

# Stanovenie $P$ – $T$ podmienok vzniku margaritu a pumpellyitu-(Al) v metamorfovaných horninách Malej Magury (Strážovské vrchy)

Štefan Čík & Igor Petřík

Geologický ústav, Slovenská akadémia vied, Dúbravská 9, 840 05 Bratislava; geolcist@savba.sk, igor.petrik@savba.sk

## AGEOS Determination of $P$ – $T$ conditions of margarite and pumpellyite-(Al) origin in metamorphic rocks of the Malá Magura (Strážovské vrchy Mts.)

**Abstract:** Margarite and pumpellyite-(Al) are relatively rare minerals in metamorphic and granitic rocks of the Western Carpathians. In this paper we present a description, interpretation and calculation of  $P$ – $T$  conditions of margarite and pumpellyite-(Al) formation, recently found in migmatite and gneiss from the Tatric crystalline basement of Malá Magura Mts. (Strážovské vrchy Mts.). Using Thermocalc, with primary assemblage, the  $P$ – $T$  conditions were calculated and yielded the following values:  $T = 668$ – $782$  °C,  $P = 550$ – $740$  MPa. Peak metamorphic conditions for pseudosections (PERPLEX) gave intervals of  $T = 670$ – $765$  °C, and  $P \sim 600$ – $820$  MPa. From the  $P$ – $T$  reaction curves the conditions of low grade metamorphism were estimated for migmatite MM-1, the low grade metamorphism at  $T = 480$  °C and  $P = 460$  MPa, and for the gneiss the low grade conditions in gneiss MMC-10 at about  $300$  °C and  $P = 300$  MPa. The data obtained for metamorphic conditions are interpreted as probable result of Variscan retrogression. The low  $T$  obtained for gneiss with pumpellyite is most probably due to an Alpine overprint.

**Key words:**  $P$ – $T$  conditions, margarite, pumpellyite-(Al), metamorphic rocks, migmatites, Strážovské Vrchy Mts, Western Carpathians, Slovakia

### 1. ÚVOD

Pumpellyit je indexový minerál prehnitovo-pumpellyitovej fácie metamorfózy (Coombs et al., 1976; Frey et al., 1991; Dray & Springer, 2005). Horná hranica jeho stability sa kladie medzi  $250$ – $350$  °C a  $300$ – $800$  MPa. Maximálne rozšírenie dosahuje prehnitovo-pumpellyitová fácia v rozsahu teplôt  $175$ – $280$  °C a tlakov  $50$  až  $450$  MPa (Frey et al., 1991).

Kryštalochémii a nomenklatúre pumpellyitu sa venovali napr. Passaglia & Gottardi (1973) a Yoshiasa & Matsumoto (1985). Margarit je stabilný v asociácii s kremeňom v  $P$ – $T$  poli v rozsahu od  $300$  do  $560$  °C a do  $860$  MPa, hranica poľa stability asociácie margarit + kremeň je ovplyvňovaná aj aktivitou vody: čím je aktivita vody nižšia, tým je pole stability menšie. Pri vyšších  $P$ – $T$  podmienkach (nad  $560$  °C a od  $860$  MPa) je asociácia margarit + kremeň nahradená asociáciou zoisit + kyanit (Chatterjee, 1976).

V kryštaliniku Západných Karpát sú margarit a pumpellyit-(Al) z metamorfovaných hornín pomerne málo opísané minerály. Obidva si vyžadujú zvýšené obsahy Ca, preto boli doteraz známe hlavne z hornín bázickejšieho charakteru (Kováčik, 1996, 2011). Výskyt margaritu v metamorfovaných horninách Západných Karpát je známy napr. migmatitoch Vysokých Tatier, kde ho opísal Janák et al. (1988) a kde vzniká na úkor kyanitu, pričom vápnik potrebný pre margarit pochádza z plagioklasu. Podobne aj v ortorule severného veporika margarit vznikol na úkor kyanitu a plagioklasu (Michálek & Putiš, 2009). Margarit opísali

aj Faryad & Dianiška (1992) v horninách pelitického zloženia z vrhu SG-1, kde vznikol premenou andaluzitu a nájdený bol v Ca-skarne na lokalite Zlatno pri Hodruši–Hámroch, kde sa vyskytuje spolu s anhydritom a kalcitom (Kúšik, 1992). Novšie bol margarit opísaný aj z chloritoidovo-kyanitových bridlic východného veporika (Bukovská et al., 2013).

Pumpellyit-(Mg) je v Západných Karpatoch známy z lokality Poprad–Kvetnica a to v puklinách bazaltov v asociácii s kalcitom, epidotom a s Cu-sulfidmi (Vrána, 1966). Z granodioritov a rúl opísali Spišiak & Pitoňák (1993) pumpellyit ako produkt premeny plagioklasu a biotitu, kde zdroj Ca pochádza z plagioklasu An<sub>50</sub> a Mg, Fe z biotitu. Našiel sa tiež v asociácii s amfibolom a stílnomelánom z metagabra v okolí Ostrej pri Hnúšti a určený bol ako pumpellyit-(Fe<sup>2+</sup>) a mladší pumpellyit-(Mg) (Radvanec, 1999). Na základe minerálnej asociácie s pumpellyitom v tonalite z Malej Fatry stanovili (Faryad & Dianiška, 2003) stupeň alpínskeho tektono-metamorfizmu na cca  $300$  MPa a  $300$  °C. Pumpellyit-(Mg) sa vyskytuje v metamorfovaných ultrabázikách v okolí Dobšinej–Danková a pri Jaklovciach (Radvanec, 2005). Nachádza sa aj v biotiticko-amfibolitických rulách a amfibolitoch v oblasti Račkovej doliny (Západné Tatry), kde bol opísaný ako pumpellyit-(Al), ale miestami sa tu vyskytuje aj pumpellyit-(Fe<sup>2+</sup>) a (Mg) (Kováčik, 2011).

Horniny z kryštalinika Strážovských vrchov študovali Dyda (1988) a Viliňovičová (1990), ktorí sa venovali rulám, migmatitom i granitoidom. V pararulách a migmatitoch je prevažne zastúpený plagioklas, biotit a kremeň, v malej miere je zastúpený

tiež muskovit. Z akcesorických minerálov prítomných v metapelitoch je to granát, staurolit alebo sillimanit, tiež drobný zirkón, ilmenit, rutil a apatit (Dyda, 1988). Granitoidy sú špecifické hojným sillimanitom a výskytom granátu spolu s biotitom (Viliničová, 1990).

V tejto práci predkladáme opis a interpretáciu margaritu a pumpellyitu-(Al) z kryštalinika Strážovských vrchov, odkiaľ je nález ich prvým výskytom v tomto pohorí. Obidva minerály sa vyskytujú vo vysoko-metamorfovaných horninách (ruly, migmatity). Výskyt margaritu a pumpellyitu v rulách a migmatitoch umožňuje odhad P–T podmienok počas retrográdnej, prípadne nízko stupňovej metamorfózy.

## 2. GEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA STRÁŽOVSKÝCH VRCHOV

Pohorie Strážovské vrchy je budované kryštalickejšími horninami s mezozoickými sedimentami (malomagurská obalová sekvencia) tatrickej jednotky, pričom najväčšia časť pohoria je tvorená krížňanským príkrovom (fatrikum), ten je najrozsiahlejšou jednotkou pohoria, manínskym a chočským príkrovom. V Strážovských vrchoch sú prítomné aj paleogénne jednotky (Centrálno-karpatská paleogénna panva a paleogénne usadeniny pribradlovej zóny) a výplň okolitých kotlín je okrem paleogénnych sedimentov tvorená aj neogénnymi a kvartérnymi uloženinami. Kryštalinikum vystupuje v podobe dvoch jadier: Suchého a Malej Magury, tvoria ho metamorfované horniny hlavne charakteru metapelitov a niekoľko typov peralumíniových granitoidných

hornín (Maheľ, 1983, 1985; Dyda, 1988; Viliničová, 1990). Migmatity a ruly, v ktorých sa vyskytuje margarit a pumpellyit sa doteraz našli len v kryštalickejšími jadre Malej Magury. Obe jadrá majú zonálnu stavbu, stupeň metamorfózy rastie smerom od okrajov k centru ako to dokumentuje postupnosť hornín: ruly, metatexity, diatexity (hybridné granitoidy) a vo vrcholových častiach dominujú pegmatoidné granity a aplity (Korikovskij et al., 1987). V kryštaliniku Suchého prevládajú metamorfované horniny, v Malej Magure sú v prevahe granitoidy a pegmatity (Obr. 1), ktoré často prstovito injektujú okolité metamorfované horniny a migmatity (Kahan, 1979; Viliničová, 1990; Čík & Petrik, 2012). Litologické prechody od metamorfovaných hornín po granitoidy sú pre kryštalinikum Strážovských vrchov charakteristické (Kahan, 1979; Maheľ, 1983, 1985).

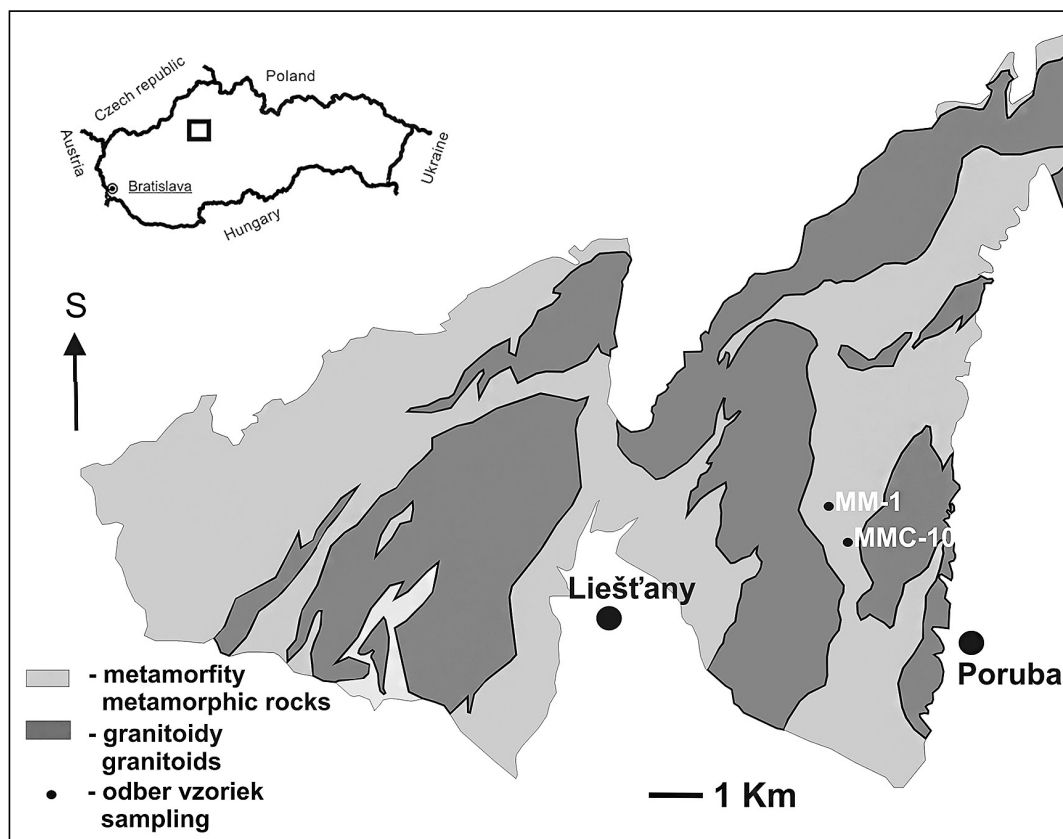
## 3. METÓDY VÝSKUMU

Chemické zloženie minerálov bolo stanovené vlnovo disperznou analýzou na elektrónovom mikroanalyzátore Cameca SX100 (Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava) za podmienok: urýchľovacie napätie 20 kV pre granát, pre ostatné minerály 15 kV, priemer elektrónového lúča 3–10  $\mu\text{m}$ , štandardy: K – ortoklas, Na – albit, Si a Ca – wollastonit, Al –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Mg – MgO, Fe – hematit a Ti –  $\text{TiO}_2$ .

Pre výpočty priesečníkov reakcií a P–T polí stabilit minerálnych asociácií (pseudorezy) sme použili balík petrologických softvérov PERPLEX 6.6.8 (Connolly & Kerrick, 1987; Connolly & Petrin, 2002; Connolly, 2009) a Thermocalc 3.31

Obr. 1. Zjednodušená geologická mapa kryštalinika Strážovských vrchov s lokalizáciou študovaných vzoriek, upravené podľa Maheľ et al. (1982).

Fig. 1: Simplified geological map of the crystalline basement of the Strážovské vrchy Mts. with localization of the studied samples, adapted according to Maheľ et al. (1982).



Tab. 1. Modálne analýzy vzoriek MM-1 a MMC-10.

Tab. 1. Modal analyses of samples MM-1 and MMC-10.

Vzorka/Sample	Qtz (%)	Pl (%)	Kfs (%)	Ms (%)	Bt (%)	Ap (%)	Grt (%)	Sil (%)
MM-1	37,25	37,90	5,30	4,35	5,75	0,20	2,25	7,00
MMC-10	27,75	42,80	15,25	4,80	8,65	0,40	0,25	0,10

Tab. 2. Celohorninové analýzy študovaných vzoriek MM-1 a MMC-10 (hmot. %) vypočítané z modálneho zloženia (bodovej planimetrie) s využitím softvéru MBC 1.7 (Abu-Alam &amp; Stüve 2009), FeO je celkové.

Tab. 2. Bulk rocks analyses (wt. %) of metamorphic rocks (MM-1 a MMC-10) calculated in from modal compositions (point planimetry) using software MBC 1.7 (Abu-Alam &amp; Stüve 2009), FeO is total Fe.

Vzorka/Sample	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
MM-1	68,00	18,72	3,06	0,08	1,08	1,52	2,62	3,77	1,55
MMC-10	64,78	18,01	3,65	0,03	1,47	2,98	2,39	4,67	2,01

(Holland & Powell, 1998). Výpočty monovariantných reakcií sa robili v režimoch: calculations on all reactions between end-members a Average P-T. Thermocalc verziu 3.31 sme použili, pretože využíva termodynamickú databázu ts55 (Holland & Powell, 1998), ktorá obsahuje pumpellyit. Pri výpočte pseudorezov sa použili modely minerálov: granát – Gt(GCT) (Ganguly et al., 1996), muskovit – Pheng (HP) (Holland & Powell, 1998), biotit – TiBio(HP) (Holland & Powell, 1998), pre K-živcov model San(TH) (Thompson & Hovis, 1979), plagioklas model Pl (h) (Newton et al., 1980), margarit model MaPa (Holland & Powell, 1998), pumpellyit Pu(M) model (Massonne & Willner, 2008) a model taveniny – melt (HP) (Ghiorso et al., 2002). Výpočty izolínii obsahu prvkov v granátoch boli získané softvérom Werami (PERPLEX) a grafické zobrazenie pomocou programu Pywerami od O. Lexu (<http://petrol.natur.cuni.cz/~ondro/home>).

Pretože neboli k dispozícii celohorninové analýzy, chemické zloženie vzoriek potrebné na výpočet pseudorezov sme získali výpočtom z modálnej analýzy (planimetria v rozsahu 2000 bodov, tab. 1) z výbrusov s využitím softvéru MBC 1.7 (Abu-Alam & Stüve, 2009). Vypočítané analýzy sú v tab. 2. Skratky minerálov použité v tejto práci sú podľa (Whitney & Evans, 2010). Pri nedostatku vhodného neideálneho modelu aktivita – zloženie aktivity pumpellyitu  $[(Ca_4MgAl_5Si_6O_{21}(OH)_7, ds_{55}, Holland \& Powell, 1998]$  sa vypočítalo s predpokladom ideálneho zmiešavania:  $a_{ideal} = XMg(XCa)_2$  (Tab. 3b). Modálne množstvo margaritu a pumpellyitu sme nepočítali, pretože ich obsahy sú výrazne pod 0,1 obj. %.

#### 4. PETROGRAFICKÝ OPIS A LOKALIZÁCIA VZORIEK

Vzorky sme odobrali z tých miest (Obr. 1, dolina Poruby), kde granitoidy intenzívne injektujú metapelite, miestami možno pozorovať plynulý prechod od ruly cez migmatitovanú rulu, migmatit, hybridný granit až po granit (Obr. 2a–c). Metamorfované horniny – metapelite asociujúce s peraluminiovými granitoidmi tu vystupujú v podobe väčších i menších odkryvov

a zárezov lesných ciest. Na niektorých miestach (okraji telesa) sú metapelite, migmatity a granitoidy silne postihnuté krehkou deformáciou. Priamo v miestach odberu vzoriek (dolina Poruby, Malá Magura) leukokratiné granitoidné žily a pegmatity injektujú okolité metamorfované horniny (Obr. 2a–c). Podrobne boli študované tieto vzorky: biotitická až dvojsludná rula MMC-10, GPS súradnice: 48°50'39"N a 18°32'52"E; migmatit (metatexit) MM-1, GPS súradnice: 48°51'10"N a 18°32'26"E (Obr. 1).

Stromatitický migmatit MM-1 je rovnomerne páskovaný, hrubozrnný, s približne rovnako zastúpeným paleosómom, mezosómom a melanosómom. Najhojnejšie minerály sú al-lotriomorfný, silne undulózný kremeň a plagioklas v približne rovnakých množstvách (Tab. 1). Plagioklas ( $An_{23-30}$ ) je hyp- až idiomorfný. Vzácný je hypidio- až alotriomorfný K-živcov, zriedkavo pertitický, lokálne zatláča zrná plagioklasu. Červenohnedý, hypidiomorfný biotit je drobný- až hrubolupenitý, miestami viac či menej zatláčaný muskovitom, inde rozsiahle chloritizovaný. Drobný idiomorfný muskovit v kontakte s biotitom a granátom je pravdepodobne sekundárny. Z akesorii je najdôležitejší sillimanit (v hornine dosahuje množstvo vedľajšieho minerálu), tvorí väčšie chumáčovité agregáty, alebo hrubšie tyčinkovité zrná často zatláčajúce biotit alebo je sillimanit prerastený s biotitom a muskovitom. Pomerne častý je veľký idiomorfný granát (3 mm), po puklinách chloritizovaný, často v asociácii s kremeňom, plagioklasom, sillimanitom a biotitom. Hojný je dlho prizmatický až oválny apatit s lokálne výrazným pleochroizmom, ktorý tvorí zväčša inklúzie v plagioklase, zriedkavo v biotite. Častý opakný minerál je pyrit, sprevádzaný zriedkavejším ilmenitom, obidva zväčša prerastajú s biotitom. Vzácné sa vyskytujúci margarit prerastá so sillimanitom v asociácii s plagioklasom, biotitom, muskovitom alebo K-živcom (Obr. 2d,e).

Rula MMC-10 je monotónna, jemnozrnná hornina s výraznou prevahou plagioklasu nad kremeňom (Tab. 1), plagioklas ( $An_{30-32}$ ) je hyp- až idiomorfný, lokálne slabo zatláčaný sericitizáciou. K-živcov je nepravidelne rozptýlený, zväčša je v podobe väčších alotriomorfných zrn, ktoré prerastajú s kremeňom. Rozptýlený, hypidiomorfný hnedočervený biotit tvorí zväčša väčšie lupene, ktoré sú lokálne zatláčané a presekávané druhotným

muskovitom, zriedka je čiastočne chloritizovaný, alebo úplne muskovitizovaný. Zriedkavejší muskovit je hypidiomorfný, priečne lupeňovitý a jeho sekundárne lupene zatláčajú lokálne biotit. Akcesórii je málo, prítomný je drobný oválny apatit, idiomorfný granát (1 mm v priemere) a veľmi zriedkavý je sillimanit v podobe drobných ihličkovitých zvyškov v muskovite. Vzácné sa vyskytujúci pumpellyit-(Al) sa nachádza buď v granáte spolu s chloritom (Obr. 2f, g), alebo jeho zrná po trhlinách vchádzajú do biotitu v podobe úzkych podlhovastých zŕn v asociácii s epidotom, plagioklasom, muskovitom a kremeňom (Obr. 2h).

## 5. CHARAKTERISTIKA PUMPELLYITU-(AL) A MARGARITU

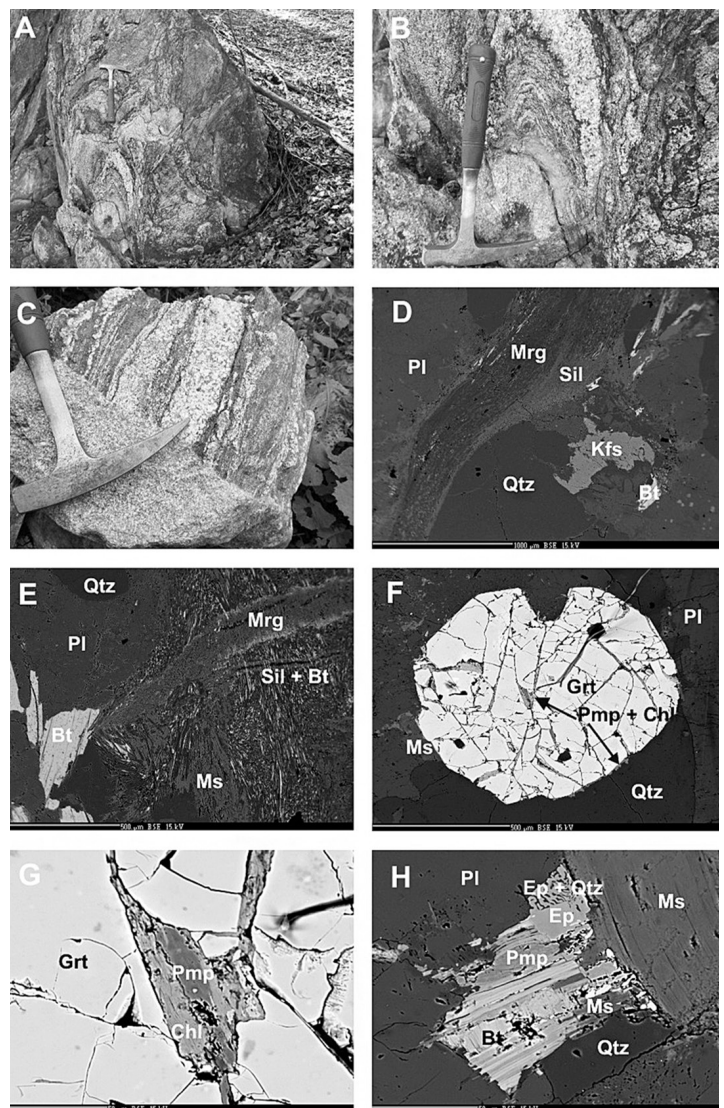
V migmatite MM-1 sme identifikovali Ca-sľudu, margarit (Obr. 2d,e) a v rúle MMC-10 pumpellyit-(Al) (Obr. 2f–h, 3), metamorfné minerály vhodné na odhad *P–T* podmienok retrográdnej či nízko stupňovej metamorfózy. Pumpellyit je charakteristický minerál nízko stupňových metamorfovaných hornín,

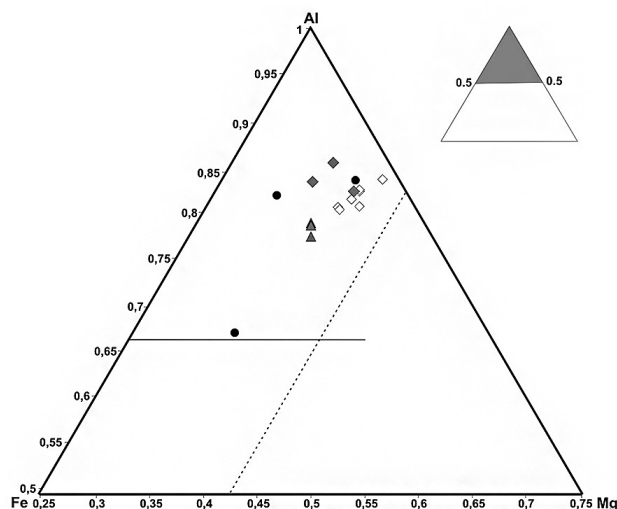
avšak pumpellyit-(Al) je stabilný aj pri vyšších tlakoch (Frey & Robinson, 1999). Pumpellyit-(Al) zo vzorky MMC-10 má zvýšené obsahy Al oproti Fe a Mg (Obr. 3, Tab. 3b) a klasifikoval sa podľa toho, kde spadali jeho chemické analýzy – hranice polí v diagrame Al-Fe<sub>tot</sub>-Mg sú podľa (Yoshiasa & Matsumoto, 1985), tiež má zároveň vysoký pomer Fe/(Fe + Mg) = 0,55–0,57 v porovnaní s pumpellyitom z rúl a granodioritu Nízkych Tatier (0,25–0,37, Spišiak & Pitoňák, 1993). Chemické zloženie analyzovaného pumpellyitu z Malej Magury plne zodpovedá pumpellyitu-(Al), ktorý ako nový minerál charakterizovali Hatert et al. (2007) s idealizovaným vzorcom Ca<sub>2</sub>AlAl<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)(Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)(OH,O)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O. Pri prepočte na 12,2 kyslíka (O = 11, OH = 2,4 pri obsahoch Fe + Mg ca. 0,6 apfu) si nevyžaduje dodatočný kyslík a len ca. 0,3 H<sub>2</sub>O pfu (pozri tab. 3b).

Margarit je textúrne neskorý, má miestami svetlý lem, tvorený biotitom s drobnými ihličkami sillimanitu a drobnými zrnami plagioklasu (Obr. 2e). Mikrosondové analýzy (Tab. 3c) ukázali, že obsahy Ti sú veľmi nízke, a z medzivrstvových katiónov je 75–80 % tvorených vápnikom a 15 % sodíkom. Obsah Fe a Mg je v margarite nízky (FeO do 0,26 a MgO do 0,23 hmot. %).

Obr. 2. A) Odkryv cca 3 km S od obce Poruba (Strážovské vrchy) tvorený rôznymi typmi migmatitov (nebulity, stromatity), rúl (kremité biotitické pararuly, biotitické až dvojsľudné pararuly s lokálnymi polohami pegmatitov), granitoidov (aplitické s granátmi, granodiority, pegmatitické), prítomný je aj granitický pegmatit. Granity prstovito injektujú okolité metamorfované horniny; B) detail aplitického granitu s granátom prerážajúceho okolitý migmatit; C) granodiorit preráža granitizovanú polohu v spodnej časti s mezosomom a vyššie polohou aplitického granitu s granátmi. Od okrajov po stred je vidieť litologický prechod od ruly (mezosom), cez migmatitizovanú rulu (metatexit), diatexit až po granit; D) vzorka MM-1 v BSE: margarit zatláča sillimanit a čiastočne aj plagioklas v asociácii s kremeňom, K-živcom a biotitom; E) vzorka MM-1 v BSE: margarit preráža prerast sillimanitu s biotitom v asociácii s plagioklasom, kremeňom, K-živcom, biotitom a muskovitom; F) MMC-10 v BSE: pumpellyit-(Al) s chloritom v granáte a na jeho okraji s muskovitom, plagioklasom a kremeňom; G) detail F; H) MMC-10 v BSE: pumpellyit-(Al) s epidotom v biotite v asociácii s plagioklasom, muskovitom a kremeňom.

Fig. 2. A) An outcrop cca 3 km N from the Poruba village (Strážovské vrchy Mts.) displays migmatites (nebulitic, stromatitic), gneiss, granitoids, and granitic pegmatite. Metamorphic rocks and granitic rocks show mutual intergrowths; B) Detail of garnet-bearing aplitic granite swelling within metatectic migmatite; C) There is a smooth lithological transition from metamorphic rocks (mezosome gneiss) through metatexite, diatexite to granite; D) Gneiss MM-1: margarite replaces sillimanite and partially plagioclase, the association is quartz, K-feldspar, and biotite; E) Migmatite MM-1: margarite replaces sillimanite with the same assemblage and muscovite; F) Gneiss MMC-10: pumpellyite-(Al) with chlorite in garnet cleavage and on the edge in association with muscovite, plagioclase, and quartz; G) Detail of the previous image F; H) Gneiss MMC-10: pumpellyite-(Al) with epidote on biotite in association with plagioclase, muscovite, and quartz. Figures D–H are in BSE.





Obr. 3. Zloženie pumpellyitov v diagrame Fe-Al-Mg (apfu), Fe je Fe celkové železo. Legenda: sivé trojuholníky – pumpellyit z Malej Magury (táto práca), biele kosoštvorce – pumpellyit z granodioritu podľa Spišiaka & Pitoňáka (1993), čierne krúžky – pumpellyit z vápenato-silikátových hornín Považského Inovca (Kováčik, 2011), sivé kosoštvorce – pumpellyit z vápenato-silikátových hornín Malých Karpát (Kováčik, 2011).

Fig. 3. Pumpellyite compositions in Fe-Al-Mg diagram (apfu), Fe total Fe as Fe<sup>2+</sup>. Legend: grey triangles – pumpellyite from the Malá Magura core (this study), white diamonds – pumpellyite from granodiorite (Spišiak & Pitoňák, 1993), black dots – pumpellyite from calc-silicate rocks of the Malé Karpaty Mts. (Kováčik, 2011).

## 6. VÝSLEDKY ŠTÚDIA TERMOBAROMETRIE

Vzorky metamorfovaných hornín Malej Magury (dolina Poruba) vďaka prítomnosti vhodnej minerálnej asociácie umožnili výpočet  $P$ - $T$  podmienok nízko aj vysoko stupňovej metamorfózy a odhad  $P$ - $T$  metamorfného trendu. Pri výpočtoch je základným predpokladom rovnováha medzi fázami v reakciách (cf. Holland & Powell, 1998). Rovnovážny princíp sme aplikovali aj na minerály migmatitov s obsahom leukosómu (pôvodne taveniny); sú to reakcie medzi už vykryštalizovanými fázami (Grt, Bt, Ms, Sil a Pl), ktorých priesečníky dávajú  $P$ - $T$  podmienky. Kryštalizačné teploty (reakcie medzi fázou a taveninou) museli byť vyššie. Biotit použitý na termobarometrické výpočty má zvýšené obsahy Fe, čo je pre metapelity a migmatity charakteristické, granát v študovaných vzorkách je takmer homogénny so zložením od  $Sps_{0,07}Prp_{0,15}Alm_{0,73}Grs_{0,03}$  po  $Sps_{0,12}Prp_{0,11}Alm_{0,73}Grs_{0,03}$  resp.  $Sps_{0,09}Prp_{0,15}Alm_{0,71}Grs_{0,01}$ . Neznášanost granátu je zrejma podľa orientačného RTG mapovania, BSE snímkovania (Obr. 2f), ako aj chemických analýz. Homogénnosť granátov v rámci vzorky umožnila, aby boli vybraté len reprezentatívne chemické analýzy granátu pre každú vzorku (Tab. 3a). Muskovit a plagioklas ( $An_{22-28}$ ) sú tiež takmer homogénne (rozdiel v jednotlivých vzorkách medzi jadrom a krajom zrn je zanedbateľný), muskovit má nízke obsahy Fe (0,06–0,13 apfu), plagioklas má mierne zvýšené Al (1,20–1,26 apfu), ale hlavne zvýšené Na (0,72–0,82 apfu) a Ca (0,22–0,28 apfu) a znížené Si (2,72–2,77 apfu) (Tab. 3a).

### 6. 1. Vysokostupňové $P$ - $T$ podmienky

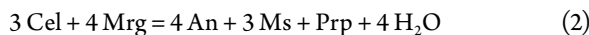
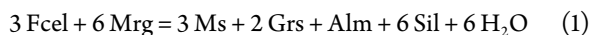
Asociácia minerálov v rule aj migmatite: Bt, Ms, Sil, Grt a Pl indikuje dosiahnutie vysokostupňových podmienok, avšak ich výpočet nie je predmetom tejto práce. Podrobnosti výpočtov sú v práci Čík & Petřík (2012), tu uvádzame len hlavné výsledky v kontexte s nízko stupňovými  $P$ - $T$  podmienkami.

Pre migmatit MM-1 sme získali priesečník reakcií pri  $T = 782$  °C (elipsa 3 na obr. 4b) a  $P = 740$  MPa. Avšak chybová elipsa pre migmatit v rozsahu  $\pm 53$  °C a  $\pm 170$  MPa naznačuje pomerne značnú neistotu získanej teploty a tlaku (Tab. 4). Priesečník pre rulu MMC-10 pri 668 °C a 550 MPa má rovnakú chybu pre teplotu:  $\pm 53$  °C, menšiu pre tlaky:  $\pm 120$  MPa. Metamorfné podmienky získané výpočtom pseudorezov pre migmatit MM-1 sú v intervale teplôt od 670 po 760 °C a tlakov od 690 po 740 MPa. Výpočty boli robené za podmienok nasýtenia  $H_2O$ . V prípade ruly MMC-10 sú metamorfné podmienky od cca 700 po 770 °C a 670 až 820 MPa (Obr. 4c), obe stanovené  $P$ - $T$  polia (pseudorez a priesečníky reakcií) sa prekrývajú (elipsy A a B).

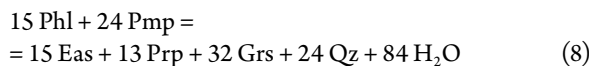
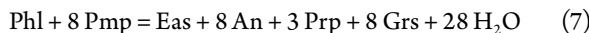
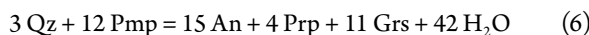
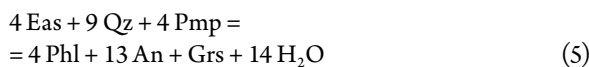
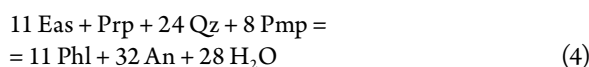
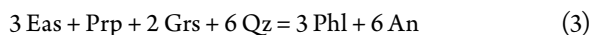
### 6. 2. Nízko stupňové podmienky

Tlak a teplotu reakcií minerálnych asociácií s Mrg a Pmp vo vzorkách sme vypočítali v režime *All reactions between end-members*, Thermocalc 3.31. Na základe výpočtov sme získali priemety  $P$ - $T$  monovariantných kriviek z vygenerovaných reakcií (Obr. 4b, c):

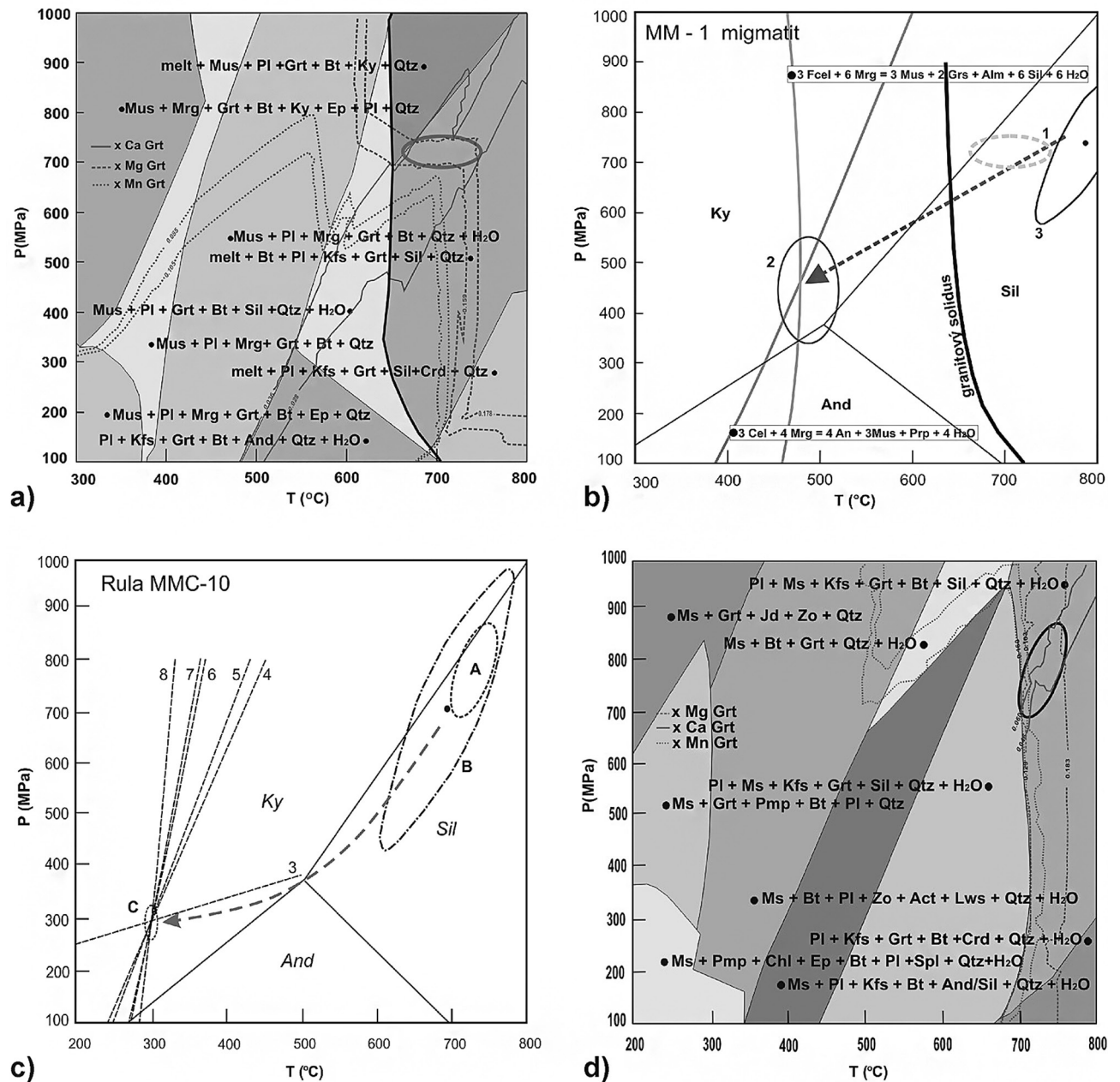
Migmatit MM-1:



Rula MMC-10 (Obr. 4c):



Reakcie (1, 2) v migmatite MM-1 sa pretínajú pri teplote 480 °C a tlaku 460 MPa, reakcie (3–8) v rule MMC-10 dávajú priesečník pri teplote 300 °C a tlaku 290 MPa (použitie inej aktivity pumpellyitu len minimálne ovplyvní teplotu priesečníka, napr. pri nižšej  $a_{\text{pmp}} = 0,1$  leží priesečník pri  $T = 317$  °C a  $P = 300$  MPa).



Obr. 4. a) Polia stability rovnovážnych asociíí v pseudoreze migmatitu MM-1, legenda: elipsa – P–T pole vysokostupňovej metamorfózy vymedzené izolínami molárných zlomkov XMg, XCa v Grt; b) priesečník monovariantných reakcií margaritu porovnaný s P–T podmienkami vysokostupňových reakcií. 1 – P–T elipsa z obr. 4a; 2 – priesečník reakcií nízko stupňovej metamorfózy (Thermocalc calculations on all reactions between end-members), 3 – P–T elipsa priesečníka vysoko stupňových reakcií (Thermocalc), minerálna asociácia, v ktorej sa nachádza vypočítaná elipsa z obr. 4a: tavenina + Bt + Pl + Kfs + Grt + Sil + Qtz; c) – priesečník reakcií pumpellyitu (Thermocalc), legenda: A – pole z obr. 4d; B – P–T elipsa priesečníka reakcií vysoko stupňovej metamorfózy (Thermocalc); C – P–T priesečník reakcií nízko stupňovej metamorfózy (Thermocalc), reakcie 3–8 vysvetlenie v texte. d) – pseudorez z vzorky ruly MMC-10, elipsa: P–T pole vysokostupňovej metamorfózy vymedzené na základe molárných zlomkov XMg, XCa, XMn granátu. Minerálna asociácia:  $\text{Pl} + \text{Ms} + \text{Kf} + \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Sil} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ .

Fig. 4. a) Stability fields of equilibrium assemblages in pseudosection of migmatite MM-1, legend: ellipse – P–T field of high-grade metamorphic reactions based on isolines of molar fractions XMg, XCa in Grt; b) intersection of monovariant reactions of margarite compared with high-grade P–T conditions. Legend: 1 – P–T ellipse from Fig. 4a; 2 – intersection of low-grade reactions (Thermocalc calculations on all reactions between end-members); 3 – P–T ellipse of high grade metamorphic reactions (Thermocalc), mineral assemblages in which the ellipse is calculated from Fig. 4a: melt + Bt + Pl + Kfs + Grt + Sil + Qtz; c) intersection of pumpellyite reactions (Thermocalc), legend: A – P–T field from Fig. 4d; B – P–T intersection of high-grade reactions (Thermocalc); C – P–T intersection of low-grade reactions (3–8, see text) (Thermocalc); d) pseudosection of gneiss MMC-10, ellipse: P–T field of high-grade metamorphism based on molar fractions isolines XMg, XCa in Grt, mineral assemblage:  $\text{Pl} + \text{Ms} + \text{Kf} + \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Sil} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ .

3 a)	MMC-10	MM-1	MMC-10	MM-1	MMC-10	MM-1	MMC-10	MM-1
	Bt	Bt	Ms	Ms	Grt	Grt	Pl	Pl
SiO <sub>2</sub>	35,71	34,7	46,76	45,75	36,56	36,92	61,70	63,13
TiO <sub>2</sub>	1,39	2,66	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,22	19,21	35,12	35,64	21,08	21,19	24,30	23,27
FeO	21,11	21,14	2,32	1,04	32,15	33,45	0,05	0,00
MnO	0,16	0,21	0,01	0,00	5,48	2,96	0,05	0,00
MgO	8,88	7,83	0,37	0,81	3,56	3,93	0,00	0,10
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,23	0,56	0,40	0,20	0,00	9,23	9,58
CaO	0,05	0,03	0,01	0,03	1,40	1,15	5,90	4,53
K <sub>2</sub> O	9,49	9,28	10,54	10,63	0,00	0,00	0,07	0,42
H <sub>2</sub> O	3,93	3,93	4,50	4,52	0,00	0,00	0,00	0,00
Spolu/Total	98,95	99,32	100,20	98,87	100,45	100,74	101,43	101,10
prep. na/calc. to	11(O)	11(O)	11(O)	11(O)	12(O)	12(O)	8(O)	8(O)
Si	2,75	2,67	3,11	3,07	2,92	2,96	2,72	2,77
Al <sup>IV</sup>	1,25	1,33	0,89	0,93	0,08	0,04	1,26	1,20
Pozícia/Position x	4	4	4	4	3	3	3,98	3,97
Al <sup>VI</sup>	0,40	0,41	1,86	1,89	1,90	1,97	0,00	0,00
Ti	0,08	0,15	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
Fe <sup>2+</sup>	1,36	1,36	0,13	0,06	2,14	2,24	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
Mn	0,01	0,01	0,00	0,00	0,37	0,20	0,00	0,00
Mg	1,02	0,89	0,04	0,08	0,42	0,47	0,00	0,00
Pozícia/Position y	2,87	2,83	2,03	2,03				
Na	0,00	0,04	0,07	0,05	0,03	0,00	0,79	0,82
Ca	0,01	0,00	0,00	0,00	0,12	0,09	0,28	0,22
K	0,93	0,91	0,89	0,91	0,00	0,00	0,00	0,02
Pozícia/Position z	0,94	0,95	0,96	0,96	0,15	0,09	1,07	1,06

Tab. 3.

a) reprezentatívne analýzy biotitu, muskovitu, granátu a plagioklasu z migmatitu MM-1 a ruly MMC-10;

b) reprezentatívne analýzy pumpellyitu-(Al) MMC-10 (Pmp);

c) reprezentatívne analýzy margaritu MM-1 (Mrg).

Tab. 3. a)  
Representative analyses of biotite, muscovite, garnet, and plagioclase from migmatite MM-1 and gneiss MMC-10;  
b) representative analyses of pumpellyite-(Al) (Pmp) MMC-10;  
c) representative analyses of margarite (Mrg) MM-1.

3 b)	1 Pmp	2 Pmp	3 Pmp
SiO <sub>2</sub>	37,71	37,80	37,09
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,01	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,65	25,92	25,27
FeO	5,29	4,91	4,87
MnO	0,22	0,19	0,11
MgO	2,44	2,26	2,05
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,05
CaO	23,00	22,87	22,91
H <sub>2</sub> O celk./total	5,69	5,71	5,70
Suma/Sum	100,00	99,67	98,05
O =	12,20	12,20	12,20
Si	2,994	3,003	3,003
Al M(1)	2,000	2,000	2,000
Al M(2)	0,400	0,427	0,412
Fe <sup>2+</sup>	0,351	0,326	0,330
Mg	0,289	0,268	0,247
Mn	0,015	0,013	0,008
Suma/Sum M(2)	1,055	1,033	0,996
Ca	1,957	1,947	1,988
Na	0,000	0,000	0,008
Suma/Sum	1,957	1,947	1,995
OH viazaná/bound OH	2,400	2,400	2,400
H <sub>2</sub> O voľná/free H <sub>2</sub> O	0,300	0,300	0,300
Aktivita/Activity	0,275	0,254	0,244

3 c)	Mrg 1	Mrg 2
SiO <sub>2</sub>	31,30	32,46
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49,32	49,13
FeO	0,26	0,25
MnO	0,00	0,04
MgO	0,15	0,23
Na <sub>2</sub> O	1,18	1,20
CaO	11,15	10,83
K <sub>2</sub> O	0,52	0,72
H <sub>2</sub> O	4,54	4,54
Spolu/Total	98,42	99,44
O =	22	22
Si	4,21	4,31
Al Pozícia/Position x Al okt.	3,79	3,68
	8	8
	4,02	3,99
Ti	0,00	0,00
Fe <sup>2+</sup>	0,03	0,02
Fe <sup>3+</sup>	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00
Mg	0,03	0,04
Pozícia/Position y	4,08	4,08
Na	0,31	0,31
Ca	1,60	1,54
K	0,09	0,12
Pozícia z/Position z	2,00	1,97
Aktivita/Activity	-	0,780

Tab. 4. Súhrn vypočítaných vysoko stupňových P–T podmienok vzoriek (MM-1 a MMC-10) (Thermocalc 3.31, average P–T).

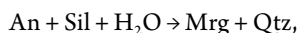
Tab. 4. Summary of P–T of conditions of high-grade metamorphic reactions form samples (MM-1 a MMC-10) (Thermocalc 3.31, average P–T).

vzorka :	T (°C)	T (odchýlka)	P (MPa)	P (odchýlka)	korelácia
MM-1	782	53	740	170	0,842
MMC-10	668	33	550	120	0,905

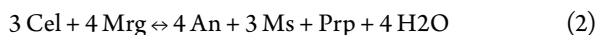
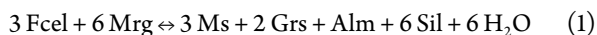
## 7. DISKUSIA

Margarit a pumpellyit-(Al) identifikované vo vysoko-stupňových horninách Malej Magury indikujú dva rôzne procesy. Minerál skupiny pumpellyitu identifikovaný ako pumpellyit-(Al), rovnako ako z niektorých ďalších lokalít Západných Karpát (Obr. 3). Margarit z migmatitu v doline Poruba pravdepodobne vznikol na úkor plagioklasu s príspevom sillimanitu alebo granátu (reakcie 1–2) podobne ako v metamorfovaných horninách Vysokých Tatier a Veporských vrchov, kde je však miesto sillimanitu stabilný kyanit (Janák et al., 1988; Michálek & Putiš, 2009). Na druhej strane, pumpellyit-(Al) mohol vzniknúť nahradením plagioklasu, s príspevom granátu a biotitu (reakcie 3–8). Podobne je interpretovaný pumpellyit z granitov a rúl z tatrckého kryštalinika Nízkych Tatier (Spišiak & Pitoňák, 1993). Z oblasti Západných Tatier je pôvod pumpellyitu interpretovaný z epidotu a plagioklasu, keď na ich úkor vznikali žilky so zložením pumpellyit + K-živce + kalcit. V metamorfovaných horninách Malých Karpát však pumpellyit spolu s prehnitom vznikol na úkor diopsidu. Pôvod pumpellyitu v tatrckej tektonickej jednotke Západných Karpát je vo všeobecnosti prisudzovaný alpínskej metamorfnej udalosti (Kováčik, 2011).

Pumpellyit z ruly MMC-10 vznikol pravdepodobne na úkor plagioklasu, biotitu, prípadne aj epidotu, ktoré boli zdrojom Ca, biotit bol zdrojom Mg a Fe. Chemické zloženie pumpellyitu-(Al) považujeme skôr za následok celohorninového zloženia (nahradenie plagioklasu, epidotu a biotitu) než zvýšeného tlaku. Neskôr mohol reagovať aj s niektorými zložkami granátu (Obr. 4c). Margarit z migmatitu vznikol pravdepodobne zo sillimanitu a plagioklasu:



neskôr mohol byť produktom hydratačných (retrogressných) reakcií (Thermocalc):



Na základe mikrotextrného pozorovania výbrusov a štúdie asociácie minerálov plagioklas, pumpellyit-(Al), margarit, granát, biotit, muskovit, sillimanit a kremeň usudzujeme, že minerálne reakcie (1–8) reálne aj prebehli. Zo získaných údajov vysokého a nízkeho stupňa metamorfózy sme odhadli metamorfne P–T trendy (Obr. 4b, c). Pseudorez pre migmatit MM-1 indikuje nižšie T hodnoty než dáva priesečník metamorfných reakcií (Obr. 4a), je to spôsobené pravdepodobne chemickým zložením granátu, z ktorého sa počítali jednotlivé zložky na odhad tlaku

a teploty. Na druhej strane, výpočet tlaku a teploty pre rulu MMC-10 získaný obidvomi metódami je podobný. Porovnanie migmatitu a ruly tiež ukazuje, že získané priesečníky vysoko stupňových reakcií z pseudorezov sú v hypersolidovej oblasti, v prípade migmatitu za prítomnosti taveniny. Absencia taveniny v rule za identických podmienok naznačuje jej refraktórnu povahu, jav typický pre migmatitové pásma Suchého a Malej Magury, kde sa dajú bežne pozorovať xenolity masívnych biotitických rúl (a amfibolitov) uprostred anatektických migmatitov (metatektitov). Dôvodom je pravdepodobne znížený obsah viazanej vody v rule.

Na základe termobarometrických odhadov sa vypočítali geotermické gradienty, ktoré sú pre migmatit MM-1 rovnaké pre vysoko- aj pre nízko-stupňovú metamorfózu a majú hodnotu 27–32 °C/km, pre rulu MMC-10 sú v rozsahu 26–30 °C/km pre nízko- aj vysoko-stupňovú metamorfózu. Obidva P–T trendy si teda vyžadujú približne rovnaké, pomerne vysoké gradienty typické pre varísky orogén. Naproti tomu gradient alpínskej metamorfózy ako bol odvodený vo veporiku je typicky podstatne nižší: 15–18 °C/km avšak pre prográdny metamorfizmus pri vyšších P–T hodnotách T = 450–600 °C a P = 600–1100 MPa (Jeřábek et al., 2008).

Odlišné P–T podmienky odvodené pre rovnovážne reakcie s margaritom a pumpellyitom: 480 °C pri 460 MPa pre margarit (migmatit) a 293 °C pri 300 MPa pre pumpellyit (rula) implikujú buď rozdielne metamorfne procesy vedúce k ich vzniku, alebo rozdielny stupeň zaznamenatej retrogresie jedného procesu. V migmatite MM-1 asociácia s margaritom naznačuje, že retrogressná etapa vývoja prebiehala do teplôt < 500 °C, naproti tomu asociácia s pumpellyitom v rule buď znamená, že retrogresia pokračovala do ešte podstatne nižších teplôt < 300 °C, alebo je výsledkom neskoršej (alpínskej) metamorfnej udalosti. Podobne bol interpretovaný vznik pumpellyitu v tonalite z kryštalinika Malej Fatry (Faryad & Dianiška, 2003), ktorý podľa nich vznikol počas alpínskeho tektono-metamorfizmu pri rovnakých P–T podmienkach (300 MPa a 300 °C). Predpokladáme, že rozdielny stupeň retrogresie odráža rozdielne teploty, pri ktorých zo systému unikli fluidá, agens metamorfných reakcií.

Ovodený vysoký gradient (27 °C/km) si vyžaduje prínos tepla, napr. horúcimi fluidami. V tatrckých jadrách je alpínske preteplenie typicky obmedzené na tektonické, často mylonitové zóny, ako to dokumentujú napr. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar veky svetlých slúd 71–63 mil. rokov zo strižnej zóny v tonalite z Tribeča (Kráľ et al., 2002) a mylonitové zóny so sericitom v Malej Fatre 72,4 ± 2,7 Ma (Hók et al., 2000, Ondrášik et al., 2009). Nami študovaná rula nie je z mylonitovej zóny a alpínske deformácie nie sú pre kryštalinikum Suchého a Malej Magury typické (Kahan, 1980). Novšie datovanie stôp po rozpade uránu (FT) z Malej Fatry však dali mladé veky aj zo základných typov granitoidov, medzi 145 až



45 Ma z lúčanskej časti (Danišík et al. 2010, 2012). FT datovanie zirkónov z kryštalinika susedného jadra pohoria Žiar ukázalo, že tento minerál zaznamenal preteplenie 210–310 °C pred ca. 100 Ma. Na základe toho sa predpokladá jeho pochovanie pod sústavu príkrovov (Danišík et al., 2008). Predbežné výsledky apatitových FT vekov z kryštalinika Malej Magury podporujú spodno- až stredno-miocénnu (~22–10 Ma) exhumáciu a poukazujú na výrazné variácie v rýchlosti ochladzovania kryštalinika (Marko et al., 2013). Podľa nového tektono-termálneho modelu vývoja tatrika (napr. Králiková et al. 2014) sa v prvom štádiu (90–75 Ma) dosiahlo preteplenie nad 300 °C (resetovanie FT vekov zirkónu) v regionálnom meradle, čo znamená, že mohlo byť zároveň zodpovedné za nízko- a stredne-temperatúrnú metamorfózu reprezentovanú vznikom asociácie s pumpellyitom v kryštaliniku Malej Magury. Eo-alpínsky vek týchto metamorfických reakcií však bude treba ešte potvrdiť datovaním svetlých slúd zo študovaných migmatitov a rúl  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  metódou, minerálnou Rb/Sr izochrónou, alebo FT metódou na zirkónoch.

## 8. ZÁVER

V metamorfovaných horninách kryštalinika Malej Magury (Strážovské vrchy) boli prvýkrát identifikované nízko- a stredne-temperatúrné metamorfické minerály, margarit a pumpellyit-(Al). Vysoko- a stredne-temperatúrné metamorfované horniny vznikali pri podobných P-T podmienkach ako s nimi asociujúce peraluminiové granitoidy (Čík & Petrik, 2012). Je pravdepodobné, že nielen migmatity, ale aj časť granitoidov vznikla lokálnym vytavením okolitých metamorfovaných hornín, teda že došlo ku taveniu *in situ*. Uprostred zóny parciálneho tavenia (metatektitov) sa zachovávajú relikty pararúl bez náznakov tavenia, kde však metamorfické asociácie so sillimanitom a granátom indikujú rovnaké P-T podmienky ako v migmatitoch. Taveniu pravdepodobne zamedzil nižší obsah voľnej vody a primárneho muskovitu.

Nižší stupeň metamorfózy skúmaných metapelitov je odlišný: zatiaľ čo v migmatite asociácia Mrg – Ms – Grt – Sil znamenala teplotu pod 500 °C, v rule metamorfická asociácia Bt – Pmp – Grt – Pl dáva teplotu ~ 300 °C. Obidve asociácie sú buď výsledok reakcií varískej retrográdnej metamorfózy, alebo asociácia s pumpellyitom-(Al) je výsledkom nezávislej (alpínskej) metamorfózy. Vzhľadom na nové FT datovania zirkónov z okolitých tatrických jadier je však pravdepodobné, že eo-alpínske preteplenie mohlo spôsobiť tiež vznik asociácie s pumpellyitom, zatiaľ čo asociácia s margaritom je dokladom varískej retrogresie.

*Podakovanie:* Práca vznikla v rámci projektov APVV-0080-11 a VEGA 2/0159/13. Autori ďakujú za cenné pripomienky a rady Dr. Mariánovi Janákovi z Geologického ústavu SAV, tiež Dr. Viere Kolárovej z GÚDŠ za objavenie a identifikáciu margaritu a pumpellyitu (Al). Petrovi Jeřábekovi a Martinovi Kováčikovi ďakujeme za kritické pripomienky, ktoré pomohli výraznému zlepšeniu článku.

## Literatúra

- Abu-Alam T.S. & Stüwe K., 2009: The MBC (1.7): A Visual Basic program to calculate bulk composition of rocks from chemistry and the volume proportions of the phases. *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, 155, 17.
- Bukovská Z., Jeřábek P., Lexa O., Konopásek J., Janák M. & Košler J., 2013: Kinematically unrelated C–S fabrics: an example of extensional shear band cleavage from the Veporic Unit (Western Carpathians). *Geologica Carpathica*, 64, 2, 103–116.
- Connolly J.A.D. & Kerrick D.M., 1987: An algorithm and computer program for calculating composition phase diagrams. *CALPHAD*, 11, 1–55.
- Connolly J.A.D. & Petrini K., 2002: An automated strategy for calculation of phase diagram sections and retrieval of rock properties as a function of physical conditions. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 7, 697–708.
- Connolly J.A.D., 2009: Physical contradictions and remedies using simple polythermal equations of state. *American Mineralogist*, 94, 11–12, 1616–1619.
- Coombs, D.S., Nakamura, Y., & Vaugnat, M., 1976: Pumpellyite actinolite facies schists of the Tavey Anne Formation near Loeche, Valais, Switzerland. *Journal of Petrology*, 17, 4, 440–471.
- Čík Š. & Petrik I., 2012: Asociácia biotit-granát-sillimanit v granitoch S-typu: P-T podmienky krystalizácie granitov Malej Magury bratislavského masívu a Považského Inovca (Slovenská republika). *Bulletin mineralogicko-petrologického Oddelení Národního Muzea*, 20, 2, 197–207.
- Danišík M., Kohút M., Dunkl I. & Frisch W., 2008: Thermal evolution of the Žiar Mountains basement (Inner Western Carpathians, Slovakia) constrained by fission track data. *Geologica Carpathica*, 59, 1, 19–30.
- Danišík M., Kohút M., Broska I. & Frisch W., 2010: Thermal evolution of the Malá Fatra Mountains (Central Western Carpathians): insights from zircon and apatite fission track thermochronology. *Geologica Carpathica*, 61, 1, 19–27.
- Danišík M., Kohút M., Evans N.J. & McDonald B.J., 2012: Eo-Alpine metamorphism and the “mid-Miocene thermal event” in the Western Carpathians (Slovakia) new evidence from multiple thermochronology. *Geological Magazine*, 149, 1, 158–171.
- Dyda M., 1988: Retrograde processes in paragneisses of the Suchý and Malá Magura Mts. *Geologický Zborník Geologica Carpathica*, 39, 2, 241–257.
- Dray H.W. & Springer R.K., 2005: The first appearance of actinolite in the prehnite-pumpellyite facies, Sierra Nevada, California. *Canadian Mineralogist*, 43, 89–104.
- Faryad S.W. & Dianiška I., 1992: Kyanite from Early Paleozoic rock of the Gemericum (Western Carpathians) and its implication for basic conditions of Variscian metamorphism. *Geologický Zborník Geologica Carpathica*, 43, 1, 199–201.
- Faryad S.W. & Dianiška I., 2003: Ti-bearing andradite-prehnite-epidote assemblage from the Malá Fatra granodiorite and tonalite (Western Carpathians). *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 83, 1, 47–56.
- Frey M. & Robinson D., 1999: Low-grade metamorphism. Blackwell Science, Oxford, 328 p.
- Ganguly J., Cheng W. & Tirone M., 1996: Thermodynamics of aluminosilicate garnet solid solution: new experimental data, an optimized model, and thermometric applications. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 126, 1–2, 137–151.
- Ghiorso M.S., Hirschmann M.M., Reiners P.W. & Kress V.C., 2002: The pMELTS A revision of MELTS for improved calculation of phase relations and major element partitioning related to partial melting of the mantle to 3 GPa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3, 5, 1–35.
- Hatert F., Pasero M., Perchiazzi N. & Theyle T., 2007: Pumpellyite (Al), a new mineral from Bertix, Belgian Ardennes. *European Journal of Mineralogy*, 19, 2, 247–253.

- Holland T.J.B. & Powell R., 1998: An internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16, 3, 309–343.
- Hók J., Siman P., Frank W., Král J., Kotulová J. & Rakús M., 2000: Origin and exhumation of mylonites in the Lúčanská Malá Fatra Mts., (the Western Carpathians). *Slovak Geological Magazine*, 6, 4, 325–334.
- Chatterjee N., 1976: Margarite stability and compatibility relations in the system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O as a pressure-temperature indicator. *American Mineralogist*, 61, 7–8, 699–709.
- Jeřábek P., Faryad W.S., Schulmann K., Lexa O. & Tajčmanová L., 2008: Alpine burial and heterogeneous exhumation of Variscan crust in the West Carpathians: insight from thermodynamic and argon diffusion modeling. *Journal of the Geological Society*, 165, 2, 479–498.
- Kahan Š., 1979: Geologické profily kryštalinikum Strážovských vrchov (Suchý a Malá Magura). In: Mahel M. (Ed.): Tektonické profily Západných Karpát. Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 87–115.
- Kahan Š., 1980: Strukturelle und metamorphe charakteristiken des kristallins des gebirges Strážovské vrchy (Suchý and Malá Magura). *Geologický Zborník Geologica Carpathica*, 31, 4, 577–601.
- Korikovsky S.P., Kahan Š., Putiš M. & Petřík I., 1987: Metamorfická zonalita v kryštalinikum Suchý i vysokotemperaturný avtometasomatism v glinozemistých granitach Strážovských gor. *Geologický Zborník Geologica Carpathica*, 38, 2, 181–203.
- Kováčik M., Král J., Maluski H., 1996: Alpínsky metamorfny termochronologický vývoj juhoveporických predalpínských metamorfítov. *Mineralia Slovaca*, 28, 3, 185–202.
- Kováčik M., 2011: Pumpellyite-prehnite mineral assemblage in Tatric basement and its relation to the Central Western Carpathian units. *Mineralia Slovaca*, 43, 3, 263–272.
- Králiková S., Vojtko R., Andriessen P., Kováč M., Fügenschuh B., Hók J. & Minár J., 2014: Late Cretaceous-Cenozoic thermal evolution of the northern part of the Central Western Carpathians (Slovakia): revealed by zircon and apatite fission track thermochronology. *Tectonophysics*, 615–616, 142–153.
- Král J., Hók J., Frank W., Siman P., Liščák P. & Jánová V., 2002: Shear deformation in granodiorite: Structural, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, and geotechnical data (Tribeč Mts., Western Carpathians). *Slovak Geological Magazine*, 8, 3–4, 235–246.
- Kúšik R., 1992: Mineralógia a genéza Cu porfýrového ložiska Zlatno v Štiavnických vrchoch. *Mineralia Slovaca*, 24, 1–2, 69–81.
- Janák M., Kahan Š. & Jančula D., 1988: Metamorphism of Pelitic Rocks and Metamorphic Zones in SW Part of Western Tatra Mts. Crystalline Complexes. *Geologický Zborník Geologica Carpathica*, 39, 4, 455–488.
- Mahel M., Kahan Š., Gross P. & Salaj J., 1982: Geologická mapa Strážovských vrchov. GÚDŠ, Bratislava, 1 vydanie.
- Mahel M., 1983: Vysvetlivky ku geologickej mape Strážovských vrchov v M 1:50 000. GÚDŠ, Bratislava.
- Mahel M., 1985: Geologická stavba Strážovských vrchov. GÚDŠ, Bratislava. 221 p.
- Marko F., Túnyi I., Andriessen P.A.M., Fojtiková L., Piovarčí M. & Králiková S., 2013: Carpathian Shear Corridor – a zone of blocks uplift, tilting, rotation and recent seismic activity (Western Carpathians). In: Broska I. & Tomašových A. (Eds.) Geological evolution of the Western Carpathians: new ideas in the field of inter-regional correlations. International conference organized at the occasion of 60<sup>th</sup> anniversary of the foundation of the Geological Institute, Slovak Academy of Sciences, Smolenice, Slovak Republic, October 16–19, 2013, Geological Institute, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, p. 56.
- Massonne H.J. & Willner A.P., 2008: Phase relations and dehydration behaviour of psammopelite and mid-ocean ridge basalt at very-low to low-grade metamorphic conditions. *European Journal of Mineralogy*, 20, 5, 867–879.
- Michálek M. & Putiš M., 2009: P-T vývoj ekologitického metabazitu a neoproterozoickej ortoruly vo fundamente severného veporika centrálnych Západných Karpát. *Mineralia Slovaca*, 41, 1, 1–22.
- Newton R.C., Charlu T.V. & Kleppa O.J., 1980: Thermochemistry of high structural state plagioclases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 7, 933–941.
- Ondrášik R., Putiš M., Gajdoš V., Sulák M. & Durmeková T., 2009: Blastomy-lonitovo-kataklazitové deformácie v Lúčanskej Fatre. *Mineralia Slovaca*, 41, 4, 395–406.
- Passaglia E. & Gottardi G., 1973: Crystal chemistry and nomenclature of pumpellyites and julgoldites. *Canadian Mineralogist*, 12, 3, 219–223.
- Radvanec M., 1999: Eklogitizované klinopyroxénové gabro s retrográdnou metamorfózou pumpellyitovo-aktinolitovej fácie na vrchu Babiná a Ostrá (gemerikum). *Mineralia Slovaca*, 31, 5–6, 467–484.
- Radvanec M., 2005: Prehnit-pyroxenit na lokalite Danková. *Mineralia Slovaca*, 37, 3, 353–357.
- Spíšiak J. & Pitoňák P., 1993: Pumpellyites from the Granodiorites and Gneisses of the Nízke Tatry Mts. Crystalline Complex. *Acta Geologica Universitatis Comenianae*, 49, 23–27.
- Thompson J.B. & Hovis G.L., 1979: Entropy of mixing in sanidine. *American Mineralogist*, 64, 1–2, 57–65.
- Vrána S., 1966: Pumpellyit form melaphyre rocks in Slovakia. *Časopis pro Mineralogii a Geologii*, 11, 255–261. (in Czech)
- Vilinočiová L., 1990: Petrogenesis of gneisses and granitoids from the Strážovské Vrchy Mts. *Geologický Zborník Geologica Carpathica*, 41, 4, 335–376.
- Whitney D.L. & Evans B.W., 2010: Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 1, 185–187.
- Yoshiasa A. & Matsumoto T., 1985: Crystal structure refinement and crystal chemistry of pumpellyite. *American Mineralogist*, 70, 11–12, 1011–1019.

**Summary:** The important low degree metamorphic minerals, margarite and pumpellyite-(Al) are relatively rare in metamorphic rocks of the Western Carpathians. In this study we present a description, interpretation and estimation of genesis of these minerals and P-T metamorphic conditions at which margarite and pumpellyite-(Al) were stable. The minerals were found in migmatite and gneiss from the crystalline basement of the Malá Magura Mts. (Strážovské vrchy Mts.). Pumpellyite-(Al) occurs in the form of small grains in garnet together with chlorite, or as narrow lenses in biotite. Margarite is associated with sillimanite, plagioclase, muscovite or K-feldspar. Thermobarometry of high grade metamorphic conditions are calculated from the assemblage Grt-Bt-Sil-Ms-Plg-Qtz using the database Holland & Powell (1998) – Thermocalc, 3.31, „average PT“. The calculations yielded the following values of high grade metamorphism: temperature 668–782 °C and pressure 550–740 MPa. The Variscan high grade metamorphism calculated by software PERPLEX 6.6.8 gave similar intervals for temperature 670–765 °C, and pressure ~ 600–820 MPa.

From the approximation of P-T univariant curves for low-grade metamorphism the conditions are estimated for migmatite (sample MM-1), at temperature of about 480 °C and a pressure of 460 MPa and for the gneiss (sample MMC-10) at about temperature 300 °C and a pressure 300 MPa. Whereas the low P-T conditions obtained for margarite assemblage are interpreted as the Variscan retrogression, the mineral assemblages with pumpellyite are considered most probably as an Alpine overprint.