

ALTERACE DETRITICKÉHO TITANITU V KULMU DRAHANSKÉ VRCHOVINY

Alteration of detrital titanite in the Drahaný Upland

Aleš Novotný, Renata Čopjaková

Ústav geologických věd PřF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno; e-mail: 379759@mail.muni.cz

(24-21 Úsobrno, 24-23 Malé Hradisko)

Key words: Drahaný Upland, Protivanov Formation, detrital titanite, authigenic synchysite-(Ce), diagenetic alteration, REE mobility, graywackes

Abstract

Titanite is a common accessory mineral of magmatic rocks, low- and medium-grade metamorphic rocks and it occurs as a detrital mineral in clastic sediments. Our paper deals with titanite alterations as a result of interaction of diagenetic fluids with detrital titanite during deep burial of sedimentary rocks of Drahaný Upland, Protivanov Formation. Detrital titanites and their alteration products were examined by electron microprobe. Titanite dissolution was observed from the rim and along the cracks, accompanied by the formation of an authigenic calcite, TiO_2 phase, synchysite-(Ce), and rarely chlorite. With an increasing degree of alteration, detrital titanite occurs as small irregular relics inside a mixture of authigenic minerals. Based on the composition of authigenic minerals, we can suppose diagenetic fluid rich in CO_2 , F and Ca responsible for alteration of detrital titanite. The maximum temperatures in this area during deep burial of sedimentary rocks reached 250–300 °C, corresponding to the conditions of very low-grade metamorphism. Contents of REE (0.67–3.55 wt. % REE_2O_3) in detrital titanite are rather high and vary significantly. Authigenic synchysite-(Ce) compared with detrital titanite strongly prefers LREE over HREE, indicating that LREE released during dissolution of detrital titanite were preferentially incorporated into the structure of synchysite-(Ce), whereas HREE were mobilized and removed away by diagenetic fluids.

Úvod

Titanit je typický akcesorický horninotvorný minerál, který se nachází v různých typech hornin, zejména v Ca bohatých kyselých až bazických magmatických horninách (granity, granodiority, pegmatity), ve slabě a středně metamorfovaných horninách (ruly, amfibolity), na hydrotermálních žilách (typický je pro alpskou paragenézi) i v klastických sedimentech (Deer et al. 1982). Chování titanitu při působení hydrotermálních fluid je věnováno jen několik prací a většinou se jedná o studium alterací titanitu v granitoidních horninách (Pough 1934; Raade 1969; Pan et al. 1993; Morad et al. 2009; Middleton et al. 2013). Dostupné publikace o alteracích titanitu v sedimentárních horninách (jedná se o tufy) jsou omezené pouze na jedinou práci od Horie et al. (2008).

Předkládaná zpráva shrnuje výsledky studia alterací detritického titanitu, k nimž dochází v souvislosti s účinky diagenetických fluid při hlubokém pohřbení sedimentů kulmu Drahané vrchoviny. Je zde vyhodnoceno chemické složení detritického titanitu a sekundárních fází, které ho zatlačují, posouzeny teplotní podmínky alteračních procesů a chemismus fluid a dále vyhodnocena mobilita REE při těchto procesech.

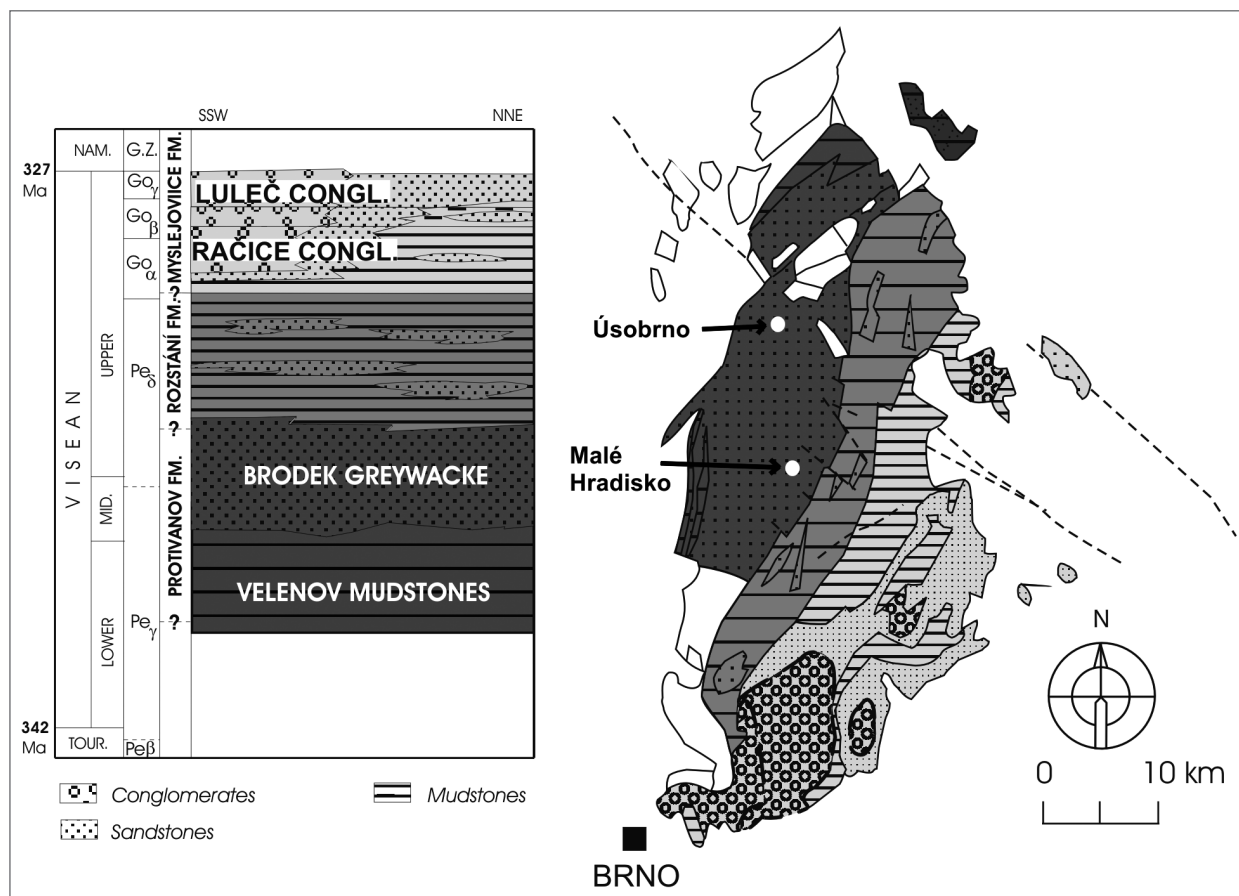
Geologická situace

Drahané vrchovina představuje jednotku situovanou při v. okraji Českého masivu a reprezentuje jednu ze dvou částí moravskoslezského paleozoika. Tato jednotka je považována za součást rhenohercynské zóny variského orogénu (Franke 1989) a sedimentace v kulmské pánvi souvisí s variskou orogenezí (Schulmann – Gayer 2000).

Drahané vrchovina představuje mohutný komplex převážně drob, méně slepenců a břidlic (Hartley – Otava 2001). Na základě litostratigrafie rozdělil Dvořák (1973) v rámci sedimentů Drahané vrchoviny souvrství protivanovské, rozstáňské a myslejovické (od starších k mladším; obr. 1). Na bázi protivanovského souvrství jsou přítomny velenovské břidlice a výše převažují brodecké droby (Mísař et al. 1983) s významnou polohou kořeneckého slepence. V nadloží protivanovského souvrství leží sedimenty rozstáňského souvrství (převaha břidlic) a myslejovického souvrství (dominance drob a slepenců; Mísař et al. 1983). Zdrojový materiál sedimentů protivanovského souvrství zahrnuje ve velké míře svrchně korové horniny s vysokým podílem vulkanitů, I-typových magmatitů, sedimentů (pískovce a břidlice) a kontaktně metamorfovaných hornin. Klastický materiál protivanovského souvrství vykazuje v mnoha případech vysokou podobnost s horninami situovanými při současné stavbě Českého masivu západně až severozápadně od kulmských sedimentů. Zachovalová (2003) upozornila na geochemickou podobnost valounů granitů a výlevných ryolitů a andezitů a považuje za zdrojovou oblast valounů vulkanických a plutonických hornin ostrovní oblouk, který byl během karbonu denudován. Valouny biotitických granitů až granodioritů jsou blízké I-typovým granitoidům nasavrckého masivu (Čopjaková 2007). Tyto magmatické horniny jsou považované za hlavní zdroj detritického titanitu v protivanovském souvrství.

Metodika

Chování detritického titanitu bylo studováno na dvou lokalitách drob v protivanovském souvrství kulmu Drahané vrchoviny, kde je titanit běžný detritický mi-



Obr. 1: Schematická geologická mapa a stratigrafické schéma sedimentů Drahané vrchoviny (modifikováno podle Hartley a Otava 2001). Na mapě jsou bílými kolečky vyznačeny lokality, kde byl proveden odběr vzorků.

Fig. 1: Schematic geological map and stratigraphic scheme of the Culm sediments of the Drahaný Upland (modified from Hartley and Otava 2001). The white circles show position of studied samples.

neral v asociaci těžkých minerálů. Z drob byly zhotoveny leštěné výbrusy. Leštěné výbrusy byly naprášeny vrstvou C a podrobeny studiu na elektronové mikrosondě Cameca SX 100 (Laboratoř elektronové mikroskopie a mikroanalýzy; společné pracoviště Ústavu geologických věd PřF MU a České geologické služby; Brno). Analýzy titanitu a produktů jeho alterace byly provedeny ve vlnově disperzním modu, při urychlovacím napětí 15 kV, proudu svazku 10 nA (REE karbonáty) a 40 nA (titanit, TiO_2 fáze) a velikosti svazku 2 μm (titanit, TiO_2 fáze) a 10 μm (REE karbonáty). Byly použity následující standardy: fluorapatit (Ca), titanit (Si), TiO_2 (Ti), albit (Na), sanidin (Al, K), almandin (Fe), pyrop (Mg), YPO_4 (Y), LaPO_4 (La), CePO_4 (Ce), PrPO_4 (Pr), NdPO_4 (Nd), SmPO_4 (Sm), EuPO_4 (Eu), GdPO_4 (Gd), DyPO_4 (Dy), ErPO_4 (Er), Sn (Sn), kolumbit (Nb), CrTa_2O_6 (Ta), brabantit (Th), U (U), topaz (F), zirkon (Zr), vanadinit (V), ScVO_4 (Sc).

Chemické složení detritického titanitu bylo přepočteno na sumu tří kationů (tab. 1). Chemické složení autigenních REE karbonátů bylo kalkulováno na sumu šesti kationů (tab. 1) bez Fe, Ti a Si, o nichž se uvažuje jako o příměsi jiných fází (oxidů/hydroxidů Fe, TiO_2 fáze, křemene). Chemické složení TiO_2 fáze bylo přepočteno na sumu jednoho kationu (tab. 1).

Výsledky

Detritický titanit v drobách protivanovského souvrství tvoří isometrická až sloupcovitá hypautomorfně omezená zrna velká přibližně 50–150 μm . Detritický titanit je v BSE obraze obvykle heterogenní. U zrn byly patrné alterace od okrajů a podél prasklin doprovázené vznikem nových fází. S rostoucí mírou alterace tvoří detritický titanit drobné ostrůvkovité relikty uvnitř mas sekundárních fází. Obvykle byl titanit zatlačován směsí s převažujícím kalcitem, blíže neidentifikovanou TiO_2 fází a karbonáty vzácných zemin (obr. 2a, 2b, 2c). Vzácně byl titanit zatlačen směsí chloritu s drobnými zrnky TiO_2 fáze (obr. 2d).

U detritického titanitu se obsah Ca pohybuje v rozmezí 0,94–0,98 apfu (tab. 1). Obsah REE v jednotlivých zrnech titanitu kolísá (0,67–3,55 hm. % REE_2O_3), přičemž LREE výrazně převládají nad HREE a obsah Eu je pod detekčním limitem EMP (obr. 3a). Obsah Ti činí 0,87–0,93 apfu. Z ostatních prvků je zastoupeno v menší míře Fe (0,96–2,40 hm. % Fe_2O_3), nízký je obsah Al (1,14–1,56 hm. % Al_2O_3), Nb (0,14–0,31 hm. % Nb_2O_5) a radioaktivních prvků (nad limitem detekce je pouze Th $\leq 0,10$ hm. % ThO_2). Rovněž množství F je nízké (0,27–0,52 hm. %; 0,03–0,06 apfu).

Kalcit, který zaujímá největší objem po alterovaném titanitu, vytváří drobná nepravidelná zrna o velikosti 10–20 μm . Často se vyskytuje v asociaci s TiO_2 .

Tab. 1: Chemické složení detritického titanitu, autigenního synchysitu-(Ce) a TiO₂ fáze z kulmu Dražanské vrchoviny; bdl – hodnoty pod detekčním limitem elektronové mikrosondy. Výsledky analýz jsou uvedeny v hm. %.

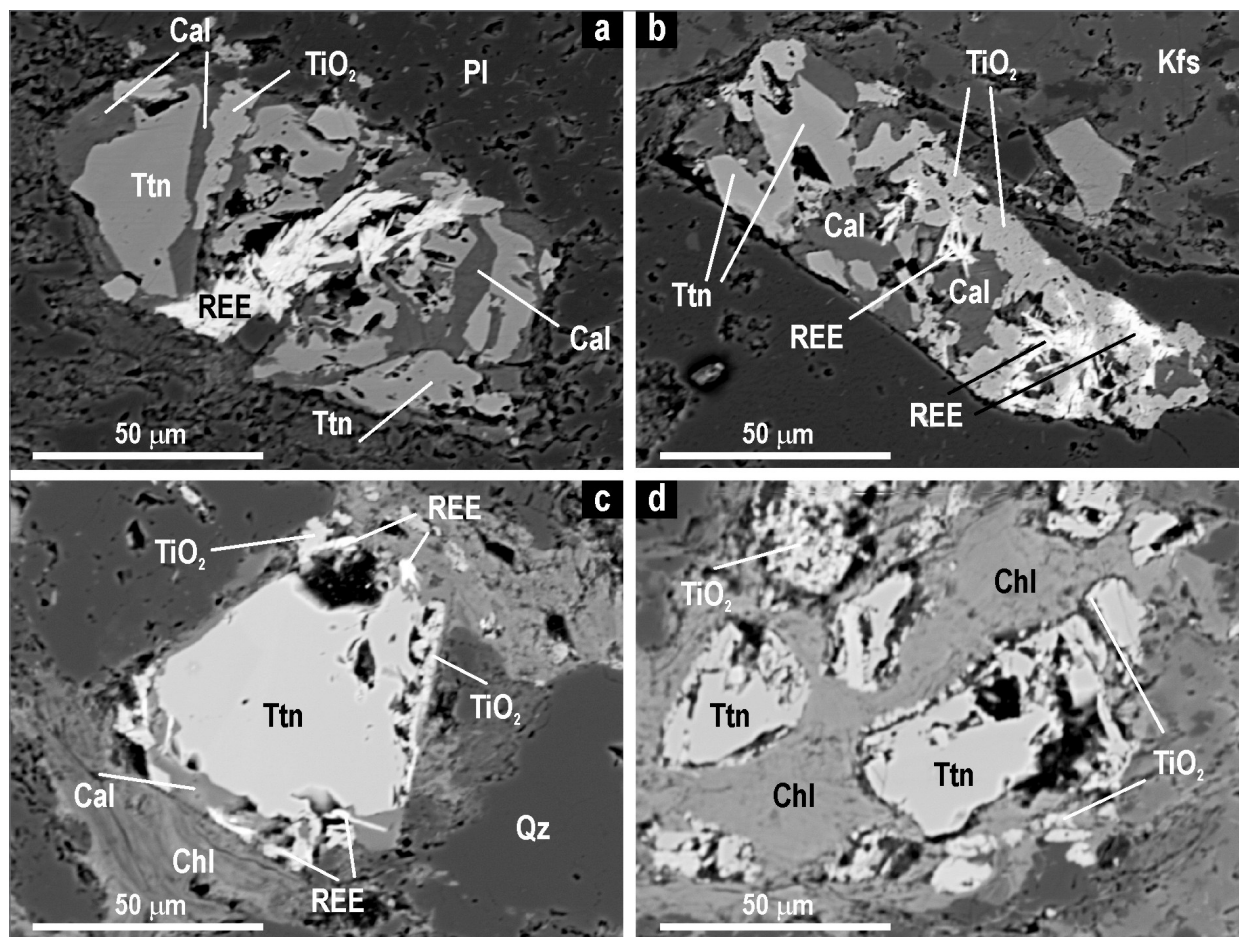
Tab. 1: Chemical composition of detrital titanite, authigenic synchysite-(Ce) a TiO₂ phase from the Dražany Upland; bdl – values below the detection limit of electron microprobe. Chemical analyses are given in wt. %.

Detritický titanit			Autigenní synchysit-(Ce)			Autigenní TiO ₂			
analýza	1	2	3	analýza	1	2	analýza	1	2
Nb ₂ O ₅	0,19	0,27	0,31	SO ₃	bdl	0,05	Nb ₂ O ₅	0,61	0,55
SiO ₂	29,65	29,77	29,92	P ₂ O ₅	0,07	0,15	SiO ₂	0,23	0,73
TiO ₂	36,65	36,29	35,88	SiO ₂	1,37	1,39	TiO ₂	96,26	94,18
ZrO ₂	0,07	bdl	bdl	TiO ₂	1,24	0,54	ZrO ₂	0,32	0,37
ThO ₂	0,09	0,07	0,06	ZrO ₂	bdl	bdl	Al ₂ O ₃	0,05	0,16
Al ₂ O ₃	1,33	1,33	1,44	ThO ₂	0,55	0,51	Sc ₂ O ₃	0,06	0,06
Fe ₂ O ₃	2,15	1,82	1,82	UO ₂	bdl	bdl	V ₂ O ₃	bdl	0,17
Y ₂ O ₃	bdl	bdl	bdl	Y ₂ O ₃	2,69	2,61	Y ₂ O ₃	bdl	bdl
La ₂ O ₃	0,14	0,09	0,09	La ₂ O ₃	9,72	8,75	La ₂ O ₃	bdl	bdl
Ce ₂ O ₃	0,98	0,59	0,66	Ce ₂ O ₃	19,43	24,51	Ce ₂ O ₃	bdl	0,13
Pr ₂ O ₃	0,16	bdl	0,07	Pr ₂ O ₃	1,97	2,01	Pr ₂ O ₃	bdl	bdl
Nd ₂ O ₃	0,69	0,39	0,42	Nd ₂ O ₃	7,82	7,43	Nd ₂ O ₃	bdl	bdl
Sm ₂ O ₃	0,07	bdl	bdl	Sm ₂ O ₃	1,27	1,33	Sm ₂ O ₃	bdl	bdl
Gd ₂ O ₃	0,17	0,11	0,12	Eu ₂ O ₃	bdl	bdl	Gd ₂ O ₃	bdl	bdl
Dy ₂ O ₃	bdl	bdl	bdl	Gd ₂ O ₃	1,16	1,16	Dy ₂ O ₃	bdl	bdl
MgO	bdl	bdl	0,02	Dy ₂ O ₃	0,52	0,44	MgO	bdl	0,03
CaO	26,94	27,27	27,29	Er ₂ O ₃	bdl	0,12	CaO	0,05	0,16
SnO	0,09	0,09	0,11	CaO	16,73	15,62	FeO	0,41	1,08
Na ₂ O	0,03	bdl	bdl	MnO	bdl	bdl	SnO	bdl	0,04
K ₂ O	0,02	0,02	0,04	FeO	1,98	1,14	Na ₂ O	0,05	0,04
F	0,42	0,47	0,49	SrO	bdl	bdl	K ₂ O	0,02	0,03
Total	99,84	98,58	98,74	PbO	bdl	0,09	F	0,07	0,07
Th ⁴⁺	0,001	0,001	0,000	Na ₂ O	0,08	bdl	Total	99,66	98,57
Y ³⁺	0,000	0,000	0,000	F	4,12	3,75	Y ³⁺	0,000	0,000
La ³⁺	0,001	0,001	0,001	Total	71,58	72,51	La ³⁺	0,000	0,000
Ce ³⁺	0,012	0,007	0,008	S ⁶⁺	0,000	0,000	Ce ³⁺	0,000	0,001
Pr ³⁺	0,002	0,000	0,001	P ⁵⁺	0,011	0,019	Pr ³⁺	0,000	0,000
Nd ³⁺	0,008	0,005	0,005	Zr ⁴⁺	0,000	0,000	Nd ³⁺	0,000	0,000
Sm ³⁺	0,001	0,000	0,000	Th ⁴⁺	0,021	0,019	Sm ³⁺	0,000	0,000
Gd ³⁺	0,002	0,001	0,001	U ⁴⁺	0,000	0,000	Gd ³⁺	0,000	0,000
Dy ³⁺	0,000	0,000	0,000	Y ³⁺	0,246	0,236	Dy ³⁺	0,000	0,000
Ca ²⁺	0,968	0,976	0,976	La ³⁺	0,613	0,551	Ca ²⁺	0,019	0,012
Na ⁺	0,002	0,000	0,000	Ce ³⁺	1,219	1,531	Na ⁺	0,001	0,001
K ⁺	0,001	0,001	0,002	Pr ³⁺	0,123	0,125	K ⁺	0,000	0,001
subtot	0,998	0,992	0,994	Nd ³⁺	0,478	0,453	Nb ⁵⁺	0,004	0,003
Ta ⁵⁺	0,000	0,000	0,000	Sm ³⁺	0,075	0,078	Ti ⁴⁺	0,964	0,953
Nb ⁵⁺	0,003	0,004	0,005	Eu ³⁺	0,000	0,000	Zr ⁴⁺	0,002	0,002
Ti ⁴⁺	0,899	0,912	0,901	Gd ³⁺	0,066	0,065	Al ³⁺	0,001	0,003
Zr ⁴⁺	0,001	0,000	0,000	Dy ³⁺	0,029	0,024	Sc ³⁺	0,001	0,001
Al ³⁺	0,053	0,052	0,057	Er ³⁺	0,000	0,007	V ³⁺	0,000	0,002
Mg ²⁺	0,000	0,000	0,001	Ca ²⁺	3,072	2,856	Mg ²⁺	0,000	0,001
Fe ²⁺	0,049	0,041	0,041	Mn ²⁺	0,000	0,000	Fe ²⁺	0,004	0,011
Sn ²⁺	0,001	0,001	0,001	Sr ²⁺	0,006	0,012	Sn ²⁺	0,000	0,000
subtot	1,006	1,011	1,006	Pb ²⁺	0,000	0,004	Si ⁴⁺	0,003	0,001
Si ⁴⁺	0,994	0,995	0,999	Na ⁺	0,027	0,000	Cat sum	1,000	1,000
Cat sum	3,000	3,000	3,000	Cat sum	6,000	6,000	F ⁻	0,003	0,003
F ⁻	0,045	0,049	0,052	F ⁻	2,005	1,878	O ²⁻	1,979	1,979
O ²⁻	4,938	4,940	4,936				An sum	1,982	1,979
An sum	4,983	4,989	4,988						

TiO₂ fáze (anatas/rutil/brookit) tvoří obvykle nepravidelné mikroporézní agregáty do 20 μm vyplňující společně s kalcitem a REE karbonáty prostor po rozpuštění titanitu (obr. 2a, 2b), případně tvoří drobná zrnka < 2 μm lemující reliktů zatlačovaného titanitu (obr. 2c, 2d). Autigenní TiO₂ fáze obsahuje vedle Ti malé množství Ca (0,25–1,35 hm. % CaO), Fe (0,42–1,41 hm. % Fe₂O₃), Si (0,26–1,07 hm. % SiO₂), Al (0,05–0,42 hm. % Al₂O₃), Nb (0,46–0,61 hm. % Nb₂O₅) a Zr (0,29–0,40 hm. % ZrO₂) (tab. 1). Z REE je v TiO₂ fázi pouze Ce v některých případech nad mezí detekce EMP (do 0,13 hm. % Ce₂O₃). Zatím nebylo ověřeno, o kterou modifikaci TiO₂ se jedná. Na základě potvrzení přítomnosti autigenního anatasu v asociaci s autigenním monazitem v drobných protivanovského souvrství pomocí Ramanovy spektroskopie (Čopjaková et al. 2011) lze předpokládat, že i v případě TiO₂ fáze zatlačující titanit se jedná o anatas.

Autigenní REE karbonáty tvoří obvykle agregáty drobně jehličkovitých až tabulkovitých krystalů o tloušťce do 20 μm a maximální délce 60 μm. Někde jsou krystaly drobné, téměř nerozpoznatelné a lemují okraje rozpuštěného reliktu titanitu (obr. 2c), jindy nejsou REE minerály přítomny vůbec (obr. 2d). Kalcit, jenž se s REE karbonáty často vyskytuje v asociaci, obvykle vyplňuje prostory mezi jednotlivými jehlicemi. Všechny analyzované REE karbonáty odpovídají svým chemismem synchysitu-(Ce) se strukturálním vzorcem CaCe(CO₃)₂F, tedy poměr Ca:REE se blíží 1:1 (tab. 1). Naměřené obsahy se při přepočtu na 6 kationů pohybují od 2,9–3,2 apfu Ca a 2,6–3,1 apfu REE. Obsah F se pohybuje v rozmezí 2,02–2,67 apfu (3,02–4,56 hm. % F), F tedy dominuje nad OH. V distribuci REE je patrné obohacení o LREE a negativní Eu anomálie (obr. 3b). Poměr La_N/Gd_N kolísá v poměrně úzkém rozmezí 6,2–8,0. Zvýšený je obsah Th (0,17–0,55 hm. % ThO₂), který převažuje nad U (≤ 0,15 hm. % UO₂).

Chlorit ojediněle zatlačuje titanit, který tvoří nepravidelné reliktů uvnitř chloritu (obr. 2d). Chemické složení chloritu nebylo studováno.



Obr. 2: Detritické titanity z drob Drahanské vrchoviny v BSE obraze; a – relikt detritického titanitu, z velké části zatlačeného kalcitem, TiO_2 a REE karbonáty; b – silně alterované zrno titanitu vykazující známky rozpouštění od okraje a podél prasklin a doprovázené vznikem kalcitu, TiO_2 a REE karbonátů; c – zrno detritického titanitu podél okraje zatlačované kalcitem, TiO_2 a REE karbonáty; d – relikt detritického titanitu zatlačené chloritem a TiO_2 . Použité zkratky pro minerály jsou podle Whitney – Evans (2010). REE – karbonáty vzácných zemin (synchysit); TiO_2 – blíže neidentifikovaná TiO_2 fáze.

Fig. 2: BSE images of detrital titanite; a – relics of detrital titanite, which is intensively replaced by calcite, TiO_2 and REE carbonates; b – intensively altered titanite showing dissolution from rim and along fractures with newly formed calcite, TiO_2 and REE carbonates; c – detrital titanite replaced along rim by calcite, TiO_2 and REE carbonates; d – relics of detrital titanite replaced by chlorite and TiO_2 . Used abbreviations according to Whitney – Evans (2010). REE – REE carbonates (synchysite); TiO_2 – undefined TiO_2 phase.

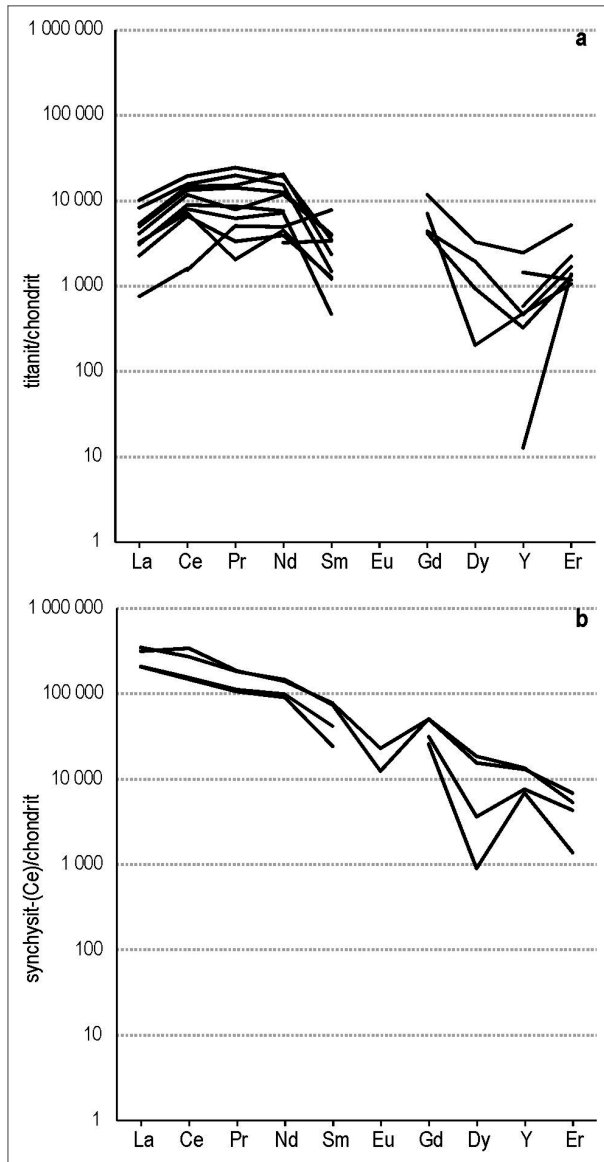
Diskuze a závěry

Detritický titanit v drobách protivanovského souvrství byl rozpouštěn a zatlačován kalcitem + TiO_2 fází ± synchysitem-(Ce) případně chloritem + TiO_2 fází. Na základě texturních pozorování v BSE obraze lze jednoznačně vyvodit, že procesy alterace titanitu jsou autigenního původu a alterace proběhla uvnitř sedimentární pánve. Alteraci titanitu ve zdrojových horninách lze vyloučit, neboť takto alterovaná zrna titanitu by se při transportu rozlámala v alteračních zónách. Horie et al. (2008) pozorovali při alteraci detritického titanitu v tufech jeho částečnou rekrystalizaci. Novotvořené domény titanitu jsou oproti nealterovaným doménám ochuzené o Ti a obohacené o Ca, Al, Fe a Pb.

Na základě složení autigenních minerálů (synchysit-(Ce), kalcit, rutil/anatas atd.) můžeme předpokládat, že diagenetická fluida, která se podílela na alteraci titanitu, byla na CO_2 , F a Ca relativně bohatá. Pan et al. (1993) uvedli, že titanit je stabilní v nízkoteplotních hydrotermálních fluidech s nízkým obsahem CO_2 a vysokým obsahem H_2O . Fluida s vysokým obsahem CO_2 jsou považována

za hlavní příčinu rozpouštění titanitu i v magmatických horninách (Pan et al. 1993; Morad et al. 2009; Middleton et al. 2013). Maximální teploty v důsledku hlubokého pohřbení sedimentů v oblasti protivanovského souvrství dosáhly 250–300 °C, což odpovídá podmínkám velmi slabé metamorfózy (Čopjaková et al. 2011). K alteraci titanitu v drobách tedy docházelo maximálně za teplot 250–300 °C. Horie et al. (2008) uvedli, že k hydrotermální alteraci titanitu v alkalickém prostředí může docházet za teploty nižší než 200 °C. V granitoidních horninách, kde k alteracím titanitu může docházet ve větším teplotním rozmezí a často za vyšších teplot, byla popsána větší variabilita alteračních produktů po magmatickém titanitu. K nejčastějším produktům alterace magmatických titanitů patří anatas, křemen, synchysit, monazit, xenotim, kalcit nebo bastnäsit (Pan et al. 1993; Middleton et al. 2013), ale také allanit, rutil, apatit (Pan et al. 1993) nebo i chlorit (Morad et al. 2009).

Autigenní TiO_2 (anatas/rutil/brookit) vytváří většinou menší, porézni zrnka při okraji zrn detritického



Obr. 3: Chondritem normalizované obsahy prvků vzácných zemin v detritických titanitech (a) a autigenních REE karbonátech (b). Normalizováno chondritem McDonough – Sun (1995).
 Fig. 3: Chondrite normalized REE patterns in detrital titanite (a) and authigenic REE carbonates (b). Chondrite after McDonough – Sun (1995).

titanitu. TiO_2 fáze vzniká z Ti uvolněného při rozpouštění detritického titanitu. Titan je považován za nemobilní prvek, přesto někteří autoři (Rubin et al. 1993; Van Baalen 1993) popisují transport Ti v horninovém prostředí při působení hydrotermálních fluid až na vzdálenost 1 m od jeho zdroje. Rozpustnost Ti vzrůstá v kyselém a alkalickém prostředí (Van Baalen 1993).

Autigenní synchysit-(Ce) je ve srovnání s detritickým titanitem chemicky homogenní, s úzkým rozsahem obsahů REE a Y i jednotným tvarem normalizovaných REE křivek, z čehož lze usuzovat, že vznikal v úzkém rozmezí chemického složení systému a P-T podmínek. Vznik autigenního synchysitu-(Ce) po detritickém titanitu je odrazem zejména obsahu REE v titanitu a míry alterace titanitu. Vyšší podíl autigenního synchysitu-(Ce) vzniká v okolí intenzivně alterovaného detritického titanitu s vyššími obsahy REE (obr. 2a, 2b). Malý podíl autigenního synchysitu-(Ce), případně jeho nepřítomnost, byla pozorována v okolí detritického titanitu, který vykazuje malou míru rozpouštění (obr. 2c), nebo ve vazbě na titanit, v němž byl obsah REE nízký, i když objem rozpuštěného titanitu byl výrazný (obr. 2d).

Autigenní REE karbonáty upřednostňují lehké vzácné zemin (LREE) před těžkými vzácnými zeminami (HREE) a ve srovnání s detritickým titanitem mají tedy jejich REE-křivky výrazně strmější sklon (obr. 3). Tato pozorování indikují, že LREE uvolněné při hydrotermální alteraci detritického titanitu byly přednostně inkorporovány do struktury synchysitu-(Ce), zatímco HREE byly patrně mobilizovány diagenetickými fluidy. Výsledky v práci Pan et al. (1993) rovněž indikovaly, že LREE vstupovaly do novotvořených minerálů (monazit, allanit), zatímco HREE byly rovněž transportovány mimo minerální asociaci.

Ačkoli křemen nebyl nikdy přítomen v asociaci autigenních fází zatlačujících titanit, lze předpokládat, že Si uvolněný při rozpouštění titanitu se spolupodílí na tvorbě autigenního křemitého tmelu, který je všudypřítomný v základní hmotě drob.

Poděkování

Práce vznikla s podporou specifického výzkumného programu Masarykovy univerzity MUNI/A/1005/2013.

Literatura

- Čopjaková, R. (2007): Odras změn provenience v psefitické a psamitické frakci sedimentů mysejovického souvrství. – MS, disertační práce, PřF MU, 137, Brno.
- Čopjaková, R. – Novák, M. – Franců, E. (2011): Formation of authigenic monazite-(Ce) to monazite-(Nd) from Upper Carboniferous graywackes of the Drahany Upland: Roles of the chemical composition of host rock and Burian temperature. – *Lithos*, 127, 373–385.
- Dvořák, J. (1973): Synsedimentary tectonics of the Paleozoic of the Drahany Upland (Sudeticum, Moravia, Czechoslovakia). – *Tectonophysics*, 17, 359–391.
- Deer, W. A. – Howie, R. A. – Zussman, J. (1982): Rock forming minerals. Orthosilicates vol. 1A. – Longman, London, 443–466. 936 str.
- Franke, W. (1989): Tectonostratigraphic units in the Variscan belt of central Europe, in: Dalmeyer, R. D. (ed.): Terranes in the circum-Atlantic Paleozoic orogens. – *Geological Society of America Special Paper*, 230, 67–90.
- Hartley, A. J. – Otava, J. (2001): Sediment provenance and dispersal in a deep marine foreland basin: the Lower Carboniferous Culm Basin, Czech Republic. – *Journal of the Geological Society*, 158, 137–150.
- Horie, K. – Hidaka, H. – Gauthier-Lafaye, F. (2008): Elemental distribution in apatite, titanite and zircon during hydrothermal alteration: Durability of immobilization mineral phases for actinides. – *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 962–968.
- McDonough, W. F. – Sun, S. S. (1995): Composition of the Earth. – *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- Middleton, A. W. – Förster, H.-J. – Uysal, I. T. – Golding, S. D. – Rhede, D. (2013): Accessory phases from the Soultz monzogranite, Soultz-sous-Forêts, France: Implications for titanite destabilisation and differential REE, Y and Th mobility in hydrothermal systems. – *Chemical Geology*, 335, 105–117.
- Mísař, Z. – Dudek, A. – Havlena, V. – Weiss, J. (1983): Geologie ČSSR I. Český masív. – SPN Praha, 336 str.
- Morad, S. – El-Ghali, M. A. K. – Caja, M. A. – Al-Ramadan, K. – Mansurbeg, H. (2009): Hydrothermal alteration of magmatic titanite: Evidence from Proterozoic granitic rocks, Southeastern Sweden. – *The Canadian Mineralogist*, 47, 4, 801–811.
- Pan, Y. – Fleet, M.E. – Macrae, N. D. (1993): Late alteration in titanite (CaTiSiO₅): Redistribution and remobilization of rare earth elements and implications for U/Pb and Th/Pb geochronology and nuclear waste disposal. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 355–367.
- Pough, F. H. (1934): Octahedrite as an alteration product of titanite. – *American Mineralogist*, 19, 599–602.
- Raade, G. (1969): Cavity minerals from the Permian biotite granite at Nedre Eiker church. – *Norrs Geologisk Tidsskrift*, 49, 227–239.
- Rubin, J. N. – Henry, C. D. – Price, J. G. (1993): The mobility of zirconium and other “immobile” elements during hydrothermal alteration. – *Chemical Geology*, 110, 29–47.
- Schulmann, K. – Gayer, R. (2000): A model for a continental accretionary wedge developed by oblique collision: the NE Bohemian Massif. – *Journal of the Geological Society*, London, 157, 401–406.
- Van Baalen, M. R. (1993): Titanium mobility in metamorphic systems: a review. – *Chemical Geology*, 110, 233–249.
- Whitney, D. L. – Evans, B. W. (2010): Abbreviations for names of rock-forming minerals. – *American Mineralogist*, 95, 185–187.
- Zachovalová, K. (2003): Valouny magmatitů spodnokarbonských slepenců – indikátory geotektonického prostředí. – MS, disertační práce, PřF MU, 148 str. Brno.