 1100 °C a tlaky v rozpätí 700 - 1000 MPa.

Výskyt sillimanitu v peraluminóznych granitoidoch pohoria Monashee (juhovýchodná Kanada) Sevigny et al. (1989) tiež využili na výpočet *P-T* podmienok kryštalizácie granitoidnej magmy. Dva typy granitoidov, ktoré asociujú s metapelitmi, obsahujú sillimanit v asociácii s kremeňom, plagioklasom, K-živcom, primárnym muskovitom, biotitom a granátom almandínového zloženia. Zo vzoriek, ktoré obsahovali sillimanit odvodili teplotu 632 - 696 °C, pri tlaku 630 - 380 MPa. Sillimanit má v syn-kinematických granitoidoch fibrolitický až jemne prizmatický charakter a je zvyčajne zatláčaný veľkými lupeňmi sekundárneho muskovitu (Sevigny et al. 1989).



Obr. 1 Rozšírenie granitoidov S- a I-typu v Západných Karpatoch s vyznačenými miestami odberu vzoriek granitoidov, MMC - séria vzoriek z kryštalinika Malej Magury, Strážovské vrchy, ZK-15 - dvojsludný granodiorit, Povážsky Inovec, MKC - dvojsludný granit a granodiorit z Malých Karpát, upravené podľa Petrika et al. 1994.

Z oblasti orogénu Aracuí (východobrazílska pegmatitová provincia) bol sillimanit opísaný z granitoidov až leukogranitov S-typu (Pedrosa-Soares et al. 2011). Tieto granitoidy asociujú s rulami, miestami migmatizovanými, sú charakteristické výskytom sillimanitu a granátu. Tento aluminosilikát sa tvorí v trhlínach lupeňov biotitu, ktorý má tendenciu zmiznúť vo vysoko deformačných zónach. Geotermobarometriou minerálnej asociácie Qtz + Pl + Kfs + Grt + Sill + Bt autori vypočítali teplotu 814 °C a vďaka prítomnosti sillimanitu mohli získať aj tlakový údaj 500 MPa.

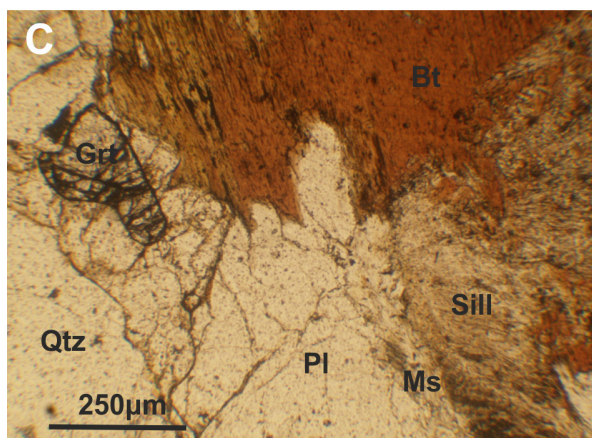
Výskyt sillimanitu je známy aj zo syn-tektonického leukogranitu v himalájskom kryštalickej komplexe južne od Mt. Everestu (Musumeci 2002). Tento leukogranit vystupuje spolu s migmatitmi a sillimanitovými rulami. V leukogranite sillimanit vystupuje aj v podobe niekoľko cm hrubých a niekoľko metrov dlhých, monominerálnych žílach známych aj ako sillimanitové vrstvy. Tento sillimanit je považovaný za restitový, teda metamorfný, prípadne metasomatický (Musumeci 2002). Petřík a Konečný (2009) sa zaoberali petrogenézou biotiticko-granátového leukogranitu z Nízkych Tatier. Minerálna asociácia Pl + Kfs + Grt ± Sill + Bt + Qtz umožnila výpočet teploty 608 ± 108 °C pri tlaku 410 ± 190 MPa. Podľa autorov bol v rovnováhe s biotitom okraj magmatického granátu s vysokým obsahom Mn, čo spôsobilo značnú smerodajnú

odchýlku priemernej teploty.

Výskyt magmatického andaluzitu je známy napr. z La Costa pluton v Sierras Pampeanas, Argentína (Alasino et al. 2010). Vystupuje s cordieritom v peraluminiovom granite, bohatom na alkálie. Sprievodné minerály andaluzitu sú biotit (siderofylit-eastonit), tiež primárny a sekundárny muskovit. Termometrom Gangulyho a Saxenu (1984) a barometrom Hoischa (1990) boli vypočítané hodnoty teploty 733 °C a tlaku 190 MPa (Alasino et al. 2010).

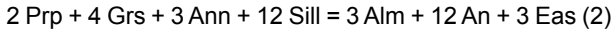
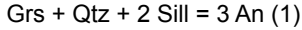
Použitie metódy - geotermobarometria v granitoidnej magme

V tejto práci vychádzame z predpokladu, že princíp rovnováhy medzi minerálmi je aplikovateľný rovnako na granitoidy ako na metamorfované horniny (pozri napr. Pattison et al. 1982; Sevigny et al. 1989; Pedrosa-Soares et al. 2012) a priebeh reakcií nie je ovplyvnený prítomnosťou menšieho množstva taveniny. Granitoidy z oblasti Malej Magury, Považského Inovca a Malých Karpát obsahujú magmatický granát a muskovit, v Malej Magure a Považskom Inovci je prítomný aj sillimanit. Uvedenú asociáciu, spolu s plagioklasom a kremeňom, považujeme za informatívnu (kritickú), t.j. takú, ktorá poskytuje dostatok reakcií na výpočet teploty, tlaku alebo obidvoch parametrov. Prítomnosť informatívnej asociácie umožňuje aplikáciu rovnovážneho princípu a existujúcej termo-



Obr. 2 A: Kontakt medzi rulou a granitoidom, cca 2 km z. od obce Čavoj, Suchý. Foto Š. Čík, 2011. B: Pegmatitová žila oddeľujúca migmatit v hornej časti obrázku od granitoidu ktorý je v spodnej časti obrázku, Porubská dolina, cca 3 km sv. od obce Poruba, Suchý. Foto Š. Čík, 2011. C: Kontakt granátu, sillimanitu, biotitu, muskovitu, kremeňa a plagioklasu v dvojsľudnom granite, fibrolitický sillimanit tvorí pomerne veľké vlasovité agregáty, vzorka MMC-7, Malá Magura. Foto Š. Čík. D: Makroskopické zrná granátov v granatickom aplite, cca 2 km sv. od obce Poruba, Malá Magura. Foto Š. Čík, 2011.

dynamickej databázy na geotermobarometrické výpočty. Pre takéto výpočty sme vybrali nepremenené zrná minerálov v kontakte, prípadne v ich tesnej blízkosti, pričom sa použili analýzy bodov z okrajov vybraných zrn. Prítomnosť sillimanitu je nevyhnutná, kvôli využitiu reakcií citlivých na tlak, ako napr. :



Priebeh reakcií, pokiaľ získame ich priesečník (invariantný bod), nám umožňuje výpočet hodnôt P a T pri známych aktivitách minerálov a ich termodynamických vlastnostiach. Tie sú súčasťou termodynamických databáz, napr. Berman (1988), Holland, Powell, (1990, 1998, 2011), White et al. (2001). Na výpočet sa používajú príslušné softvary, napr. TWEED alebo Thermocalc. V článku je použitý softver Thermocalc v. 2.31. Aktivity koncových členov minerálov boli vypočítané v programe AX2, ktorý je súčasťou balíka programu Thermocalc. Keďže

predpokladáme, že priebeh príslušných reakcií si vyžadoval nasýtenie vodou do výpočtov sme predpokladali $a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$. Vo výstupnom súbore z Thermocalcu je dôležité aby štatistická hodnota sigfit bola pod 1, len vtedy je P - T údaj korektný. Pri grafickej interpretácii sa na výpočet chybovej elipsy využil program AVEPT, ktorý okrem smerodajnej odchýlky tlaku a teploty berie do úvahy aj koreláciu chýb. Trojný bod a hranice fáz Al_2SiO_5 podľa Holdaway, Mukhopadhyay (1993).

Mikrosondové analýzy asociácie minerálov boli namerané na prístroji Cameca SX100 (ŠGÚDŠ, Bratislava). Analytické podmienky boli: urýchľovacie napätie 15 - 20 KV, priemer elektrónového lúča : 1 - 10 μm , štandardy : K - ortoklas, Na - albit, Si a Ca - wollastonit, Al - Al_2O_3 , Mg - MgO, Fe - hematit, Ti - TiO_2 .

Lokalizácia vzoriek

Granitoidy vystupujúce v podobe zárezov ciest a odkrytov asociujú s metamorfítmi, najčastejšie s migmatitmi a rulami, zriedka aj s amfibolitmi (Malá Magura), inde s pegmatitmi (Malé Karpaty, Považský Inovec). Na mnohých miestach sú granitoidy zvetrané, resp. tektonicky silne porušené. Všetky študované granitoidy sú klasifikované ako S-typ (obr. 3 QAP diagram). Odobrali sme tieto série vzoriek (obr.1) : MMC - séria granitoidov z kryštalinika Malej Magury, Strážovské vrchy, MKC - séria granitoidov z kryštalinika Malých Karpát a ZK-15 - vzorka granitu z kryštalinika Považského Inovca. Koordináty vzoriek sú: MMC-7: 48° 50'43" S a 18°33'22" V, MMC-8: 48°51'35" S a 18°31'37" V, ZK-15: 48°38'6" S a 17°57'2" V, MKC: 48°11'41" S a 17°5'32" V.

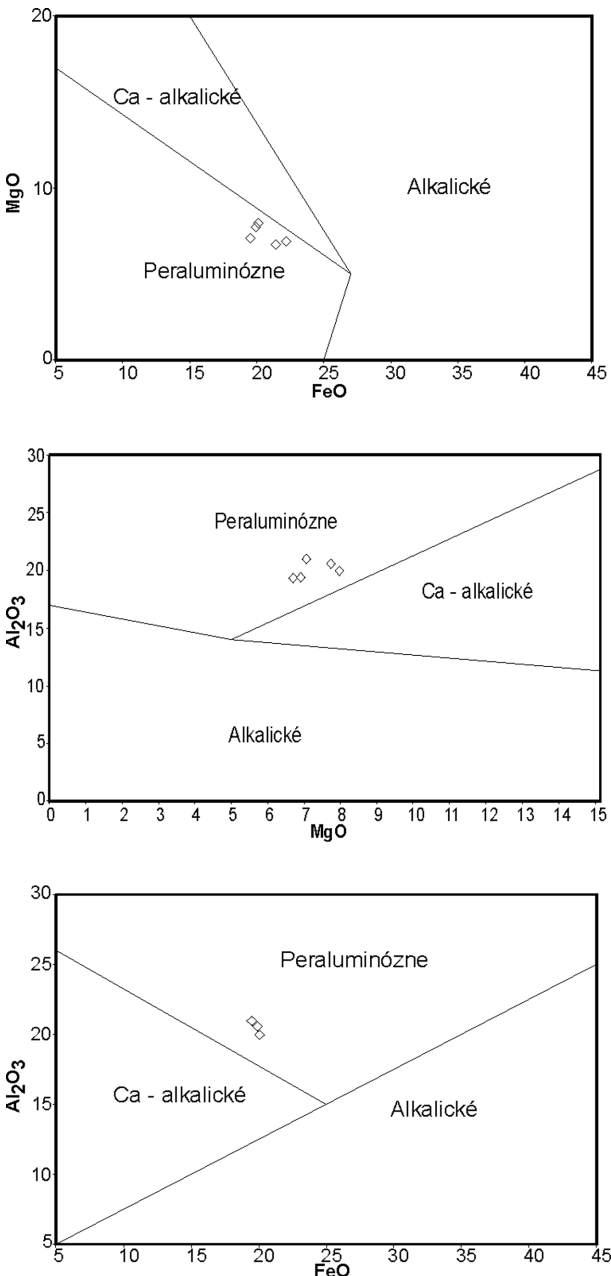
Petrografický opis

V dolinách na juhovýchodných svahoch Malej Magury možno pozorovať prstovité injektovanie metamorfítov (obr. 2a), hlavne migmatitizovaných rúl granitoidmi. Na niektorých miestach je možné pozorovať ako pegmatitová žila oddeľuje granit od migmatitizovanej ruly (obr. 2b).

Granitoidy, diatexity pegmatoidné granity

Granodiority (diatexity) (vzorky MMC-8, ZK-15 a MKC-7) sú strednozrné, s makroskopickými biotitickými šlíry (obr. 3.). Plagioklas je hypidiomorfný, slabozonálny, sericitizovaný, bazicita kolíše podľa vzorky medzi An_{29-10} a An_{35-25} . Hypidiomorfné zrná sú často zatlačané neskorým K-živcom, niektoré zrná obsahujú inklúzie kremeňa a apatitu. Muskovit je veľmi hojný a neskorý, často zatlačá až pohlcuje fibrolitický sillimanit a tvorí symplektity s kremeňom. Sillimanit je charakteristický pre tento horninový typ dosahuje až 7 obj. %, (tab. 1) buď ako samostatný, alebo v prerastoch s biotitom a muskovitom (obr. 2C). K-živec (typicky <10 obj. %, tab. 1) je neskorý, allotriomorfný, mriežkovaný (mikroklin), niekedy pertitický. Je často sprevádzaný myrmekitom. Granát sa vyskytuje sporadicky, má hyp- až idiomorfný tvar. Z akcesórií je veľmi typický, hojný, veľký a neskorý apatit. Biotitické šlíry (hrubé niekoľko cm) pozostávajú z biotitu a kremeňa, hojný je tiež sillimanit obrastaný muskovitom. Šlíry sú bohaté na akcesórie, monazit, zirkón.

Monzogranity sú hrubozrné, leukokrátne s panalotriomorfnou štruktúrou (vzorky MMC-7, MKC-6). Plagioklas je niekedy zonálny s bazicitou, ktorá kolíše podľa vzorky medzi An_{7-5} až An_{20-10} . V pegmatitových žilách klesá bazicita na An_{10-2} . Hojný je aj kremeň, ktorý býva



Obr. 3 Zloženie biotitov z granitoidov Malej Magury, v diagramoch podľa Abdel-Rahman (1994), oxidy sú v hm. %.

Tabuľka 1 Modálne analýzy vzoriek granitoidov, vzorky MMC - Malá Magura, vzorky MKC - Malé Karpaty, vzorka ZK-15 - Považský Inovec

vzorka	Qtz (%)	Pl (%)	Kfs (%)	Mus (%)	Bt (%)	Ap(%)	Grt (%)	Sill (%)
MMC-7	37.55	33.5	14.75	1.20	4.5	0.9	0.3	7.3
MMC-8	29.6	41.7	10.15	9.55	0.9	1.4	3.05	3.65
MKC-6	45.85	23.85	14.45	7.30	5.45	2.85	0.25	0
MKC-7	26	44.45	9.85	10.45	5.85	1.6	1.8	0
ZK-15	45.45	29	7.90	6.75	7.75	2.15	1	0

Tabuľka 2 Súhrn vypočítaných P-T podmienok kryštalizácie zo študovaných vzoriek granitoidov (MMC) v režime „average P-T“ (Thermocalc v. 2.31)

vzorka	T (°C)	T (odchýlka)	P (MPa)	P(odchýlka)	korelácia	sigfit
MMC-8-1	736	61	610	210	0.870	0.64
MMC-8-2	777	53	630	170	0.872	0.88
MMC-8-3	727	38	680	150	0.902	0.86
MMC-8-6	774	53	610	160	0.870	0.64
MMC-7-2	670	34	550	130	0.918	0.99
MMC-7-3	683	35	530	130	0.898	0.96

zväčša stredne zrnitý, alebo vystupuje ako veľké zrná obsahujúce uzavreté zrná plagioklasu a apatitu. K-živce je perititický býva buď veľký hypidiomorfný a často zatláčajúci plagioklas, alebo tvorí zhluky drobnejších allotriomorfných samostatných zrn. Muskovit je tiež hojný, býva skorý aj neskorý, často obsahuje chumáče sillimanitu. Fibrolitický sillimanit je charakteristický, hojný (maximálne až do 4 obj. %, tab. 1), často zrastá s biotitom, alebo tvorí veľké samostatné jemne vlasovité agregáty. Miestami vystupuje v asociácii s plagioklasom, biotitom, muskovitom, kremeňom a granátom. Z akcesórií je sporadický apatit aj ako inklúzie v plagioklase, menej v biotite. Biotit je zriedkavý, často chloritizovaný. Granát je pomerne zriedkavý, tvorí prevažne väčšie zrná s hojnými inklúziami kremeňa, vyskytuje sa však v asociácii s biotitom, s ktorým je buď v kontakte, alebo je ním obklopený. Vzorka z bratislavského masívu (MKC-6) je kataklastický, aplitický muskovitický monzogranit. K-živce je veľmi hojný, intersticiálny, mriežkovaný mikroklín. Plagioklas je allotrio- až hypidiomorfný, sericitizovaný s bazicitou An_{15-20} . Muskovit býva tiež hojný, tvorí veľké lupene, biotit je zriedkavejší, drobnolupenitý (tmavo a svetlohnedý). Granát je ojedinelý, vyskytuje sa ako zrast drobných zrn uzatvorený v plagioklase, alebo samostatne v kontakte s biotitom. Vzorka je chudobná na akcesórie, sillimanit nie je prítomný (Carnel, Vilinovič 1987). Študovaný granitoid z Považského Inovca (vzorka ZK-15) vystupuje v južnom bloku (Putiš 1983) v bojníanskom telese a je reprezentovaný jemno- až strednozrným biotiticko-muskovitickým granodioritom. Plagioklas je hypidio- až allotriomorfný, s bazicitou An_{15} , K-živce tvorí poikilitické vyrastlice, často mriežkovaný, aj intersticiálny. Muskovit je hojný v podobe veľkých lupenov, biotit je drobnolupenitý (tmavo a svetlohnedý), čiastočne muskovitizovaný. Granát tvorí izometrické zrná rozptýlené v kremeň, medzi živcami a muskovitom. Hojný je hrubostĺpčekovitý apatit. Granitoidy Považského Inovca majú charakter S - typu (Broska, Uher 2001) s peraluminiovým zložením v leukokratických a pegmatitických varietach často s granátom a sillimanitom.

Migmatity (metatexity) sú tvorené mezosómom a neosómom. Mezosóm je jemnozrný, tvorený kremeňom, plagioklasom a biotitom. Neosóm je tvorený strednozrným leukogranitom Tenký melanosóm (1 - 2 mm) tvorí lem po okrajoch leukosómu. Melanosóm pozostáva

Tabuľka 3 Reprezentatívne analýzy granátu z granitoidov Malej Magury (MMC)

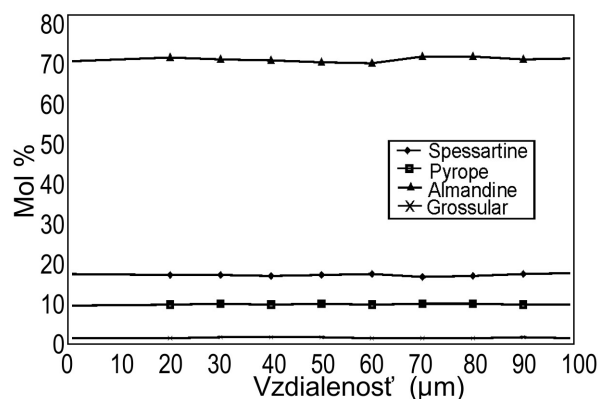
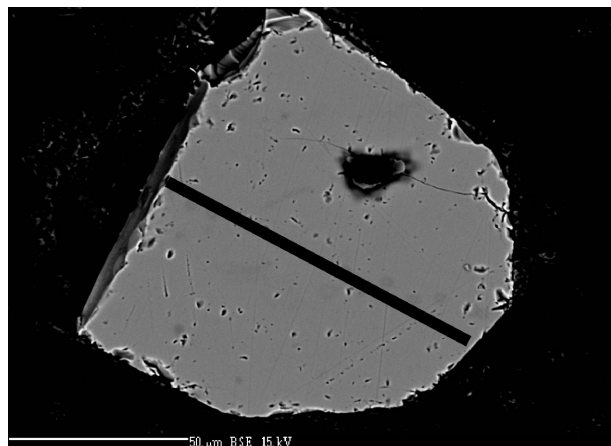
	MMC-8	MMC-8	MMC-7	MMC-7
SiO ₂	36.74	36.91	37.37	37.15
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	21.06	21.23	21.48	21.35
FeO	31.27	31.07	34.02	33.62
MnO	7.48	7.54	5.66	6.87
MgO	2.50	2.58	2.59	2.05
Na ₂ O	0.02	0.04	0.01	0.04
CaO	0.65	0.74	0.91	0.92
suma	99.76	100.08	101.08	101.06
Prepočítané na 12(O)				
Si	2.95	2.96	2.96	2.96
Al tetraed.	0.05	0.03	0.03	0.04
Al oktaed.	1.96	1.97	1.98	1.96
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	2.07	2.06	2.19	2.16
Fe ³⁺	0.08	0.06	0.06	0.08
Mn	0.52	0.51	0.38	0.46
Mg	0.29	0.31	0.30	0.24
Na	0.00	0.00	0.00	0.01
Ca	0.06	0.06	0.07	0.08

hlavne z biotitu, v pôvodne pelitických polohách obsahuje značný podiel sillimanitu, ktorý je často obrastaný neskorým muskovitom, hojný je akcesorický monazit a zirkón. Plagioklas má pomerne uniformnú bazicitu An_{27} v mezosome aj neosome (pozri tab. 5). Stomatitické a pyritické migmatity postupne prechádzajú do diatektických migmatitov (= hybridných granitoidov), kde sa biotitické polohy tvoria šmuhy a palimpsesty v granitoidoch. Možno rozlíšiť dva typy metatexitov: (1) so sillimanitom (+ muskovitom), ktorý je sústredený v melanosómoch a (2) metatexity bez sillimanitu, muskovitu a granátu, s leukosómom tvoreným len kremeňom a plagioklasom (An_{24-22}). Tieto zmeny v mineralogickom zložení migmatitov, t.j. znížené množstvo, prípadne chýbanie K-živca, sú pravdepodobne odrazom zloženia protolitu. S výnimkou pegmatoidných a aplitoidných granitov je malé množstvo K-živcov všeobecnou črtou granitoidov Suchého a Malej Magury (Vilinovičová 1990).

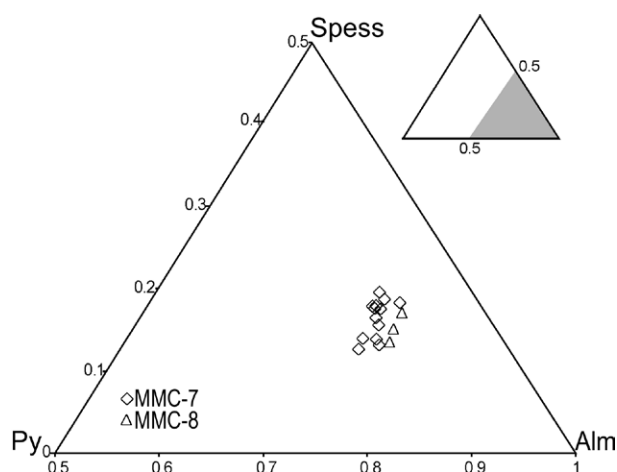
Výsledky

Malá Magura (Strážovské vrchy)

Na výpočty P - T podmienok sú najvhodnejšie granitoidy z kryštalinika Malej Magury a Suchého, kde je sillimanit v niektorých vzorkách prítomný až do 8 obj. %, tiež je dostatok magmatického granátu, biotitu a muskovitu. Biotit vo všetkých študovaných vzorkách je klasifikovaný ako annit (Fe-biotit, obr. 3, tab. 4). Má zvýšený obsah Al a znížené množstvo Mg, čo je charakteristické pre bio-



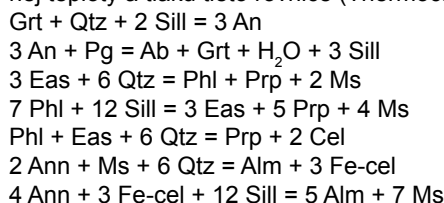
Obr. 4 Profil cez granát (vzorka MMC-8) z kryštalinika Malej Magury; zloženie je vyjadrené v koncových čle-
noch. Prepočty granátu podľa Andrew (2008).



Obr. 5 Chemické zloženie vybraných granátov vyjadrené pomocou koncových členov, MMC-7 a MMC-8, vzorky z granitoidov Malej Magury.

tity z peraluminiových granitoidov. Vo vzorkách MMC-8 a MM-7 z Malej Magury sa našiel kontakt biotitu s granátom (obr. 2C) v prítomnosti sillimanitu. Muskovit použitý na termobarometrické výpočty je ochudobnený o Fe a obohatený o Na a Ti (tab. 4). Granát je na všetkých študovaných lokalitách relatívne homogénny (tab. 3, obr. 4 a 5) a považujeme ho za magmatický (peritektický). Zložením je to prevažne almandín - spessartín s malým podielom pyropového komponentu (obr. 5). Zloženie granátov použitých na P - T výpočty sa pohybuje v rozpätí od $\text{Sps}_{0.12}\text{Prp}_{0.10}\text{Alm}_{0.67}\text{Grs}_{0.01}$ po $\text{Sps}_{0.18}\text{Prp}_{0.13}\text{Alm}_{0.74}\text{Grs}_{0.02}$. Plagioklas má pomerne nízke obsahy Ca, zodpovedajúce bazicitu An_{16-20} (tab. 5).

Z výpočtov s použitím databázy Hollanda a Powella (1998, 2011, Thermocalc 3.21 a 3.25, režim „average P - T “) boli získané nasledujúce hodnoty pre granitoidy z Malej Magury: $T = 727 - 774$ °C a $P = 530 - 680$ MPa (tab. 2). Výpočet je založený na rovnováhe všetkých prítomných minerálov, takúto rovnováhu predpokladáme u minerálnych fáz, ktoré sú v kontakte alebo tesnej blízkosti. V režime „average P - T “ sme použili na výpočty priemernej teploty a tlaku tieto rovnice (Thermocalc v. 3.21):



Tabuľka 4 Reprezentatívne analýzy biotitu a muskovitu z granitoidov Malej Magury (vzorky MMC)

	MMC-8 biotit	MMC-7 biotit	MMC-8 muskovit	MMC-7 muskovit
SiO ₂	34.94	34.98	47.79	46.28
TiO ₂	1.95	2.35	0.01	0.61
Al ₂ O ₃	19.98	20.30	33.82	35.65
FeO	20.10	21.49	1.83	1.43
MnO	0.33	0.19	0.04	0.02
MgO	7.98	7.24	1.05	0.61
Na ₂ O	0.19	0.20	0.39	0.66
CaO	0.04	0.01	0.07	0.02
K ₂ O	9.22	9.54	9.86	10.61
H ₂ O	3.92	2.92	4.53	4.50
suma	98.76	99.31	99.39	100.42
prepočítané na 11(O)				
Si	2.68	2.66	3.16	3.05
Al tetraed.	1.31	1.33	0.83	0.94
pozícia x	4	4	4	4
Al oktaed.	0.49	0.48	1.81	1.82
Ti	0.11	0.13	0.00	0.03
Fe ²⁺	1.29	1.36	0.10	0.08
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.02	0.01	0.00	0.00
Mg	0.91	0.82	0.10	0.06
pozícia y	2.83	3.13	2.04	2.02
Na	0.02	0.03	0.05	0.08
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.90	0.92	0.83	0.89
pozícia z	0.93	0.95	0.89	0.98

Z našich výpočtov P - T podmienok vyplýva, že študované granitoidy z Malej Magury sa tavili pri o vyššej teplote a tlaku (vo väčších hĺbkach) v porovnaní s existujúcimi odhadmi z metamorfovaných hornín ($T = 600 - 711$ °C a $P = 365 - 470$ MPa, Vilinovičová 1990), a odhadu metamorfózneho trendu: $T = 640$ °C pri $P = 500$ MPa (Dyda 1990). Treba poznamenať, že toto zistenie platí iba pre granitoidy širšieho okolia Poruby, teda pre juhovýchodnú časť kryštalinika Malej Magury, odkiaľ boli odobraté študované vzorky granitoidov.

Bratislavský masív (Malé Karpaty) a Považský Inovec

Vzhľadom na chybanie sillimanitu vzorky z Malej Magury a Považského Inovca umožňujú len výpočet univariantných kriviek T pri modelovom tlaku (režim „average T “, Thermocalc v. 2.31). Z univariantnej krivky vypočítanej pre určitý rozsah tlakov, môžeme odhadnúť teploty pre nezávisle stanovený tlak. Na výpočty sme použili minerálnu asociáciu: Grt + Bt + Pl + Ms + Qtz + H₂O. Reprezentatívne analýzy minerálov použitých na výpočty sú v tabuľke 6, výsledky štúdia termometrie s odhadom tlaku sú v tabuľke 7. Na výpočty sme použili rovnice (Thermocalc v. 3.21, režim „average T “):

Tabuľka 5 Reprezentatívne analýzy plagioklasu z granitoidov Malej Magury (vzorky MMC)

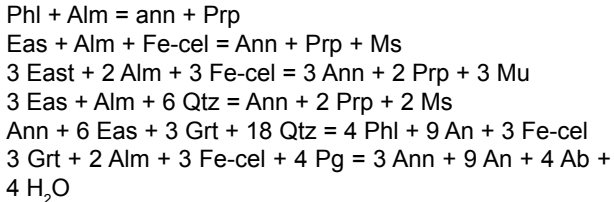
	MMC-8	MMC-7
SiO ₂	64.32	63.70
Al ₂ O ₃	22.81	23.48
FeO	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00
Na ₂ O	9.92	8.76
CaO	3.42	4.37
K ₂ O	0.18	0.50
suma	100.69	100.88
prepočítané na 8(O)		
Si	2.82	2.82
Al	1.18	1.22
Fe	0	0
Mg	0	0
Na	0.84	0.75
Ca	0.16	0.20
K	0.01	0.03

Tabuľka 6 Reprezentatívne analýzy biotitu, muskovitu, granátu a plagioklasu, vzorka MKC-6, Malé Karpaty, ZK-15a, Považský Inovec

	MKC-6 biotit	ZK-15a biotit	MKC-6 mus	ZK-15a mus	MKC-6 grt	ZK-15a grt	MKC-6 Pl	ZK-15a Pl
SiO ₂	34.16	34.21	42.24	45.77	36.60	36.46	63.94	63.47
TiO ₂	2.31	2.38	0.67	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	18.93	19.02	35.29	34.76	20.89	20.86	22.36	22.60
FeO	22.34	23.11	1.52	1.46	28.39	30.54	0.00	0.00
MnO	0.52	0.04	0.02	0.02	10.77	8.76	0.00	0.00
MgO	5.50	6.01	0.53	0.68	1.32	1.67	0.00	0.04
Na ₂ O	0.11	0.12	0.61	0.54	0.00	0.00	9.76	9.53
CaO	0.07	0.02	0.01	0.07	0.89	1.45	3.17	3.79
K ₂ O	8.97	9.54	10.14	10.37	0.00	0.00	0.26	0.23
H ₂ O	4.90	3.88	4.51	4.51	0.00	0.00	0.00	0.00
suma	97.59	98.69	98.58	98.55	99.01	99.82	99.49	99.66
prep. na	11(O)	11(O)	11(O)	11(O)	12(O)	12(O)	8(O)	8(O)
Si	2.17	2.67	3.04	3.07	3.00	2.97	2.83	2.81
Al tet.	1.284	1.324	0.954	0.924	0.004	0.034	1.164	1.184
pozícia x	4	4	4	4				
Al okt.	0.49	0.43	1.83	1.83	2.03	1.97	0.00	0.00
Ti	0.13	0.14	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.48	1.51	0.08	0.08	1.95	2.03	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.03	0.02	0.00	0.00	0.75	0.60	0.00	0.00
Mg	0.65	0.70	0.05	0.06	0.16	0.20	0.00	0.00
pozícia y	2.80	2.85	2.03	2.02				
Na	0.01	0.02	0.08	0.07	0.00	0.00	0.83	0.81
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.12	0.15	0.18
K	0.88	0.95	0.87	0.89	0.00	0.00	0.01	0.01
pozícia z	0.90	0.97	0.95	0.96				

Tabuľka 7 Teploty vypočítané zo vzoriek MKC-6, MKC-7 a ZK-15 (Thermocalc v. 2.31, „average T “)

MKC-7 T (°C)	543	570	592	612	630	639	664	679
MKC-6 T (°C)	604	638	663	684	701	716	730	742
ZK-15 T (°C)	558	582	603	628	652	671	688	705
Tlak (MPa)	100	200	300	400	500	600	700	800



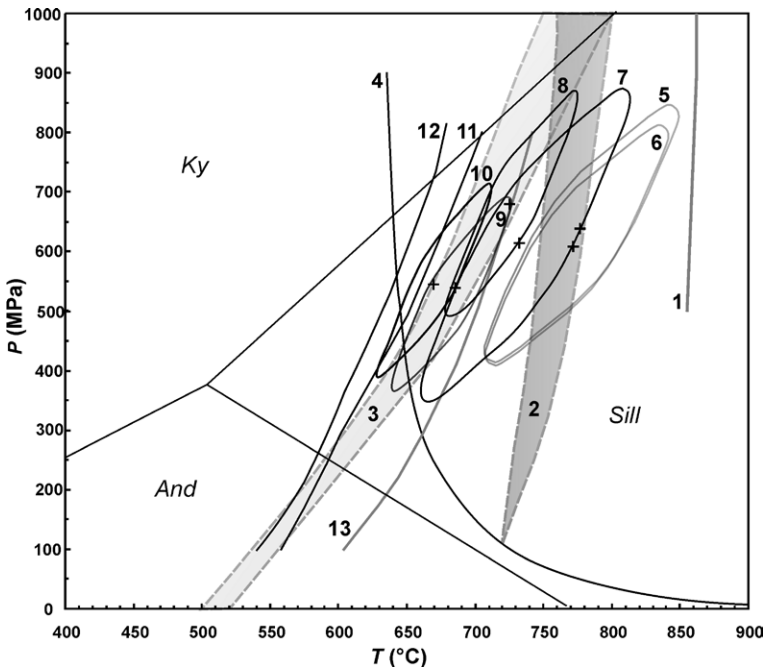
Priebehy vypočítaných univariantných T kriviek zobrazuje obrázok 6.

Diskusia

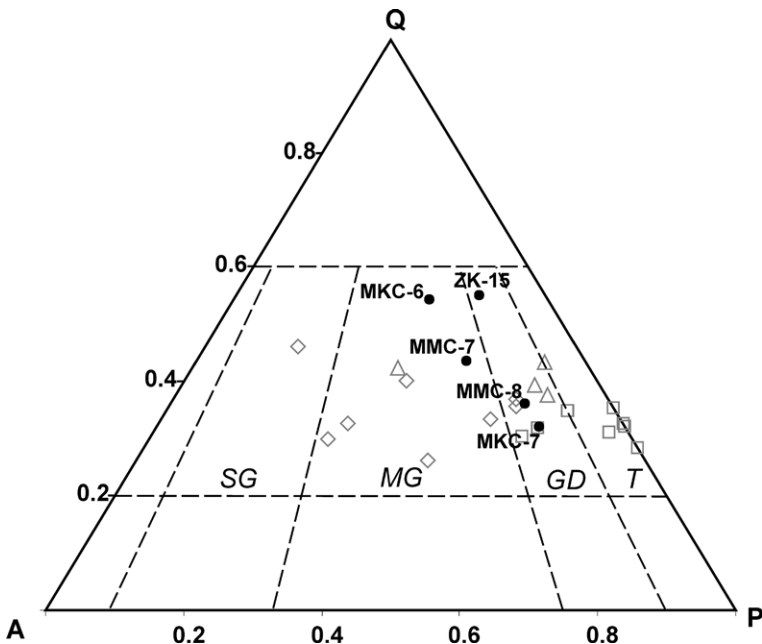
Pôvod sillimanitu a granátu (Malá Magura, Suchý)

Sillimanit: Výskyt sillimanitu v hybridných granitoch Suchého a Malej Magury je mineralogickým vyjadrením peraluminiovej povahy zdroja (Hovorka, Fejdi 1983). Jeho pôvod sa dá vysvetliť viacerými spôsobmi:

- 1) Vznikol ako restit z migmatitov (diatexitov). Takýto môže byť rekryštalizovaný sillimanit prerastený s biotitom.
- 2) Vznikol ako peritektická fáza pri inkongruentnom tavení muskovitu (Thompson, Algor 1977). Dehydratačnú reakciu generujúcu leukosómovú taveninu: $\text{Ms} + \text{Qtz} = \text{Sill} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O}$ opísali Ashworth a McLellan (1985). Textúrne takýto sillimanit asociuje s K-živcom, ktorý je v retrogresívnom (rehydratačnom) štádiu nahradený symplektitom $\text{Mus} + \text{Qtz}$. V prítomnosti taveniny táto reakcia prechádza do reakcie: $\text{Ms} + \text{Qtz} + \text{Pl}_1 = \text{Sill} + \text{Kfs} + \text{Pl}_2 + \text{L}$ (Ashworth, McLellan 1985).
- 3) Sillimanit vznikol reakciou s neskorou - prípadne postmagmatickými fluidami, ktoré zmenili zloženie solidifikovanej horniny únikom alkálií v kyslom prostredí (Korikovskij et al. 1987). Tomuto nasvedčuje zloženie hornín, ktoré je ochudobnené o alkálie.



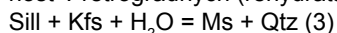
Obr. 6 Priemet vypočítaných P - T podmienok zo študovaných lokalít kryštalínika Malej Magury, a priemet vypočítaných kriviek T zo študovaných vzoriek z Malých Karpát a Považského Inovca. Legenda : 1 - dehydratačná krivka biotitu podľa Vielzeuf, Holloway (1988); 2 - rozsah hydratačného tavenia biotitu podľa Le Breton, Thompson (1988); 3 - rozsah tavenia muskovitu podľa Thompson, Tracy (1979); 4 - granitové minimum (Johannes, Holtz 1996); 5 - vzorka MMC-8-2 (Malá Magura): $777^\circ\text{C} \pm 53$, $630 \text{ MPa} \pm 170 \text{ MPa}$; 6 - vzorka MMC-8-6: $774^\circ\text{C} \pm 53$, $610 \text{ MPa} \pm 160 \text{ MPa}$; 7 - vzorka MMC-8-1: $736^\circ\text{C} \pm 61$, $610 \text{ MPa} \pm 210 \text{ MPa}$; 8 - vzorka MMC-8-3: $727^\circ\text{C} \pm 38$, $680 \text{ MPa} \pm 150 \text{ MPa}$; 9 - vzorka MMC-7-3: $683^\circ\text{C} \pm 35$, $530 \text{ MPa} \pm 130 \text{ MPa}$; 10 - vzorka MMC-7-2: $670^\circ\text{C} \pm 34$, $550 \text{ MPa} \pm 130 \text{ MPa}$; 11 - vypočítaná závislosť T od P pre vzorku ZK-15 (Považský Inovec); 12 - vypočítaná závislosť T od P pre vzorku MKC-7-2 (Malé Karpaty); 13 - vypočítaná závislosť T od P pre vzorku MKC-6-1 (Malé Karpaty).



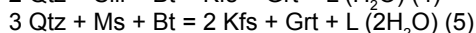
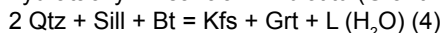
Obr. 7 Klasifikačný QAP diagram študovaných vzoriek granitoidov : MKC-6-1 a MKC-7-2 - vzorky z Malých Karpát, ZK-15 - vzorka z Považského Inovca, MMC-7 a MMC-8 - priemer zo série vzoriek z Malej Magury. V pozadí: prázdne kosoštvorce - pegmatoidné a aplitoidné granity, prázdne trojuholníky - hybridné biotitické granity, prázdne štvorce - biotitické tonality (oblasť Liešťan, Klinu a Čavoja, všetko jadro Suchého, Petrik, nepublikované). Vysvetlivky : SG - syenogranit, MG - monzogranit, GD - granodiorit, T - tonalit.

Predpokladáme, že sillimanit v migmatitoch i granitoidoch Strážovských vrchov má magmatický, presnejšie peritektický pôvod. Prechod z metatexitov do diatexitov značí rast teploty a nárast množstva taveniny. V metatexitoch je hrubozrnný sillimanit súčasťou melanosómu, kde tvorí kontinuálne pásiky v biotite, kde sa segregoval po vytavení časti protolitu. V diatexitoch je sillimanit (fibrolit) buď nepravidelne rozptýlený a textúrne neskorý, prípadne sa koncentruje v biotitických šlíroch (hrubých až niekoľko centimetrov), ktoré sú tvorené biotitom, rekryštalizovaným sillimanitom a kremeňom (+ akcesorickým monazitom). Preto hlavná časť sillimanitu sa javí peritektická, vzniknutá inkongruentným tavením muskovitu, ale ani postmagmatický vznik časti rozptýleného sillimanitu, ktorý presekáva všetky ostatné minerály, účinkom kyslých fluidov nemôžeme vylúčiť.

Retrogresia: Sillimanit v diatexitoch i šlíroch je zatláčaný a pohlcovaný muskovitom. Výnimkou sú prerasty sillimanitu s biotitom, kde biotit môže pôsobiť ako bariéra pred rehydratačnými reakciami. Všadeprítomnosť neskorého muskovitu, v ktorom je zvyškový sillimanit často zachovaný len v centrách, potvrdzuje jeho vysokú reaktivnosť v retrográdných (rehydratačných) reakciách:



Granát: S rastom teploty vzniká granát rôznymi dehydratačnými reakciami z biotitu (Grant 1985):



Granát však môže vzniknúť aj ako peritektická fáza aj pri vodou nasýtenom tavení: $\text{Bt} + \text{Kfs} - \text{Plg} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O} = \text{Grt} + \text{L}$ (Jung et al. 2009).

Počas retrogresie môže granát reagovať s taveninou, pričom vznikne biotit so sillimanitom, čo je charakteristický jav hybridných granitov. Pokladáme však za pravdepodobnejšie, že prerasty biotitu so sillimanitom vznikli skôr rekryštalizáciou a rozptýlením restitických šlírov. V granitoidoch je granát peritektický, podobne ako sillimanit, čomu nasvedčuje jeho homogénnosť a len málo zvýšený obsah Mn (do 18 mol. % Sps). Granát sa nachádza predovšetkým v aplitických granitoch, prípadne v diatexitoch (hybridných granitoidoch). V metatexitoch s kremeňovo-oligoklasovým leukosómom a biotitickým melanosómom chýba.

P-T podmienky kryštalizácie granitoidov

Na obrázku 6 sú výsledky výpočtov P a T (priesečníky reakcií s chybovými elipsami) konfrontované s krivkami tavenia muskovitu (3) (Thompson, Tracy 1979) a biotitu (2) (Le Breton, Thompson 1988) bez prítomnosti fluidnej fázy, a krivkou granitového minima (4) (Johannes, Holtz 1996). Vzorky z Malých Karpát a Považského Inovca (11-13) sú uvedené ako univariantné krivky. Všetky získané teploty ležia nad granitovým minimom, vrátane univariantných kriviek v rozsahu 500 - 600 MPa a s výnimkou Považského Inovca (12) dosahujú, príp. presahujú teploty muskovitového tavenia. Najvyššie teploty (730 - 780 °C, tab. 2) získané z rovnovážnych asociácií minerálov z hybridných granitoidov Malej Magury sú v rozsahu dehydratačného tavenia biotitu podľa Le Bretonovej a Thompsona (1988), ale nedosahujú teplotu podľa krivky (1) 780 - 850 °C pre biotit s vyšším mg# (Vielzeuf, Holloway 1988; Vielzeuf, Montel 1994; Stevens et al. 1997). Za možné považujeme aj dehydratačné tavenie biotitu na spodnej hranici taviaceho intervalu (Le Breton, Thompson 1988), čomu by mohli nasvedčovať vzorky MMC-8-2 a 6 (5, 6).

Získané teploty interpretujeme ako podmienky pri tavení metasedimentárneho protolitu v stredne hlbokoj úrovni (ca 20 km). Pre Považský Inovec a bratislavský masív sú teploty v rozsahu tlakov 500 - 700 MPa najnižšie (650 - 680 °C). Tieto teploty považujeme za kryštalizačné, čo je v súlade s pegmatoidnými črtami vzoriek. Staršie odhady tlaku pre kontaktnú aureolu bratislavského masívu podľa Korikovského et al. (1984) sú 350 MPa, novšie výpočty z metapelitov indikujú ca 600 MPa (Vojtko et al. 2011). Teploty získané z Malej Magury sú relatívne vysoké, pričom tlak je o niečo vyšší než hodnoty získané Dydom (1990), 450 - 560 MPa z metapelitov.

Vzhľadom na absenciu granátu nepočítali sme P - T podmienky v metatexitoch, ale minerálne asociácie umožňujú porovnanie s hybridnými granitmi. Zatiaľčo metatexity so sillimanitom a muskovitom považujeme za produkt muskovitového, vznik druhého typu kremeňovo-živcových metatexitov si vyžaduje vodou nasýtené tavenie. Získané regionálne teploty nad 700 °C sú dostatočné na tavenie kremeňovo-plagioklasových (An_{10-20}) litológií pri $a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$, keďže minimum v systéme Qtz-Ab-H₂O pri $P_{\text{H}_2\text{O}} = 500$ MPa je $T = 690$ °C (Johannes, Holtz 1996). Vodou nasýtené tavenie vysvetľuje vznik stromatitických migmatitov s asociáciou Qtz - Pl - Bt, bez muskovitu, sillimanitu a granátu. Rozdielne mechanizmy tavenia sa mohli uplatniť v litologicky odlišných polohách pelitických metasedimentov, a polohách obohatených o instersticiálnu vodu.

Záver

Najvyššie teploty získané z granitoidov Malej Magury v rozsahu tlakov 500 - 700 MPa dosahujú ca 770 °C. Predpokladáme, že dominantnou reakciou pre vznik taveniny bolo dehydratačné tavenie muskovitu, ale dosiahnutie spodnej hranice dehydratačného tavenia biotitu považujeme tiež za reálne. Podmienky dehydratačného tavenia muskovitu dosiahli všetky vzorky z Malej Magury a je zodpovedné za vznik hlavnej časti sillimanitu. Univariantná reakcia z bratislavského masívu je v rozsahu tlakov 500 - 600 MPa podobná granitom Malej Magury, zatiaľčo granit z Považského Inovca indikuje najnižšie teploty ca 650 - 680 °C, ktoré považujeme za teploty kryštalizácie čo je v súlade s ich pegmatoidným charakterom. Výraznou črtou migmatitov a hybridných granitov je intenzívna muskovitizácia peritektického sillimanitu v retrogresívnej fáze. Pokiaľ prebehlo dehydratačné tavenie biotitu je časť granátov tiež peritektická.

Viac typov metatektických migmatitov v obidvoch jadrách Strážovských vrchov si okrem dehydratačných reakcií vyžaduje aj vodou nasýtené tavenie za vzniku kremeňovo živcovej taveniny bez sillimanitu a granátu.

Naše výsledky, aj keď sú nové v granitoidoch týchto pohorí, nadväzujú na existujúce odhady založené na metapelitoch v bratislavskom masíve (Korikovskij et al. 1984), Malej Magure (Dyda 1990), Suchom (Korikovskij et al. 1987) a Považskom Inovci (Korikovskij, Putiš 1986). Na výpočty P - T kryštalizácie sa javia ako najvhodnejšie granitoidy z kryštalínika Malej Magury a Suchého, kde je sillimanit v niektorých vzorkách prítomný až do 8 obj. %, tiež je dostatok granátu, biotitu a muskovitu. Metódu výpočtu P - T podmienok kryštalizácie v granitoidoch s asociáciou granát - biotit ± sillimanit považujeme za perspektívnu a vhodnú aj pre iné granitoidy, kde sa táto asociácia vyskytuje, ako napr. Považský Inovec, Nízke Tatry, niektoré typy gemerických granitov.

Pod'akovanie

Práca vznikla v rámci projektov Vega 2/0060/10 a APVV-0080-11. Autori d'akujú oponentom za kritické pripomienky, ktoré pomohli výraznému zlepšeniu článku.

Literatúra

- Abdel-Rahman A. F. M. (1994) Nature of Biotites from Alkaline, Calc-alkaline, and Peraluminous Magmas. *J. Petrol.* 35, 2, 525-541.
- Alasino P. H., Dalhquist J. A., Galindo C., Casquet C., Saavedra J. (2010) Andalusite and Na- and Li-rich cordierite in the La Costa pluton, Sierras Pampeanas, Argentina: textural and chemical evidence for a magmatic origin. *Int. Earth Sci.* 99, 1051-1065.
- Andrew J. L. (2008) An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets. *Computers and Geosciences* 34, 1769-1780.
- Ashworth J. R., McLellan E. L. (1985) Textures. In: *Migmatites, Bell and Bain, Glasgow*, 180-204.
- Berman R. G. (1988) Internally consistent thermodynamic data for minerals in the system $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2$. *J. Petrol.* 29, 445-522.
- Bónová K., Broska I., Petřík I. (2010) Biotite from Čierna Hora Mountains granitoids (Western Carpathians, Slovakia) and estimation of water contents in granitoid melts. *Geol. Carpath.* 61, 3-17.
- Broska I., Uher P. (2001) Whole-rock chemistry and genetic typology of the West-Carpathian Variscan granites. *Geol. Carpath.* 52, 79-90.
- Cambel B., Vilinovič V. (1987) Geochémia a petrológia granitoidných hornín Malých Karpát. *VEDA, SAV*, 1-248.
- Dyda M. (1990) Retrograde processes in paragneisses of the Suchý and Malá Magura Mts. *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 39, 241-257.
- Faryad S. W. (1995) Phase petrology and P-T conditions of mafic blueschists from the Meliata unit, West Carpathians, Slovakia. *J. metamorphic Geol.* 13, 701-714.
- Faryad S. W., Dianiška I. (1989) Garnets from granitoids of the Spišsko-gemerské Rudohorie Mts. *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 40, 715-734.
- Ganguly J., Saxena S. K. (1984) Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and applications to geothermobarometry. *Am. Mineral.* 69, 88-97.
- Grant J. A. (1985): Phase equilibria at partial melting of metapelites. In: *Migmatites (J.R. Ashworth, ed.)*, 110-173 (ruský preklad).
- Hoisch T. D. (1990) Empirical calibration of six geobarometers for mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + plagioklase + garnet. *Contrib. Mineral. Petrol.* 140, 225-234.
- Holdaway M. J., Mukhopadhyay B. (1993) A reevaluation of the stability relations of andalusite; Thermochemical data and phase diagram for the aluminum silicates. *Am. Mineral.* 78, 298-315.
- Holland T. J. B., Powell R. (1990) An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2O_2$. *J. metamorphic Geol.* 8, 89-124.
- Holland T. J. B., Powell R. (1998) An internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *J. metamorphic Geol.* 16, 309-343.
- Holland T. J. B., Powell R. (2011) An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *J. metamorphic Geol.* 29, 333-383.
- Hovorka D., Fejdi P. (1983) Garnets of peraluminous granites of the Suchý and the Malá Magura Mts. (The Western Carpathians) - their origin and petrological significance. *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 34, 103-115.
- Janák M., Hurai V., Ludhová L., Thomas R. (1999a) Partial melting and retrogression of high-grade metapelites, the Tatra Mountains, Western Carpathians. *Phys. Chem. Earth (A)* 24, 589-294.
- Janák M., Hurai V., Ludhová L., O'Brien P. J., Horn E. E. (1999b) Dehydration melting and devolatilization during exhumation of high-grade metapelites: the Tatra Mountains, Western Carpathians. *J. metamorphic Geol.* 17, 379-395.
- Johannes W., Holtz R. (1996) Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks. *Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York*, 1-333.
- Jung C., Jung S., Nebel O., Hellebrand E., Masberg P., Hoffer E. (2009) Fluid-present melting of meta-igneous rocks and the generation of leukogranites - Constraints from garnet major- and trace element data, Lu-Hf whole rock-garnet ages and whole rock Nd-Sr-Hf-O isotope data. *Lithos* 111, 220-235.
- Kahan Š. (1979) Geologické profily kryštalinikum Strážovských vrchov (Suchý a Malá Magura). In: *Tektonické profily Západných Karpát. ŠGÚDŠ, Bratislava*, 87-115.
- Kahan Š. (1980) Strukturelle und metamorphe Charakteristik des Kristallins des Gebirges Strážovské Vrchy (Suchý and Malá Magura). *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 31, 576-601.
- Korikovskij S. P., Cambel B., Miklós J., Janák M. (1984) Metamorfizm kristalinikuma Malých Karpát: etapy, zonalnosť, svjaz s granitoidami. *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 35, 437-462.
- Korikovskij S. P., Kahan Š., Putiš M., Petřík I. (1987) Metamorfická zonalnosť v kristalinikume Suchy i vysokotemperaturnyj avtometasomatizm v glinozemistých granitach Stražovskich gor. *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 38, 2, 181-203.
- Korikovskij S. P., Putiš M. (1986) Metamorfická zonalnosť i diaforez v krystalinikume Považského Inovca. *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 37, 115-136.
- Král' J., Hess C. Kober B., Lippolt H. J. (1997) $^{207}Pb/^{206}Pb$ and $^{40}Ar/^{39}Ar$ age data from plutonic rocks of the Strážovské vrchy Mts. basement, Western Carpathians. Ed.: P. Grečula, D. Hovorka, M. Putiš, 235-252. *Miner. Slov., Monograph.*
- 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. *Comenius University Press, Bratislava*, 1-324.
- Kubiš M., Broska I. (2005) The role of boron and fluorine in evolved granitic rock system (on the example of the Hnilec area, Western Carpathians). *Geol. Carpath.* 56, 193-204.
- Le Breton N., Thompson A. B. (1988) Fluid-absent (dehydration) melting of biotite in metapelites in the early stages of anatexis. *Contrib. Mineral. Petrol.* 99, 226-237.

- Mahel' M. (1985): Geologická stavba Strážovských vrchov. *ŠGÚDŠ, Bratislava*, 1-221.
- Musumeci G. (2002) Sillimanite-bearing shear zones in syntectonic leucogranite: fluid-assisted brittle-ductile deformation under amphibolite facies conditions. *J. Struct. Geol.* 24, 1491-1505.
- Pattison D. R. M., Carmichael D. M., St-Onge M. R. (1982) Geothermometry and Geobarometry Applied to Early Proterozoic S-Type Granitoid Plutons, Wopmay Orogen, Northwest Territories, Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.* 79, 394-404.
- Pedrosa-Soares Cristina P. D. C., Carlos N., Silva L. C., Novo T., Rontaco J., Medeiros S., Castaneda C., Queiroga G., Dantas E., Dussin I., Alkmim F. (2011) Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Aracuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian pegmatite Province and related mineral resources. In: *Bettencourt S. A., Campos J. S., Ferreira V. P. (eds.) Granite-Related Ore Deposits, Geological Society, London, Special Publications.* 350, 25-51.
- Petrík I., Broska I. (1994) Petrology of two granite types from the Tribeč Mts., Western Carpathians: an example of allanite-magnetite vs. monazite-ilmenite dichotomy. *Geol. J.* 29, 59-78.
- Petrík I., Kohút M. (1997) The evolution of granitoid magmatism during the Variscan orogen in the Western Carpathians. In: *Geological evolution of the Western Carpathians. Ed.: P. Grecula, D. Hovorka, M. Putiš, 235-252. Miner. Slov., Monograph.*
- Petrík I., Konečný P. (2009) Metasomatic replacement of inherited metamorphic monazite in a garnet granite from the Nízke Tatry Mountains, Western Carpathians, Slovakia: chemical dating and evidence for disequilibrium melting. *Am. Mineral.* 94, 957-974.
- Plašienka D., Grecula P., Putiš M., Kováč M., Hovorka D. (1997) Evolution and structure of the Western Carpathians: an overview. *Miner. Slov., Monograph, Bratislava*, 1-24.
- Putiš M. (1983) Outline of geological-structural development of the crystalline complex and envelope Paleozoic of the Považský Inovec Mts. *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 34, 457-482.
- Radvanec M., Konečný P., Némec Z., Grecula P. (2007) P-T-t dráha a lokálne anaktektické tavenie metapelitu s prímiesou psamitického kremeňa vo variskej metamorfóze gemerika. *Miner. Slov.* 39, 1-44.
- Sevigny J. H., Parrish R. R., Ghent E. D. (1989) Petrogenesis of Peraluminous Granites, Monashee Mountains, Southeastern Canadian Cordillera. *J. Petrol.* 30, 3, 557-581.
- Spišiak J., Pitoňák P., Petro M. (1988) Metaltramafity z oblasti Jasenie - Kyslá, Nízke Tatry. *Miner. Slov.* 20, 2, 143-148.
- Stevens G., Clemens J. D., Droop G. T. R. (1997) Melt production during granulite-facies anatexis: experimental data from "primitive" metasedimentary protoliths. *Contrib. Mineral. Petrol.* 128, 352-370.
- Thompson A. B., Algor J. R. (1977) Model systems for anatexis of pelitic rocks. I. Theory of melting reactions in the system $\text{KAlO}_2\text{-NaAlO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. *Contrib. Mineral. Petrol.* 63, 247-269.
- Thompson A. B., Tracy R. J. (1979) Model systems for anatexis of pelitic rocks II. Facies series melting and reactions in the system $\text{CaO-KAlO}_2\text{-NaAlO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. *Contrib. Mineral. Petrol.* 70, 429-438.
- Vielzeuf D., Holloway J. R. (1988) Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic systems. Consequences for crustal differentiation. *Contrib. Mineral. Petrol.* 98, 257-276.
- Vielzeuf D., Montel J. M. (1994) Partial melting of metagreywackes. Part I. Fluid-absent experiments and phase relationships. *Contrib. Mineral. Petrol.* 117, 375-393.
- Vilinovičová L. (1990) Petrogenesis of gneisses and granitoids from the Strážovské Vrchy Mts. *Geol. Zbor., Geol. Carpath.* 41, 4, 335-376.
- Vojtko P., Janák M., Broska I. (2011) Thermodynamic modelling of P-T conditions in staurolite-bearing metapelites of the Malé Karpaty Mts. In: *Zbor. Petros, Univerzita Komenského v Bratislave*, 60.
- Wang D., Shu L. (2012) Late Mesozoic basin and range tectonics and related magmatism in Southeast China. *Geosci. Front.* 3, 109-124.
- White R. W., Powell R., Holland T. J. B. (2001) Calculation of partial melting equilibria in the system $\text{Na}_2\text{O-CaO-K}_2\text{O-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (NCKFMASH). *J. metamorphic Geol.* 19 (2), 139-153.