

**Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta
Ústav Petrologie a Strukturní Geologie**

**Charles University, Faculty of Science
Institute of Petrology and Structural Geology**

Doktorský studijní program: Geologie
Doctoral study programme: Geology

Autoreferát disertační práce
Summary of the Doctoral thesis



Záznam před-exhumačního vývoje silně re-ekvilibrovaných vysoko- až ultra-vysokotlakých
hornin v kolizním orogénu

Tracing of the pre-exhumation history of strongly re-equilibrated high-ultrahigh pressure rocks
in a collision orogeny

Mgr. Radim Jedlička

Školitel/Supervisor: prof. Ing. Shah Wali Faryad, CSc.

Praha, 2017

Český abstrakt

Výzkum vysoko- až ultra-vysokotlakých hornin vyskytujících se v Českém masívu jako drobná tělesa uzavřená v okolních horninách s nízkým stupněm metamorfózy, byl vždy zaměřen na jejich hlavní metamorfnní vývoj v granulitové facii za velmi vysokých teplot. Avšak poslední studie ukázaly, že tyto horniny prodělaly vysokotlakou metamorfózu, jež předcházela pozdějšímu vysokoteplotnímu přetisku a následnému vynoření hornin na zemský povrch. Odborné vědecké publikace, z nichž se skládá tato disertační práce, prezentují petrologický, mineralogický a geochemický výzkum těchto (ultra)vysokotlakých hornin z různých částí Českého masívu, jež mají potenciál zachovat informace o jejich před-exhumační historii. Nálezy inkluzí vysokotlakých fází v metamorfnních minerálech a především studie zonality hlavních a stopových prvků v granátech nám společně s termodynamickým modelováním umožnily popsat nové teplotně-tlakové podmínky a zpřesnit metamorfnní dráhy těchto hornin.

Felsické a mafické granulity kutnohorské oblasti moldanubika a Rychlebských hor ve východních Sudetech zachovávají znaky prográdní metamorfózy. Vedle inkluzí fengitů a omfacitů v jádrech granátů se pak jedná o prográdní zonalitu hlavních a stopových prvků v granátech. Pomocí termodynamického modelování se podařilo vypočítat, že tyto horniny prodělaly komplexní metamorfnní vývoj od svého iniciálního stádia za nízkých teplot a tlaků (400-500 °C / 0.8-1.0 GPa) až po metamorfózu za ultra-vysokých tlaků v poli stability coesitu až diamantu. Tento prográdní vývoj proběhl za velice strmého geotermálního gradientu v prostředí subdukční zóny. Po částečném izobarickém vynoření hornin do úrovně svrchního pláště došlo k jejich výraznému zahřátí v podmínkách granulitové facie. Tato druhá metamorfnní událost je spjata s výstupem horkého plášťového magmatu, jež pronikal do rozhraní pláště a kůry díky odlomení části subdukované desky a také s pozdějšími variskými procesy.

Složení monominerálních a polyfázových inkluzí v granátech z eklogitů a klinopyroxenitů, jež tvoří polohy a budiny v granátických peridotitech moldanubické zóny, ukazuje na jejich původ těchto těles, jako na deriváty litosférického pláště nad subdukční zónou. Teplotně-tlakové podmínky, vypočítané díky zachovalé prográdní zonalitě granátů, naznačují, že vysokoteplotní přetisk těchto hornin v granulitové facii byl poměrně krátký, tudíž nedošlo k jejich výrazné modifikaci. Tato událost a především její krátkodobost je také zdokumentována v okolních felsických granulitech. Pravděpodobný výskyt subdukčního prostředí a části variské sutury v Českém masívu dokládají i tělesa eklogitů, jež se vyskytují v podobě 250 km dlouhého pásu táhnoucího se napříč moldanubikem od jihozápadu po severovýchod až do oblasti východních Sudet. Jejich texturní vztahy a teplotně-tlakové podmínky (600-650 °C / 2.3 GPa) nám umožňují určit, že tyto horniny prošly strmým termálním gradientem během prográdní metamorfózy. Tyto hypotézy jsou podloženy i nálezy vysokotlakých/nízkoteplotních amfibolů taramitického složení jako inkluzí v granátech.

English abstract

The investigation of high- to ultrahigh-pressure rocks in the Bohemian Massif occurring as small bodies enclosed in surrounding rocks with a low degree of metamorphism was always focused on their main metamorphic event in granulite facies conditions at very high temperatures. However, recent studies have shown that these rocks underwent a high-pressure metamorphism that preceded the subsequent high-temperature overprint and exhumation of those rocks. The scientific publications that comprise this dissertation thesis present petrological, mineralogical and geochemical research of these (ultra)high pressure rocks from various parts of the Bohemian Massif that have the potential to preserve information about their pre-exhumation history. The findings of the inclusions of high-pressure phases in metamorphic minerals and, in particular, the study of major and trace elements zoning in garnets together with thermodynamic modelling allowed us to describe new temperature-pressure conditions and to refine the metamorphic paths of these rocks.

The felsic and mafic granulites of the Kutná Hora Complex in the Moldanubian Zone and the Rychleby Mountains in the East Sudetes preserve the evidence of prograde metamorphism. In addition to the inclusions of phengite and omphacite in the garnet cores, the multiple zoning of major and trace elements in garnet declares their prograde evolution. Using thermodynamic modelling, it has been calculated that these rocks have undergone a complex metamorphic evolution from their initial stage at low temperatures and pressures (400-500 °C / 0.8-1.0 GPa) up to UHP conditions in the coesite and diamond stability field. This prograde path took place under a very steep geothermal gradient in the subduction zone. After a partial isobaric ascent of the rocks to the upper mantle levels, significant heating under the granulite facies conditions affected these rocks. This second metamorphic event is linked to the intrusion of a hot mantle magma that penetrated mantle/crust boundary due to the slab break-off and also to later Variscan processes.

The composition of monomineral and polyphase inclusions in garnets from eclogites and clinopyroxenites, which are enclosed as boudins in garnet peridotites in the Moldanubian Zone, shows their origin as derivatives of the lithospheric mantle above the subduction zone. The temperature-pressure conditions, calculated on the base of preserved prograde zoning in garnets, suggest that the high temperature overprint in granulite facies was relatively short and did not result in total homogenisation of those rocks. This short-term event is also documented in the surrounding felsic granulites. The probable occurrence of the subduction environment and part of the Variscan suture in the Bohemian Massif is also documented by the bodies of eclogites, which occur in the form of a 250 km long bend spreading across the Moldanubian Zone from the southwest to the northeast up to the East Sudetes. Their texture relationships and temperature / pressure conditions (600-650 °C / 2.3 GPa) allow us to determine that these rocks have undergone a steep geothermal gradient during the prograde metamorphism. These hypotheses are also supported by findings of high pressure / low temperature amphiboles of taramitic composition as inclusions in garnets.

1. Úvod

Nejnovější pokrok ve výzkumu vysokotlacc až ultra-vysokotlacc (HP-UHP) metamorfovaných hornin, jež se vyskytují v orogenních pásmech po celé planetě, významně posunul naše znalosti o původu, vývoji, transportu a výzdvihu korových a plášťových hornin během subdukce a následné exhumace a o míře komplexnosti a složitosti procesů v těchto dynamických geologických prostředích. Popis, výzkum, odhalení a porozumění takto rozsáhlému vývoji hornin patří mezi nejnáročnější geovědní disciplíny. Hlavní překážkou na cestě poznání je fakt, že horniny, metamorfované za vysokého stupně, obvykle nezachovávají původní minerální složení nebo že původní minerály, které byly stabilní při vysokotlakých podmínkách, již nejsou v rovnováze s nově nastavenými chemickými podmínkami. Tyto minerály pak procházejí reakcemi rozpadu, rekrystalizací a modifikacemi jejich složení. Obvykle se jedná o horniny s několikanásobnou metamorfní a deformační historií, kde jsou jejich bývalé struktury modifikovány a předchozí minerály jsou přeměněny středně- až nízkotlakými procesy. Metamorfóza nízkého stupně (v amfibolitové facii) v takovýchto terénech obvykle vede k celkové re-ekvilibraci minerálů a jejich struktur vzniklých během předchozích metamorfních procesů.

K popsání původní metamorfní historie hornin před jejich exhumací a metamorfním přetiskem je zapotřebí komplexního a multidisciplinárního přístupu, jež zahrnuje petrologické, geofyzikální, strukturní, mineralogické a geochemické metody. V této práci jsou využity dva hlavní postupy výzkumu, které mají pomoci odhalit, zda studované horniny byly součástí subdukčních procesů nebo byly exhumovány z plášťových hloubek podél subdukčního kanálu před jejich exhumací k zemskému povrchu: 1) Kompoziční zonálnost fází se širokým rozpětím stability je schopna zachovat vícenásobné růstové zóny pomocí distribuce hlavních a dokonce stopových prvků, které lze použít pro rekonstrukci předchozího metamorfního vývoje. 2) Minerální inkluze, uzavřené v rezistentních fázích, které nejsou v rovnováze se současným chemickým složením horniny, obvykle obsahují informace o prográdní teplotně-tlakové dráze (P-T) horniny. V kombinaci s termodynamickým modelováním je možné rekonstruovat změny v tlaku, teplotě, času a složení a dešifrovat pravděpodobnou metamorfní dráhu v těchto poly-metamorfních terénech.

2. Cíle práce

Oborné články, obsažené v této tezi, mají za cíl prezentovat petrologický, mineralogický a geochemický výzkum ultra-vysokotlakých hornin z různých částí Českého masívu, které podle předešlých studií mají potenciál zachovat svou před-exhumační historii.

Definice a kvantifikace prográdních metamorfních podmínek felsických granulitů kutnohorské oblasti a granulitů Rychlebských hor je hlavní náplní této teze. Tyto horninové komplexy nesou důkazy o jejich UHP metamorfóze díky zachování prográdní zonálnosti v granátech. Komplexní distribuce hlavních a dokonce stopových prvků (především yttria a vzácných zemin) v těchto granátech definuje několik zón, které dokumentují růst granátu v odlišných metamorfních podmínkách. Metagabra a amfibolity v okolí těchto granulitů

v moldanubické zóně (Ronovský masív) byly podrobeny detailnímu petrologickému a geochronologickému studiu za účelem diskuze o možném vztahu mezi tavením a průnikem pláště a metamorfózou moldanubické zóny v granulitové facii.

Pevné inkluze minerálů a složení jejich hostitelských fází z UHP eklogitů, granátických pyroxenitů a granátických peridotitů byly zkoumány za účelem rozluštění původu a metamorfní krystalizace těchto ultramafických hornin, jež jsou hojně přítomny v moldanubické zóně jako budiny v okolních krustálních horninách.

Předpokládaná přítomnost variské sutury v Českém masívu je prověřována na základě blízkého vztahu hornin eklogitové facie s UHP horninami moldanubické zóny a pomocí rekonstrukce metamorfní historie eklogitů z monotónní jednotky moldanubika.

Výsledky této práce mají přispět k diskusi o hlavních geotektonických procesech během variské orogeneze vedoucí k tvorbě HP-UHP hornin v Českém masívu. Všechny výzkumné materiály a výsledky, obsažené v této disertační práci, by měly přinést nové poznatky do problematiky sledování metamorfních dráh vysokotlacených metamorfovaných hornin v kolizních orogénech.

3. Materiál a metodika

Velké množství terénních prací a vzorkování různých horninových typů předcházelo detailnímu petrografickému popisu pomocí optických a skenovacích mikroskopů a rozsáhlému sběru rozličných chemických dat. Závěrem byly nejlepší vzorky podrobeny termobarometrickým výpočtům odhadům teplotně-tlakových podmínek a termodynamickému modelování.

Chemické analýzy hornin byly provedeny ve většině případů mokrou metodou v laboratořích přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Kvantitativní analýzy minerálů a kompoziční mapování hlavních prvků byly pořízeny elektronovým skenovacím mikroskopem Vega Tescan vybaveným energiově disperzním spektrometrem na přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy. Další kvantitativní a chemické analýzy a podrobné kompoziční mapování vzorků bylo provedeno na mikrosondě JEOL JXA-8530F vybavené vlnově disperzními spektrometry na Ústavu Petrologie a Strukturní Geologie PříF UK. Dodatečné analýzy byly pořízeny mikrosondou JEOL 6310 na univerzitě v Grazu.

Stopové prvky a koncentrace vzácných zemin v granátech byly pořízeny metodou laserové ablace na hmotovém spektrometru (LA-ICP-MS) na Institutu Geologie České Akademie věd a také na univerzitě v Grazu.

Termodynamického modelování pseudosekcí pro popis změn v minerálním složení hornin bylo využito na základě minimalizace Gibbsovy energie probíhajících reakcí použitím počítačového programu Perple_X 6.6.8. s vnitřně konzistentní databází modelů pro minerály a pevné roztoky.

4. Výsledky a diskuse

Zachování prográdní zonálnosti v granátech felsických a mafických granulitů je důležitým atributem pro vymezení P-T podmínek a pro rekonstrukce geodynamického vývoje subdukčních nebo kolizních zón. Z termodynamického modelování pseudosekcí, založeného převážně na izopletech chemického složení granátů, můžeme interpretovat strmý geotermální gradient v subdukčním prostředí, jež začíná v nízkotlakých-nízkoteplotních podmínkách (0.6 GPa / 400 °C pro kutnohorský komplex a 0.8-0.9 GPa / 460 °C pro Rychlebské hory) a pokračuje až do podmínek UHP metamorfózy (3.2-4.0 GPa / 700 °C pro kutnohorský komplex a 2.4-2.5 GPa / 550 °C pro Rychlebské hory) v těchto granulitech. UHP podmínky byly potvrzeny nálezem mikro-diamantu a coesitu v práci Perraki a Faryad (2014) a pseudomorfózami křemene po coesitu podle Bakun-Czubarow (1992).

Existují dva alternativní scénáře, které vysvětlují zanoření a exhumaci felsických hornin z hloubek zemského pláště a jejich následnou metamorfózu v granulitové facii. 1) dekomprese a zahřívání z UHP až do podmínek granulitové facie (1.5-2.0 GPa při 800-1000 °C), jak bylo dříve určeno pro felsické granulity moldanubické zóny, a také ve východních Sudetech (Bakun-Czubarow, 1992; Budzyń et al., 2015, Carswell a O'Brien, 1993; Kotková a Harley, 1999; Kryza et al., 1996; Nahodilová et al., 2014; Pouba et al., 1985; Štípská et al., 2004; Tajčmanová et al., 1992; Vrána et al., 2005). Nicméně izotermická dekomprese v podmínkách granulitové facie by vedla k úplné homogenizaci prográdní zonálnosti granátů (Chakraborty a Ganguly, 1992; Carlson, 2006; Vielzeuf et al., 2005). 2) izotermická dekomprese z UHP podmínek při středních teplotách. Po částečné exhumaci hornin do nižších nebo středních úrovní kůry by byly vystaveny zahrnutí v podmínkách granulitové facie. Tento model, vysvětlující metamorfózu granulitové facie v moldanubické zóně, je vysvětlován odlomením subdukované desky a průnikem plášťových hornin, jež by mohl být potenciálním zdrojem tepla pro vysokoteplotní metamorfózu (Faryad et al., 2015).

Texturní vztahy, zachovaná prográdní zonálnost a odhadované P-T podmínky těles eklogitů, jež se nachází jako vločky v horninách amfibolitové facie v moldanubické zóně, nám umožňují popsat dřívější subdukční historii HP-UHPM hornin. Vypočítané teplotní podmínky pro eklogity v monotónní a pestré skupině jsou 600-650 °C. Maximální tlaky těchto hornin, vypočtené na základě metody pseudosekce a rovnovážných reakcí mezi minerály, se pohybují okolo 2.3 GPa. Při srovnání P-T podmínek eklogitů v moldanubiku s těmi, které se vyskytují v Krušných horách a v západních Sudetech (Massonne a Koppe, 2005, Klemm a Bröcker, 1999) všechny vykazují teplotní gradient 7-9 °C / km během prográdní P-T dráhy, během níž překračují hranici epidotické a lawsonitové eklogitové facie. Tyto podmínky, stejně jako zachování silné kompoziční zonálnosti granátu s inkluzemi taramitu, naznačují vývoj v relativně chladném subdukčním prostředí.

Metamorfnní P-T podmínky odhadnuté pro peridotity a eklogity z Nových Dvůrů (Medaris et al., 2005; Nakamura et al., 2004) a Dunkelsteinerwaldu (Becker, 1997a; 1997b; Carswell, 1991) jsou nad 1000-1100 °C. Všechny tyto horniny se vyskytují ve felsických granulitech, které společně s mafickými a ultramafickými tělesy vykazují metamorfózu v granulitové facii za zhruba 900-1000 °C (Faryad et al., 2010; Kotková, 2007; O'Brien a Carswell, 1993;

Tajčmanová et al., 2006). I přes tyto metamorfnní události při vysokých teplotách dochází k zachování kompoziční zonálnosti v granátech eklogitů. To naznačuje, že UHP a následná granulitová metamorfóza nebyla dostatečně dlouhotrvající na to, aby úplně homogenizovala složení hlavních prvků v granátu. Zvýšení vápníku a pokles hořčíku v jádře granátových zrn, jak v granatických klinopyroxenitech, tak v eklogitech, lze interpretovat jako výsledek zvýšení tlaku a poklesu teploty. To odpovídá přeměně spinelu na granát a tvorbě granátových lamel jak v klinopyroxenu, tak v ortopyroxenu bohatých na hliník. Podmínky granulitové facie jsou také interpretovány pomocí složení okrajů granátových zrn, kde hořčík vykazuje nárůst, kdežto vápník naopak pokles koncentrace. Rychlá metamorfóza v granulitové facii je také zdokumentována zachovalou prográdní zonálností granátu v okolních felsických granulitech (Faryad et al., 2010).

5. Závěry

Nejnovější studie felsických granulitů Gföhlské jednotky moldanubika (Faryad et al., 2010; 2015; Jedlicka et al., 2015; Perraki a Faryad, 2014) a některých eklogitů monotónní a pestré skupiny (Faryad a Fišera, 2015; Scott et al., 2013) ukázaly, že obě litologie prodělaly dřívější HP-UHP metamorfózu, jež předcházela přetištění vysokoteplotní metamorfózou v granulitové facii v nižších patrech kontinentální kůry za tlaků okolo 0.7-1.5 GPa.

Dva metamorfnní stupně, první v HP-UHP podmínkách a druhý v podmínkách střednětlaké-vysokoteplotní granulitové facie, byly určeny pro obě studovaná granulitová tělesa v moldanubické zóně a ve východních Sudetech. V moldanubické zóně se předpokládá, že metamorfóza v granulitové facii nastala až po exhumaci hornin z HP-UHP podmínek do pozic nižší až střední kůry (Faryad et al., 2015). Za zdroj tepla pro tuto krátkodobou metamorfnní událost v granulitové facii je považován průnik plášťových magmat skrze akreční klín při odlomení těžké subdukované desky. Vysoké teploty, způsobené vniknutím mafických až ultramafických magmat, vedly k přetištění již částečně exhumovaných HP-UHP těles. Po tomto krátkodobém tepelném procesu byly horniny transportovány do horních pater kůry díky subdukcii/exhumaci rheického oceánu (Finger et al., 2007) a následnému tektonickému podsunutí bloku brunovistulika pod moldanubickou desku (Schulmann et al., 2005).

Výskyt těles eklogitů a serpentinitů v 250 km dlouhém pásmu jihovýchodně od tepelsko-barrandienského bloku je interpretován jako variská sutura vytvořená uzavřením moldanubického oceánu (Franke, 2000). Moldanubická sutura je součástí hlavní variské sutury, kterou lze sledovat i v jiných masivech podél evropského variského pásma od Českého masívu na východě až po Iberský masív na západě (Faryad et al., 2015; Franke, 2000). V Českém masívu pokračuje skrze moldanubickou zónu až k Sudetům na severovýchodě. Moldanubická sutura (jako součást variské sutury) by mohla být zodpovědná za formování a exhumaci UHP granulitových těles v moldanubické zóně.

6. Použitá literatura

- Bakun-Czubarow, N., 1992. Quartz pseudomorphs after coesite and quartz exsolutions in eclogitic clinopyroxenes of the Złote Mountains in the Sudetes (SW Poland). *Archiwum Mineralogiczne* 48, 3–25.
- Becker, H., 1997a. Petrological constraints on the cooling history of high-temperature garnet peridotite massifs in lower Austria. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 128, 272–286.
- Becker, H., 1997b. Sm–Nd garnet ages and cooling history of high-temperature garnet peridotite massifs and high-pressure granulites from lower Austria. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 127, 224–236.
- Budzyń, B., Jastrzębski, M., Kozub-Budzyń, G., Konečný, P., 2015. Monazite Th-U-total Pb geochronology and P-T thermodynamic modelling in a revision of the HP-HT metamorphic record in granulites from Stary Gierałtów (NE Orlica-Śnieżnik Dome, SW Poland). *Geological Quarterly* 59, 700–717.
- Carlson, W. D., 2006. Rates of Fe, Mg, Mn, and Ca diffusion in garnet. *American Mineralogist* 91, 1–11.
- Carswell, D. A., 1991. Variscan high P-T metamorphism and uplift history in the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in lower Austria. *European Journal of Mineralogy* 3, 323–342.
- Carswell, D. A., O'Brien, P. J., 1993. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: examples from the Moldanubian zone of the Bohemian Massif in Lower Austria. *Journal of Petrology* 34, 427–459.
- Chakraborty, S., Ganguly, J., 1992. Cation diffusion in aluminosilicate garnets: Experimental determination in spessartine-almandine diffusion couples, evaluation of effective binary diffusion coefficients, and applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 111, 74–86.
- Faryad, S. W., Fišera, M., 2015. Olivine-bearing symplectites in fractured garnet from eclogite, Moldanubian Zone (Bohemian Massif) – a short-lived, granulite facies event. *Journal of Metamorphic Geology* 33(6), 597–612.
- Faryad, S. W., Kachlík, V., Sláma, J., Hoinkes, G., 2015. Implication of corona formation in a metatroctolite to the granulite facies overprint of HP-UHP rocks in the Moldanubian zone (Bohemian Massif). *Journal of Metamorphic Geology* 33, 295–310.
- Faryad, S. W., Nahodilová, R., Dolejš, D., 2010. Incipient eclogite facies metamorphism in the Moldanubian granulites revealed by mineral inclusions in garnet. *Lithos* 114, 54–69.
- Finger, F., Gerdes, A., Janoušek, V., René, M., Riegler, G., 2007. Resolving the Variscan evolution of the Moldanubian sector of the Bohemian Massif: the significance of the Bavarian and the Moravo–Moldanubian tectonometamorphic phases. *Journal of Geosciences* 52, 9–8.

- Franke, W., 2000. The mid-European segment of the Variscides: tectonostratigraphic units, terranes, boundaries and plate evolution. In: Franke, W., Haak, V., Oncken, O., Tanner, D. (ed.) *Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt*. Geological Society of London. Special Publication 179, 35-61.
- Jedlicka, R., Faryad, S.W., Hauzenberger, C., 2015. Prograde metamorphic history of UHP granulites from the Moldanubian Zone (Bohemian Massif) revealed by major element and Y + REE zoning in garnets. *Journal of Petrology* 56, 2069–2088.
- Klemd, R., Bröcker, M., 1999. Fluid influence on mineral reactions in ultrahigh-pressure granulites: a case study in the Sněžnik Mts. (West Sudetes, Poland). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 136, 358–373.
- Kotková, J., 2007. High-pressure granulites of the Bohemian Massif: recent advances and open questions. *Journal of Geosciences* 52, 45-71.
- Kotková, J., Harley, S. L., 1999. Formation and evolution of high-pressure leucogranulites: experimental constraints and unresolved issues. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A-Solid Earth* 24, 299-304.
- Kryza, R., Pin, C., Vielzeuf, D., 1996. High-pressure granulites from the Sudetes (south-west Poland): evidence of crustal subduction and collisional thickening in the Variscan Belt. *Journal of Metamorphic Geology* 14, 531–546.
- Massonne, H.J., Koppe, J., 2005. A low-variance mineral assemblage with talc and phengite in an eclogite from the Saxonian Erzgebirge, central Europe, and its P–T evolution. *Journal of Petrology* 46, 355–375.
- Medaris, L. G., Beard, B. L., Jelínek, E., 2006. Mantle-derived, UHP garnet pyroxenite and eclogite in the Moldanubian Gföhl Nappe, Bohemian Massif: a geochemical review, new P-T determinations and tectonic interpretation. *International Geology Review* 48, 765–777.
- Medaris, L.G., Wang, H., Jelínek, E., Mihaljevič, M., Jakeš, P., 2005. Characteristics and origins of diverse Variscan peridotites in the Gföhl Nappe, Bohemian Massif, Czech Republic. *Lithos* 82, 1–23.
- Nahodilová, R., Štípská, P., Powell, R., Košler, J., Racek, M., 2014. High-Ti muscovite as a prograde relict in high pressure granulites with metamorphic Devonian zircon ages (Běstvina granulite body, Bohemian Massif): Consequence for the relamination model of subducted crust. *Gondwana Research* 25, 630-648.
- Nakamura, D., Svojtka, M., Naemura, K., Hirajima, T., 2004. Very-high-pressure (>4 GPa) eclogites associated with the Moldanubian Zone garnet peridotite (Nové Dvory, Czech Republic). *Journal of Metamorphic Geology* 22, 593–603.
- O'Brien, P. J., Carswell, D.A., 1993. Tectonometamorphic evolution of the Bohemian Massif: evidence from high pressure metamorphic rocks. *Geologische Rundschau* 82, 531–555.

- Perraki, M., Faryad, S. W., 2014. First finding of microdiamond, coesite and other UHP phases in felsic granulites in the Moldanubian Zone: Implications for deep subduction and a revised geodynamic model for Variscan Orogeny in the Bohemian Massif. *Lithos* 202-203, 157-166.
- Pouba, Z., Paděra, K., Fiala, J., 1985. Omphacite granulite from the NE margin area of the Bohemian Massif (Rychleby Mts.). *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen* 151, 29–52.
- Štípská, P., Schulmann, K., Kröner, A., 2004. Vertical extrusion and middle crustal spreading of omphacite granulite: a model of syn-convergent exhumation (Bohemian Massif, Czech Republic). *Journal of Metamorphic Geology* 22, 179–198.
- Tajčmanová, L., Konopásek, J., Schulmann, K., 2006. Thermal evolution of the orogenic lower crust during exhumation within a thickened Moldanubian root of the Variscan belt of Central Europe. *Journal of Metamorphic Geology* 24, 119-134.
- Vielzeuf, D., Veschambre, M., Brunet, F., 2005. Oxygen isotope heterogeneities and diffusion profile in composite metamorphic-magmatic garnets from the Pyrenees. *American Mineralogist* 90, 463-472.
- Vrána, S., Štědrá, V., Fišera, M., 2005. Petrology and geochemistry of the Běstvina granulite body metamorphosed at eclogite facies conditions, Bohemian Massif. *Journal of Czech Geological Society* 50, 95-106.
- Schulmann, K., Kröner, A., Hegner, E., Wendt, I., Konopásek, J., Lexa, O., Štípská, P., 2005. Chronological constraints on the pre-orogenic history, burial and exhumation of deep-seated rocks along the eastern margin of the Variscan Orogen, Bohemian Massif, Czech Republic. *American Journal of Science* 305, 407-448.
- Scott, J. M., Konrad-Schmolke, M., O'Brien, P. J., Günter, C., 2013. High-T, low-P formation of rare olivine-bearing symplectites in Variscan eclogite. *Journal of Petrology* 54, 1375–1398.

1. Introduction

Recent progress in the research of high- to ultrahigh-pressure (HP-UHP) metamorphic rocks, exposed along the orogenic zones on the Earth, has significantly improved our knowledge about origin, development, transportation and uplift of crustal and mantle rocks during the subduction and subsequent exhumation, and about complexity of processes in this dynamic geological environment. Description, investigation, unraveling and understanding of such high-grade rocks evolution still belong among the most challenging questions in geological research. The main problem is that the rocks usually do not preserve original composition of phases or that the original minerals, which have been stable at high pressure conditions, are no longer in equilibrium with newly adjusted conditions and they undergo breakdown reactions, recrystallization and compositional modification. It is usually due to poly-metamorphic and poly-deformation history, where former structures are modified and previous minerals are obliterated by medium- to low- pressure assemblages. Metamorphism in low-grade (amphibolite facies) conditions in poly-metamorphic terranes usually results in the total re-equilibration of minerals and their textures formed during the preceding metamorphic processes.

To trace the original metamorphic history of the rocks prior to their exhumation/overprint, a complex and multi-disciplinary approach, involving petrological, geophysical, structural, mineralogical and geochemical methods, is needed. Two main research approaches are used in this thesis to decipher whether the rocks have been subjected to subduction or exhumed from mantle depth along the subduction channel prior to their exhumation to surface: 1) Compositional zoning of phases with a wide stability span are able to preserve growth or multiple zoning of major and even trace elements, which can be used for the reconstruction of previous metamorphic history. 2) Mineral inclusions trapped within resistant phases, which are not in equilibrium with the present chemical composition of the rock, usually bear the information about the prograde pressure-temperature (P-T) path of the rock. In combination with the thermodynamic modelling it is possible to reconstruct changes in pressure-temperature-time-composition (P-T-t-X) space and decrypt the probable metamorphic path in these multi-stage geological terranes.

2. Aims of the study

The papers included in this thesis present petrological, mineralogical and geochemical study of (U)HPM rocks from different parts of the Bohemian Massif which, according to previous studies, have the potential to preserve their pre-exhumation history.

Definition and quantification of prograde metamorphic conditions for Kutná Hora felsic granulites and Rychleby granulites are the goals of the thesis. These high-grade metamorphic complexes bear the evidence of UHP metamorphism by preservation of prograde zoning garnet. Complex distribution of major and even Y+REEs in those garnets reveal multiple zoning that belongs to garnet growth in different stages of metamorphism. Metagabbro and amphibolite body in the vicinity of those granulites (Ronov massif) is treated by petrological

and geochronological study and the results are used to discuss a possible relationship between the mantle melting process and granulite facies metamorphism in the Moldanubian Zone.

Solid phase inclusions and composition of their host minerals from UHP eclogites, garnet pyroxenites and garnet peridotites are investigated to decipher the origin and metamorphic crystallization of these rocks.

The possible presence of Variscan suture in the Bohemian Massif is ascertained by investigation of a relationship of eclogite facies and UHPM rocks in the Moldanubian Zone and of pre-exhumation metamorphic history of the eclogites in the Monotonous unit (Moldanubian Zone).

The results of this work are used to discuss the main geotectonic processes during the Variscan Orogeny leading to the formation of HP-UHP rocks within the Bohemian Massif. All research materials comprising this thesis should bring new knowledge into the problematics of tracing the pre-exhumation history of high-grade metamorphic rocks in a collision orogeny.

3. Material and methods

High amount of fieldwork and sampling of different rock types were followed by detailed petrographic descriptions using optical and scanning microscopes and extensive collection of chemical data. Geothermobarometry calculations and pseudosection modelling on the best samples were performed.

Chemical analyses of rock samples were performed usually by wet method in the laboratories of the Faculty of Science, Charles University. Quantitative mineral analyses and compositional maps of major elements in garnet were determined by energy-dispersive X-ray analysis using a Vega Tescan scanning electron microscope at Charles University. Chemical analyses and X-ray maps were obtained by a JEOL JXA-8530F field-emission gun electron microprobe equipped with wavelength- and energy-dispersive spectrometers at the Institute of Petrology and Structural Geology, Charles University in Prague. Additional chemical analyses of minerals and variations of elements along garnet profiles a JEOL 6310 scanning electron microscope was used at the Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens University in Graz.

Trace element and REE concentrations in garnet were analyzed with a laser ablation LA-ICP-MS system at the Central Laboratory for Water, Minerals and Rocks, NAWI Graz, Karl-Franzens University Graz and Graz University of Technology. In addition, yttrium and rare earth elements (REEs) in garnet were analyzed using an Element 2 high-resolution inductive coupled plasma-mass spectrometer (ICP-MS) at the Institute of Geology of the Czech Academy of Sciences, Prague.

The pseudosection method was used to decipher the changes in the mineral assemblage of the rocks. The calculation was performed by Gibbs energy minimization using the computer program *Perple_X* 6.6.8. with the internally consistent thermodynamic dataset of minerals and solid solutions.

4. Results and discussion

The preservation of prograde zoning in garnet of felsic and mafic granulites is an important attribute for constraining P-T history and geodynamic reconstruction of the subduction and/or collision zone. From the pseudosection modelling, mainly based on grossular isopleths, we interpret a steep geothermal gradient in a subduction environment from its initial stage at low-pressure, low-temperature conditions (0.6 GPa / 400 °C for the Kutná Hora Complex and 0.8-0.9 GPa / 460 °C for Rychleby Mountains) up to UHP conditions (3.2–4.0 GPa / 700 °C for the Kutná Hora Complex and 2.4-2.5 GPa / 550 °C for Rychleby Mountains) for these granulites. UHP conditions were confirmed by the finding of micro-diamond and coesite by Perraki and Faryad (2014) and quartz pseudomorphs after coesite by Bakun-Czubarow (1992).

There are two alternative scenarios to explain the exhumation of felsic rocks from mantle depths and their subsequent granulite facies metamorphism. The first is decompression and heating to granulite facies conditions of 1.5-2.0 GPa at 800–1000 °C as estimated for the felsic granulite in the Moldanubian Zone and also in East Sudetes (Bakun-Czubarow, 1992; Budzyń et al., 2015; Carswell and O'Brien, 1993; Kotková and Harley, 1999; Kryza et al., 1996; Nahodilová et al., 2014; Pouba et al., 1985; Štípská et al., 2004; Tajčmanová et al., 2006; Vrána, 1992; Vrána et al., 2005). However, an isothermal decompression to the granulite facies stage would result in total homogenization of the prograde compositional zoning in garnet (Chakraborty and Ganguly, 1992; Carlson, 2006; Vielzeuf et al., 2005), unless the exhumation rate from mantle depths to crustal levels was too fast. The second scenario is an isothermal decompression from UHP conditions at intermediate temperature. After the rocks were exhumed to lower or middle crustal levels, they were subjected to heating at granulite facies conditions. Such a model for granulite facies metamorphism in the Moldanubian Zone has been explained by slab break-off and mantle upwelling as a potential heat source for the granulite facies metamorphism (Faryad et al., 2015).

Textural relations and estimated P-T conditions of eclogite bodies within amphibolite facies basement rocks in the Moldanubian Zone enable us to constrain the earlier subduction history of HP–UHPM rocks. The calculated temperature conditions for eclogites in the amphibolite facies Monotonous and Varied units are 600–650 °C. Maximum pressure, calculated based on the pseudosection method and equilibrium reactions among minerals, is around 2.3 GPa. When comparing P–T conditions of eclogites in amphibolite facies units from the Moldanubian Zone with those occurring in the Erzgebirge and Sudetes (Massonne and Koppe, 2005; Klemm and Bröcker, 1999), both show a P–T gradient of 7–9 °C/km with prograde P–T paths crossing the epidote and lawsonite eclogite facies boundary. These features, as well as preservation of strong compositional zoning of garnet with taramite inclusions, suggest a rapid and/or relatively cool subduction environment.

Metamorphic P–T conditions estimated for garnet peridotites and eclogites from the Nové Dvory (Medaris et al., 2005; Nakamura et al., 2004) and from Dunkelsteinerwald (Becker, 1997a; 1997b; Carswell, 1991) indicated that they passed UHP conditions at temperatures above 1000 or 1100 °C. All these rocks occur within felsic granulites,

which together with mafic and ultramafic bodies shared granulite facies metamorphism at about 900–1000 °C (Faryad et al., 2010; Kotková, 2007; O'Brien and Carswell, 1993; Tajčmanová et al., 2006). Despite such high-temperature metamorphic events, compositional zoning in garnet from eclogites is preserved. This suggests that the UHP and subsequent granulite facies metamorphism were not long enough to entirely homogenize the major element composition in garnet. The increase of Ca and decrease of Mg in the core of garnet grains, both in garnet clinopyroxenite and eclogite, can be interpreted as the result of pressure increase and temperature decrease. This fits with the transformation of spinel to garnet and formation of garnet lamellae both in Al-rich clino- and orthopyroxene. The granulite facies process can be also reproduced from the zoning profile near the rim of garnet grains, where Mg shows increase and Ca decrease. A short-term granulite facies overprint is documented by preservation of prograde zoning garnet in felsic granulite (Faryad et al., 2010).

5. Conclusions

Recent studies of felsic granulite in the Gföhl Unit of the Moldanubian Zone (Faryad et al., 2010; 2015; Jedlicka et al., 2015; Perraki and Faryad, 2014) and from some eclogites in the Monotonous and Variegated units (Faryad and Fišera, 2015; Scott et al., 2013) showed that they both experienced an earlier HP-UHP event and were subsequently overprinted by the granulite-amphibolite facies metamorphism in lower and middle crustal positions at conditions of 0.7–1.5 GPa.

The two stage metamorphic history, the first at HP-UHP and the second in MP granulite facies conditions, was established for both granulites in the Moldanubian Zone and in the East Sudetes, respectively. In the Moldanubian Zone, granulite facies metamorphism is assumed to have occurred after exhumation of the HP-UHP rocks into lower-middle crustal positions (Faryad et al., 2015). The heat source for this short-lived granulite facies metamorphism is explained by slab break-off and mantle upwelling triggering melting and emplacement of magma in a lower stress field beneath the accretionary complex. Extreme heating, produced by mafic-ultramafic intrusions, resulted in granulite facies overprint of the already exhumed HP-UHP bodies and migmatization of their host lithologies. After this short-lived thermal process, the high-grade rocks were transported to the upper crustal levels due to the subduction/exhumation of the Rheic oceanic plate (Finger et al., 2007) and subsequent tectonic underplating of the Brunovistulian Block beneath the Moldanubian Zone (Schulmann et al., 2005).

The occurrence of eclogite bodies with serpentinite along ca 250 km zone southeast of the Teplá–Barrandian Block is interpreted as Variscan suture formed by closure of the Moldanubian Ocean (Franke, 2000). The Moldanubian suture is part of the main Variscan suture that can be traced within other allochthonous massifs along the European Variscan Belt from the Bohemian Massif to the Iberian Massif in the southwest (Faryad et al., 2015; Franke, 2000). In the Bohemian Massif, it continues from the Moldanubian Zone to Sudetes in the northeast. The Moldanubian suture might be responsible for formation and exhumation of the UHP granulite bodies in the Moldanubian Zone.

Curriculum vitae

Mgr. Radim Jedlička

Osobní informace:

Narozen: 3. února 1989

Místo narození: Frýdek-Místek

Kontakt: radim.jedlicka@natur.cuni.cz

Osobní identifikátory: ResearcherID: O-4193-2016

ScopusID: 55251784700

ORCID: 0000-0002-6275-7717

Praxe:

Vedoucí pracoviště

Laboratoř elektronové mikrosondy (JEOL EPMA JXA-8530)

Laboratoř skenovací elektronové mikroskopie

Vědecký pracovník a pedagog

Vedoucí cvičení kurzu Mikroskopie horninotvorných minerálů

Vedoucí cvičení kurzu Základy magmatické a metamorfní petrologie

Vedoucí cvičení kurzu Mikrosondové analýzy minerálů a jejich zpracování

Vzdělání

2013-současnost Univerzita Karlova (Praha, ČR)

Doktorské studium (Ph.D) oboru geologie se zaměřením na petrologii

2011-2013 Univerzita Karlova (Praha, ČR)

Mgr. - Navazující magisterské studium oboru geologie

2012-2013 Karl-Franzens University (Graz, AUT)

1 semestr magisterského studia v programu ERASMUS

2008-2011 Univerzita Karlova v Praze (Praha, ČR)

Bc. - bakalářské studium oboru geologie

2004-2008 Gymnázium a SOŠ (Frýdek-Místek, ČR)

4-leté státní gymnázium zakončené maturitou

Maturita s vyznamenáním

Zkušenosti:

Central European Tectonic Group 2017 (HUN) - conference

Common metamorphic history shared by felsic and mafic granulite from the Rychleby Mountains (Bohemian Massif)

Přednáška

Central European Tectonic Group 2016 (SK) - conference

Preservation of multiple prograde metamorphism by major and trace elements zoning in garnet: case study of UHP granulites from the Moldanubian Zone (Bohemian Massif).

Přednáška

GOLDSCHMIDT 2015 (CZ) - conference

Multiple prograde metamorphic history of UHP granulites from the Moldanubian zone (Bohemian Massif) - Revelation by Y+REEs compositional zoning in garnets.

Prezentace posteru

Central European Tectonic Group 2015 (CZ) - conference

Multiple prograde metamorphic history of UHP granulites from the Moldanubian zone (Bohemian Massif) revealed by Y+REEs compositional zoning in garnets.

Prezentace posteru

GeoPilsen - Crustal evolution and geodynamic processes in Central Europe 2013 (CZ) - conference

Preservation of prograde metamorphic path of felsic granulites from Kutná Hora crystalline complex (Bohemian Massif) by zonation of major and trace elements in garnet.

- Prezentace posteru

European Mineralogical Conference in Frankfurt 2012 (D) - conference

Mineral inclusions and compositional zoning in garnet from felsic granulite from Kutná Hora Complex (Moldanubian zone, Bohemian Massif)

- Prezentace posteru

International Eclogite Conference in Mariánské Lázně 2011 (CZ) - conference

Mineral inclusions in garnets from granulites, eclogites and peridotites in the Kutná Hora Complex (Moldanubian zone, Bohemian Massif).

- Prezentace posteru

Central European Tectonic Group 2011 (CZ)- konference

Solid phase inclusions in garnets from felsic granulite, eclogite and peridotite in the Kutná Hora Complex (Moldanubian zone, Bohemian Massif)

- Presentace posteru

Ocenění:

Cena děkana za nejlepší diplomovou práci za rok 2013

Studium pevných inkluzí vybraných minerálů eklogitů, peridotitů a granulitů kutnohorské oblasti

2. místo v soutěži o Cenu Radka Melky 2017 za nejlepší publikaci mladého vědce za článek:

Prograde metamorphic history of UHP granulites from the Moldanubian Zone (Bohemian Massif) revealed by major and Y+REEs zoning in garnets.

2. místo za nejlepší studentskou přednášku na konferenci Central European Tectonic Groups 2016 (SK)

Preservation of multiple prograde metamorphism by major and trace elements zoning in garnet: case study of UHP granulites from the Moldanubian Zone (Bohemian Massif).

1. místo za nejlepší studentskou posterovou prezentaci na konferenci Central European Tectonic Group 2015 (CZ)

Multiple prograde metamorphic history of UHP granulites from the Moldanubian zone (Bohemian Massif) revealed by Y+REEs compositional zoning in garnets.

1. místo za nejlepší ústní prezentaci na Studentské geologické konferenci 2011 (CZ)

Výzkum pevných inkluzí v granátech z eklogitů, granulitů a granátických peridotitů kutnohorského komplexu.

Seznam publikací / Selected publications

- Jedlicka, R.**, Faryad, S. W., 2017. Felsic granulite with layers of eclogite facies rocks in the Bohemian Massif; did they share a common metamorphic history? *Lithos*, přijato k tisku. **IF = 3.677**
- Faryad, S. W., Kachlík, V., Sláma, J., **Jedlicka, R.**, 2016. Coincidence of gabbro and granulite formation and their implication for Variscan HT metamorphism in the Moldanubian Zone (Bohemian Massif), example from the Kutná Hora Complex, *Lithos*, **264**, 56-69. **IF = 3.723**
- Jedlicka, R.**, Faryad, S. W., Hauzenberger, C., 2015. Prograde metamorphic history of UHP granulites from the Moldanubian Zone (Bohemian Massif) revealed by major and Y+REEs zoning in garnets. *Journal of Petrology*, **56**, 2069-2088. **IF = 3.768**
- Faryad, S. W., **Jedlicka, R.**, Collett, S., 2013. Eclogite facies rocks of the Monotonous unit, clue to Variscan suture in the Moldanubian Zone (Bohemian Massif), *Lithos*, **179**, 353-363. **IF = 4.482**
- Faryad, S. W., **Jedlicka, R.**, Ettinger, K., 2012. Subduction of lithospheric upper mantle recorded by solid phase inclusions and compositional zoning in garnet: example from the Bohemian Massif. *Gondwana Research*, **23**, 944-955. **IF = 8.122**