

## PSEUDOMORFÓZY Fe-VERMIKULITU PO KRYSTALECH BIOTITU Z GRANODIORITŮ BRNĚNSKÉHO MASIVU - KRYSTALOCHEMIE, INKLUZE A ALTERACE

Fe-VERMICULITE PSEUDOMORPHS AFTER BIOTITE CRYSTALS FROM GRANODIORITES  
OF THE BRNO MASSIF - CRYSTAL CHEMISTRY, MINERAL INCLUSIONS AND ALTERATION

PROKOP JIŘÍ, LOSOS ZDENĚK, GADAS PETR, VŠIANSKÝ DALIBOR

### Abstract

Prokop, J., Losos, Z., Gadas, P., Všianský, D. (2012): Pseudomorfózy Fe-vermikulitu po krystalech biotitu z granodioritů brněnského masivu - krystalochemie, inkluze a alterace. - Acta Mus. Moraviae, Sci. geol., 97, 1, 3-24.

*Fe-vermiculite pseudomorphs after biotite crystals from granodiorites of the Brno Massif - crystal chemistry, mineral inclusions and alteration*

The occurrence of columnal euhedral „biotite“ crystals with focus on their crystallochemical properties, mineral inclusions and alteration products from granodioritic rocks of the „Kralovo Pole“ unit, Brno Massif, have been studied. Micromorphological descriptions, microprobe analysis and X-ray powder diffraction were used to investigate the chemical and structure changes and the mechanism of biotite breakdown into Fe-rich vermiculite during the alteration processes.

Apatite, ilmenite, magnetite, K-feldspar and oligoclase (plagioclase I) that developed at stages of magma crystallization represent the most abundant mineral inclusions in vermiculitized biotite crystals. Growth of secondary inclusions, represented by Fe-oxihydroxides, albite (plagioclase II), rutile and titanite, was caused by a low-temperature hydrothermal reactions.

Biotite alteration products display a wide range of chemical compositions. Two main types of alteration products have been distinguished. Textural relationships suggest that the prevailing alteration type I is isovolumetric, without the evidence of apparent chemical zonal distribution and it primarily involves exchange of the interlayer K. The empirical formulae indicates that the altered biotite is essentially relatively free of octahedral Al, and that the tetrahedral sheets of biotite have a similar Si:Al ratio.

From the structural point of view, it is evident that only vermiculite is the alteration product of biotite crystals. On the basis of X-ray diffraction data, mixed structures are not present there.

During alteration type II some phases develop along cleavage planes, initially near the edges of biotite crystal, but then strongly permeating into the body and subdivided segments. This process involves intensive cation exchange generally resulting in the decrease in interlayer K, Fe<sup>VI</sup>, Al<sup>VI</sup> and increase in interlayer Ca and tetrahedral Si. The values of octahedral Mg and Al are variable.

*Key words:* biotite crystals, pseudomorphs, vermiculite, granodiorite, Brno Massif, alteration, Bohemian Massif  
Jiří Prokop, Zdeněk Losos, Petr Gadas: Ústav geologických věd, přírodovědecká fakulta, Masarykova  
Universita, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Česká republika; e-mail: 175358@sci.muni.cz, losos@sci.muni.cz  
Dalibor Všianský: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., Hněvkovského 65, 617 00 Brno, daliborv@centrum.cz

## ÚVOD

Biotit je významným horninotvorným minerálem, který se v prostředí granitoidních hornin nejčastěji vyskytuje v podobě pseudohexagonálních tabulek nebo xenomorfních šu-

pinek. Podobně je tomu i ve většině granitoidů brněnského masivu. Místy se však v granodioritech typu Královo Pole můžeme setkat se zajímavým fenoménem v podobě lokálního výskytu pseudohexagonálních automorfních krystalů „biotitu“ sloupečkovitého habitu, dosahujících rozměrů až několika cm (obr. 1). Tyto již makroskopicky vykazují pokročilý stupeň alterace (zejména ztráta typické barvy a lesku biotitu).

Pojem biotit je nutno chápat jako zažité označení pro mafickou, hořečnato-železnatou trioktaedrickou slídu. RIEDER *et al.* (1998) definoval minerály skupiny biotitu jako trioktaedrické slídy, jejichž složení odpovídá a nebo kolísá mezi složením jednotlivých koncových členů tj. flogopitu  $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ , annitu  $\text{KFe}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ , eastonitu  $\text{KMg}_2\text{Al}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2$  a siderofylitu  $\text{KFe}_2\text{Al}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ . Obecný vzorec minerálů skupiny biotitu je  $\text{I M}_{2-3} \square_{1-0} \text{T}_4 \text{O}_{10} \text{A}_2$  v němž do pozice I kromě převládajícího K může vstupovat také Ca, Na, Cs,  $\text{NH}_4$ , Rb a Ba, do pozice M zejména Mg, Fe, Mn, Zn, Al, Cr, V a Ti, v tetraedrické pozici T se objevuje Si, Al,  $\text{Fe}^{\text{III}}$ , Be, Al, B a  $\square$  představuje vakanci, aniontová skupina A je pak zastoupena hlavně OH, F, Cl a O (viz. též DEER *et al.* 1962, DEER *et al.* 1996, FLEET 2003).

Studiu sloupečkovitých krystalů „biotitu“ a jeho přeměn nebylo dosud věnováno příliš pozornosti a tudíž chybí publikovaná analytická data. CEHÁK a ZEMAN (1960) označují sloupečkovitý biotit z granodioritu typu Královo Pole orientačně jako vermikulit. Na základě měření hustoty a termické analýzy klasifikovala STRAKOVÁ-JOHNOVÁ (1973) ve své diplomové práci hmotu krystalů jako vermikulit a chlorit.

Cílem předložené práce je podrobný výzkum zmíněných krystalů „biotitu“ v granitoidě brněnského masivu (slavkovském teránu), se zaměřením na stupeň a charakter jeho alterace, ale také na uzavírané minerální inkluze.



Obr. 1. Pseudohexagonální sloupečky „biotitu“ z granodioritu typu Královo Pole. Foto: J. Prokop, 2009.  
Fig. 1. Pseudohexagonal „biotite“ columns from the Kralovo Pole granodiorite. Photo: J. Prokop, 2009.

## STRUČNÁ GEOLOGIE BRNĚNSKÉHO MASIVU

Brněnský masiv představuje těleso krystalinických hornin kadomského stáří (FINGER *et al.* 1995). Celý masiv se tradičně dělí do tří pruhů podle převládajícího typu hornin. Ve směru od západu k východu to jsou: západní granitoidní část, metabazitová zóna (metadioritová a metabazaltová subzóna) a východní granitoidní část (ZAPLETAL 1931, MÍSAŘ 1965, DUDEK 1980, ŠTELCL *et al.* 1986, HANŽL *et al.* 2000).

V dnešní době se stále více uplatňuje interpretace založená na geochemické odlišnosti západní a východní granitoidní části a brněnský masiv bývá nově označován jako brněnské poloookno, odkrývající dva různé granitoidní plutony, které jsou odděleny severojižním pásem prekambriických metavulkanitů a gabroidů (obr. 2) (HANŽL *et al.* 1995, LEICHMAN *et al.* 1996, HANŽL a MELICHAR 1997, FINGER a PIN 1997, FINGER *et al.* 2000a).

Západní část brněnského masivu se na základě nových poznatků označuje jako dyjský terán (dyjsko-ivančický pluton), východní část jako slavkovský terán (slavkovský pluton). Stáří obou plutonů se pohybuje mezi 560 a 600 Ma (HANŽL a MELICHAR 1997, FINGER *et al.* 2000, FINGER *et al.* 2000a, FRIEDL *et al.* 2004). Horninové složení západní části reprezentují granity, granodiority a diority, představující vyvinutější horniny magmatického oblouku nebo aktivního kontinentálního okraje, se složením blízkým S-typovým granitům. Na základě genetické příbuznosti se v současné době využívá dělení na tři suity: Réna, Tetčice a Hlína.

Ve východní části (slavkovský terán) se vyskytují amfibolové až amfibol-biotitové křemenné diority až granodiority, které lze interpretovat jako granitoidy primitivního vulkanického oblouku s afinitou k I-typovým granitům. Východní část brněnského masivu se nachází mezi SV částí Brna a Boskovicemi a jednotlivé typy granodioritů jsou označeny dle místa typických výskytů - typ: Doubravice, Blansko a Královo Pole (HANŽL *et al.* 2000).

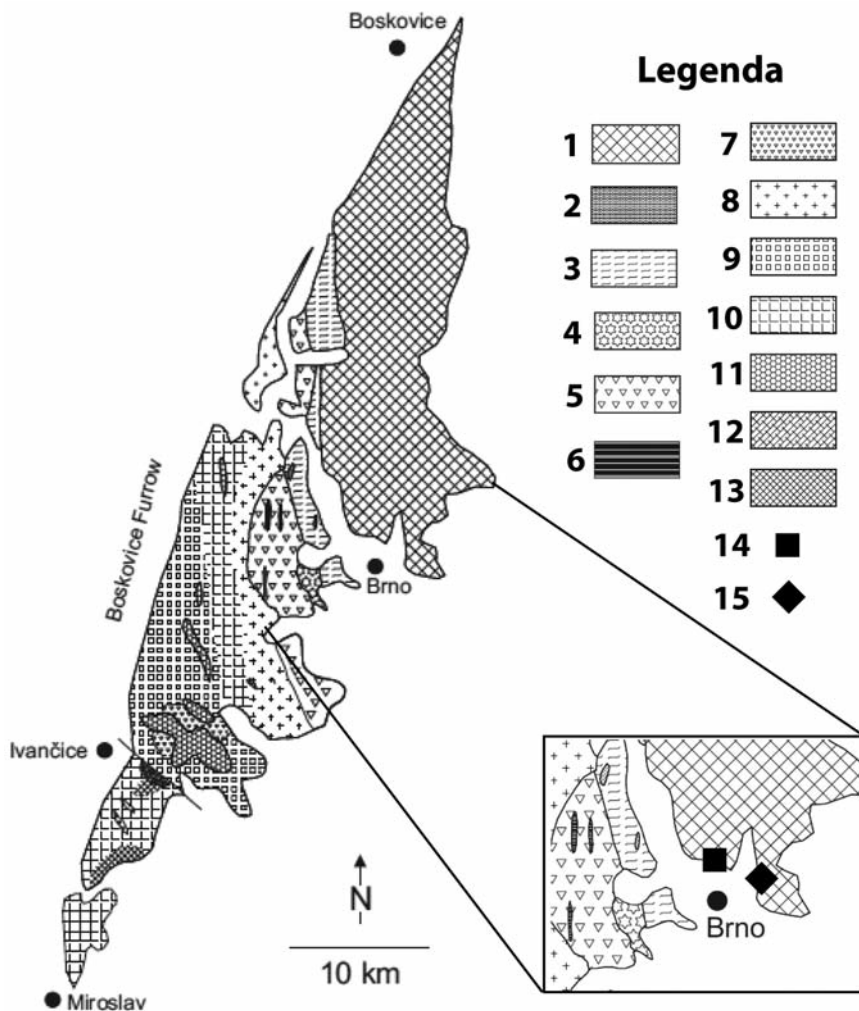
### CHARAKTERISTIKA MATEČNÉ HORNINY A STUDOVANÝCH LOKALIT

Sloupečkovité „biotity“ byly v brněnském masivu popsány pouze z granodioritů typu Královo Pole, které vystupují převážně v severovýchodní části Brna a to především v Židenicích, Králově Poli, Husovicích a Obřanech (BURKART 1953, KRŮTA 1966). Dále pak v okolí Mokré Hory, Vranova a Útěchova. Horniny mají narůžovělou barvu, bývají středně zrnité až drobnozrnité s hypautomorfně zrnitou strukturou a představují typické metaaluminické horniny s hodnotou A/CNK 0,89. Ve srovnání s okolními horninami a především s granitoidy západní části (dyjský terán), mají nižší poměr  $K_2O/Na_2O$  (0,50), což je dáno zejména nižším zastoupením K-živce (11 obj. %) v tomto typu granodioritu. Množství CaO, které činí 3,25 hm. %, odráží vyšší zastoupení plagioklasu (53 obj. %). Obsah biotitu dosahuje až 6,1 obj. % (ŠTELCL *et al.* 1986).

Na minerálním složení hornin se podílejí automorfně až xenomorfně omezené plagioklasy ( $AN_{20-30}$ ), které bývají polysynteticky zdvojitěné. Zrna plagioklasů dosahují velikosti kolem 3 mm a jsou často postižena sericitizací. Křemen bývá omezen xenomorfně a zpravidla undulózně zřásá. K-živce dosahují velikosti kolem 4 mm a často bývají perthitické. Maximálně 5 mm velké lupínky biotitu bývají světle hnědé, pleochroické a plasticky deformované. Lokálně se biotity z královopolského granodioritu vyskytují v podobně až 1 cm velkých sloupečkovitých krystalů pseudohehexagonálního habitu. Akcesorické minerály jsou zastoupeny apatitem, zirkonem, titanitem, rutilem a drobnými zrnky opakních minerálů. Sekundární klintzoisit a kalcit vyplňují drobné žilky, jež místy pronikají granodioritem.

Studovány byly vzorky sloupečkovitého „biotitu“ ze dvou lokalit (obr. 2). V roce 1990 byly granodiority typu Královo Pole odkryty během stavebních úprav v městské části Brno-Židenice. Pseudohehexagonálně omezené sloupečky „biotitu“, které z nich byly odebrány, do-

sahovaly v průměru šířky až 11 mm a výšky do 22 mm. V městské části Brno-Líšeň lze v zářezu silnice č. 373 vedoucí z Brna na Ochoz, sledovat odkryv narůžovělých královopoských granodioritů, rovněž obsahujících sloupečkovité biotity. Z této, do hloubky až několika metrů navětralé horniny, byly opět odebrány až 1 cm velké krystaly.



Obr. 2. Schematická mapa brněnského masivu (modifikováno podle LEICHMANN - HÖCK 2008). Vysvětlivky: 1 - křemenné diority, tonality, granodiority, 2 - felsické vulkanity, 3 - bazalty, 4 - trondhjemity, 5 - diority a gabra, 6 - ultramafické horniny, 7 - granátové leukokratické granity, 8 - červené granity, 9 - přechodná zóna mezi červenými a šedými granit až granodiority, 10 - šedé, jemnozrné, biotitové granodiority, 11 - amfibol-biotitové granodiority, 12 - biotitové granity až granodiority, 13 - diority, 14 - místo odběru/Brno-Židenice, 15 - místo odběru/Brno-Líšeň.

Fig. 2. Map of the Brno batholith (modified after LEICHMANN - HÖCK 2008). Legend: 1 - quartz diorites, tonalites, granodiorites, 2 - felsic volcanics, 3 - Basalts, 4 - Trondhjemites, 5 - Diorites and Gabbros, 6 - ultramafics, 7 - Garnät-bearing leukogranites, 8 - red granites, 9 - transition zone between red and gray granites, 10 - gray, fine-grained, biotite-bearing granodiorites, 11 - Amphibole-biotite-bearing granodiorites, 12 - Biotite-bearing Granites-Granodiorites, 13 - Diorites, 14 - place of sampling/Brno-Židenice, 15 - place of sampling/Brno-Líšeň.

## METODIKA

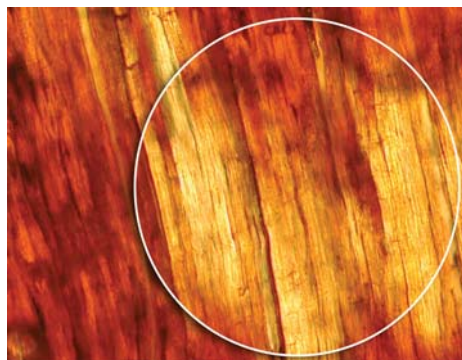
Leštěné výbrusy sloupečkovitých krystalů „biotitu“ byly zhotoveny v orientovaných řezech rovnoběžně a kolmo na vertikálu krystalu (připravil J. Povolný na ÚGV PřF MU). K mikroskopickým pozorováním byl použit polarizační mikroskop JENALAB firmy ZEISS Germany.

Pro analýzu na elektronové mikrosondě (EMA) byly výbrusy nejprve napařeny uhlíkem. Následně vlnově disperzní (WDX) bodové analýzy chemismu jednotlivých fází provedl na přístroji Cameca SX 100 P. Gadas na společném pracovišti elektronové mikroskopie a mikroanalýzy ÚGV PřF MU v Brně a České geologické služby v Brně za následujících podmínek: urychlovací napětí 15 kV, proud 10–20 nA a průměr svazku 1 až 5  $\mu\text{m}$ . Naměřená data byla upravena PAP korekcí (POUCHOU a PICHOU 1985). Získané obsahy ve formě váhových % oxidů byly zpracovány pomocí programu MS Excel.

K práškové RTG-difrakční analýze (XRD) byl použit sloupečkovitý krystal „biotitu“ z lokality Brno-Líšeň po separaci pod binokulární lupou, vzorek byl podrcen v achátové misce. Tentýž vzorek byl opakovaně analyzován před a po zahřátí na 500 °C po dobu jedné hodiny. Difrakční záznamy pořídil D. Všianský ve Výzkumném ústavu stavebních hmot na aparatuře Bruker D8 Advance s Cu anodou ( $\lambda K\alpha = 1,54184 \text{ \AA}$ ) a variabilními divergenčními clonami při  $\Theta$ - $\Theta$  reflexní Bragg-Brentano parafokusační geometrii. Krok - 0,02°2 $\Theta$ , čas na krok - 188 s.

## OPTICKÉ STUDIUM KRYSTALŮ „BIOTITU“

Sloupečkovité „biotity“ v granodioritech typu Královo Pole tvoří automorfní, pseudo-hexagonální krystaly. Poměr výška/šířka krystalu je většinou 2/1. Méně alterované partie krystalu bývají při mikroskopii s jedním nikolem výrazně pleochroické, hnědé až červenohnědé podle Y a Z, podle X jsou světle žlutohnědé až žlutohnědé. Běžně lze mikroskopicky sledovat přeměnu, která se projevuje zesvětlením postižených partií krystalu (obr. 3). I takto alterované části „biotitu“ stále vykazují slabý pleochroismus. Podél trhlin štěpnosti „biotitu“ lze v řezu kolmém na vertikálu krystalu často pozorovat podélné, vřetenovité útvary tvořené mladšími sekundárními minerály. „Biotit“ rovněž uzavírá řadu primárních minerálů, vzniklých během krystalizace magmatu. Většinou se jedná o plagioklas, ale neměně často také krystalky apatitu a ilmenitu. Vzácnější jsou inkluze zirkonu, magnetitu a titanitu.



Obr. 3. Detail alterace sloupečkovitého biotitu projevující se zesvětlením postižené části, v řezu kolmém na štěpnost, PPL, 40  $\times$ . Foto: J. Prokop.

Fig. 3. Detail of the columnar biotite crystal alteration causing the lightening of the affected section, perpendicular to the cleavage, single polars, magnification  $\times 40$ . Photo: J. Prokop.



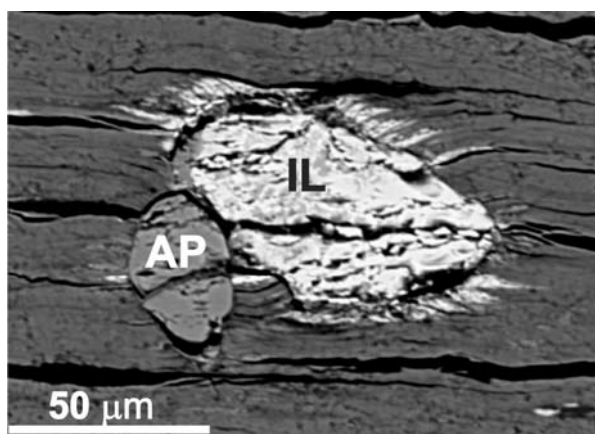
## MINERÁLNÍ INKLUZE V KRYSTALECH „BIOTITU“

### Apatit

Apatit tvoří xenomorfní až automorfní, krátce nebo dlouze prizmatické krystalky. Empirický vzorec se blíží koncovému fluorapatitu (tab. 1). Z minoritních prvků se objevují především Fe, Si a případně také Mn. Obsah těchto prvků však nepřesahuje hodnoty 0,0X apfu.

### Ilmenit

Tento minerál vytváří drobná zrna a lišty v „biotitu“, které často asociují se starším, automorfně i xenomorfně omezeným apatitem (obr. 4). Některá zrna ilmenitu bývají podél okrajů limonitizována. Významná je vysoká příměs pyrofanitové komponenty v množství 23–30 % apfu (tab. 1). Geikielitová složka není zastoupena. V ilmenitech se často vyskytují odmiššeniny rutilu a hematitu, což je pro pomaleji chladnoucí taveniny hlubinné krystalizace typické.



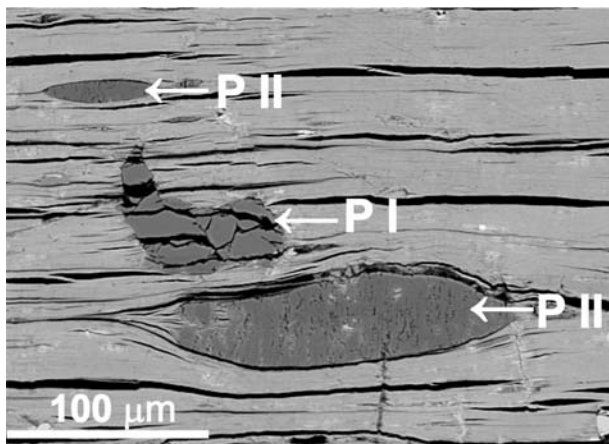
Obr. 4. Nehomogenní, xenomorfně omezený ilmenit (IL) v biotitu s limonitizací na okrajích zrna. Xenomorfně omezené zrno apatitu (AP), Brno-Líšeň; odražené elektrony (BSE). Foto: P. Gadas.

Fig. 4. Inhomogenous, xenomorphic ilmenite (IL) in biotite. Ilmenite shows limonitization along the rims. Xenomorphic apatite grain (AP), Brno-Lisen; back-scattered electrons (BSE). Photo: P. Gadas.

### Plagioklas

Plagioklasy, uzavírané v krystalech biotitu, se vyskytují ve dvou typech (P I a P II), které se od sebe liší tvarem a pozicí, velikostí a postavením v posloupnosti krystalizace. Plagioklas prvního typu (P I) byl pozorován ve formě hypautomorfních až xenomorfních a výrazně rozpraskaných zrn nebo inkluzí (obr. 5), zarostlých v nahodilé orientaci v krystalech biotitu. V plagioklasu typu I převládá albitová komponenta (An 19 %) a jeho chemické složení odpovídá oligoklasu. Plagioklas II (P II) orientovaně vyplňuje štěpné trhliny biotitu a vytváří čočky o rozměrech až 40×300 µm. Plagioklas druhého typu je v porovnání s plagioklasem I kyselejší a odpovídá svým složením albitu (An 0,7 %) se zanedbatelným zastoupením ortoklasové komponenty (tab. 1).

Zatímco plagioklas I vznikl během krystalizace z magmatu a svým složením dobře odpovídá chemickému složení horninotvorného plagioklasu (An 20–30 %) okolního granodioritu (ŠTELCL *et al.* 1986), je původ plagioklasu II pravděpodobně spjat s působením nízkoteplotních hydrotermálních fluid.



Obr. 5. BSE obraz dvou forem uzavření plagioklasu (P I a P II) v biotitu. Plagioklas I (P I) představuje starší, neorientovaný kataklazovaný oligoklas. Plagioklas II (P II) představuje mladší vřetenovitý albit, vyplňující stěpnou trhlinu biotitu, Brno-Židenice; BSE; foto P. Gadas.

Fig. 5. Back-scattered electron (BSE) image illustrating two different forms of plagioclase inclusions (P I and P II) in biotite. Plagioclase I (P I) represents an older, unoriented cataclased oligoclase. Plagioclase II (P II) represents a newly formed fusiform albite, distributed along biotite cleavage; Brno-Židenice; BSE; photo P. Gadas.

### Fe-oxidhydroxidy

Štěpné trhliny a rozličné poruchy biotitového krystalu bývají často prostoupeny limonitem, který dále může obklopovat zrna uzavíraných Fe-minerálů. Především okraje ilmenitů bývají pravidelně limonitizovány. Pravděpodobným zdrojem Fe pro sekundární Fe-oxidy a hydroxidy v biotitu mohou být jak uzavírané Fe-Ti minerály, tak především samotný biotit.

### Další minerální inkluze

V menší míře, ve srovnání s výše charakterizovanými inkluzemi, biotit uzavírá také další minerály. Mezi ně patří zejména K-živce, který tvoří automorfní až hypautomorfní krystaly dosahující velikosti zhruba 100×100 μm, popřípadě je K-živcem nahrazován starší plagioklas. Z rudních minerálů se objevuje magnetit v podobě převážně izometrických zrn o velikosti řádově prvních stovek μm s xenomorfním až automorfním omezením. Rutil tvoří odmišleniny v magnetitu nebo ilmenitu. Dále lze v biotitu pozorovat drobná, zaoblená zrnka zirkonu a titanitu. Titanit zřejmě vznikl jak v ranné fázi krystalizace, tak sekundárním uvolňováním Ti z biotitu.

Tabulka 1. Reprezentativní chemické analýzy minerálních inkluzí v krystalech „biotitu“.

Table 1. Representative chemical analyses of mineral inclusions in „biotite“ crystals.

vzorek č.	6 apatit	5 ilmenit	17 ilmenit	18 ilmenit	1 plagioklas I	2 plagioklas II
hm. % – wt. %						
SiO <sub>2</sub>	0,19	1,61	0,08	0,01	63,77	67,89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40,44	n.d.	n.d.	n.d.	0,01	0,01
TiO <sub>2</sub>	n.d.	51,41	49,61	48,30	n.d.	n.d.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.d.	0,44	0,01	b.d.	22,69	19,44
FeO	0,55	29,89	39,12	36,21	0,42	1,57
MnO	0,11	13,68	10,48	13,47	n.d.	n.d.
MgO	0,03	0,15	0,01	0,03	n.d.	n.d.
CaO	56,03	0,81	0,08	0,09	4,01	0,15
Na <sub>2</sub> O	0,03	n.d.	n.d.	n.d.	9,50	11,43
K <sub>2</sub> O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,34	0,13
BaO	b.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,02	b.d.
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.d.	b.d.	0,01	b.d.	n.d.	n.d.
F	2,84	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cl	0,06	n.d.	n.d.	n.d.	b.d.	b.d.
Total	100,49	97,98	99,40	98,10	100,76	100,63
vzorek č. sample No.	6 apatit	5 ilmenit	17 ilmenit	18 ilmenit	1 plagioklas	2 plagioklas
apfu						
Si	0,016	0,042	0,002	0,000	2,796	2,962
P	2,916	n.d.	n.d.	n.d.	0,000	0,000
Ti	n.d.	0,996	0,944	0,931	n.d.	n.d.
Al	n.d.	0,013	0,000	b.d.	1,173	1,000
Fe <sup>2+</sup>	0,039	0,644	0,721	0,637	0,015	0,057
*Fe <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,107	0,138	0,000	0,000
Mn	0,008	0,299	0,225	0,292	n.d.	n.d.
Mg	0,004	0,006	0,000	0,001	n.d.	n.d.
Ca	5,113	n.d.	n.d.	n.d.	0,188	0,007
Na	0,005	n.d.	n.d.	n.d.	0,808	0,967
K	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,019	0,007
Ba	b.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,000	b.d.
Ce <sup>3+</sup>	0,007	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cr	n.d.	b.d.	0,000	b.d.	n.d.	n.d.
sum cat.	8,108	2,000	2,000	2,000	8,000	8,000
F	0,765	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cl	0,009	n.d.	n.d.	n.d.	b.d.	0,000
O	12,226	3,000	3,000	3,000	5,000	5,000
sum an.	13,000	3,000	3,000	3,000	5,000	5,000
* vypočteno ze stechiometrie – calculated from stoichiometry n.d. = neanalyzováno – not analyzed b.d. = pod mezí detekce – below detection limit						



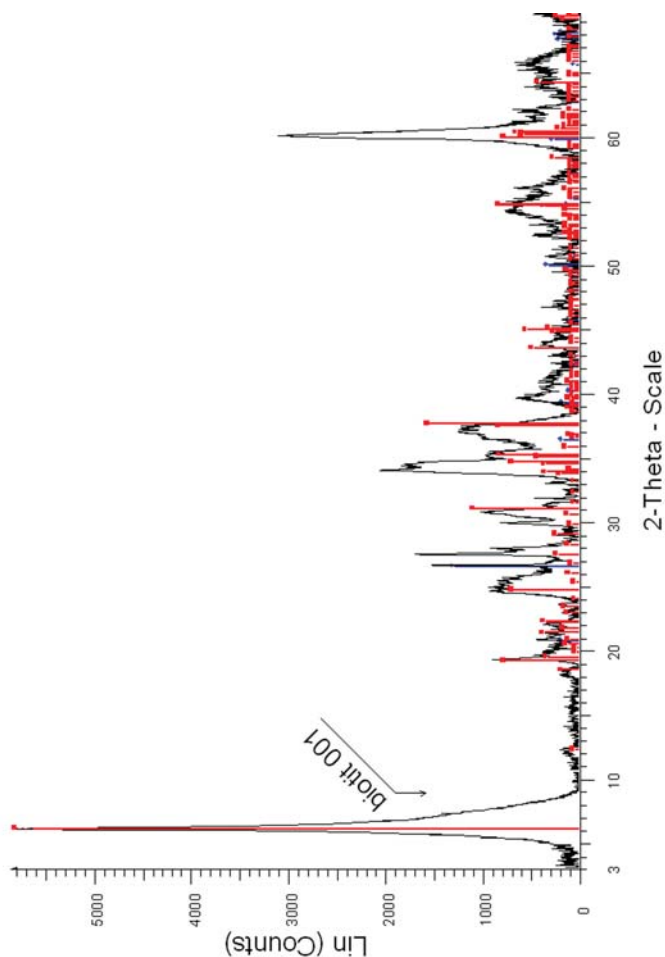
## RTG-DIFRAKCE

Analyzován byl sloupečkovitý krystal „biotitu“ z lokality Brno Líšeň (obr. 6) a tentýž vzorek opakovaně načten po zahřívání na 500 °C po dobu jedné hodiny.

Z provedených analýz, zejména z posunu bazální difrakce 002 po zahřátí vzorku ze 14,34 Å na cca 10 Å (obr. 7) je zřejmé, že dominantní fází vzorku je vermikulit (WEISS a KUŽVART 2005). Chlorit zde identifikován nebyl. Príměs křemene je zcela minoritní.

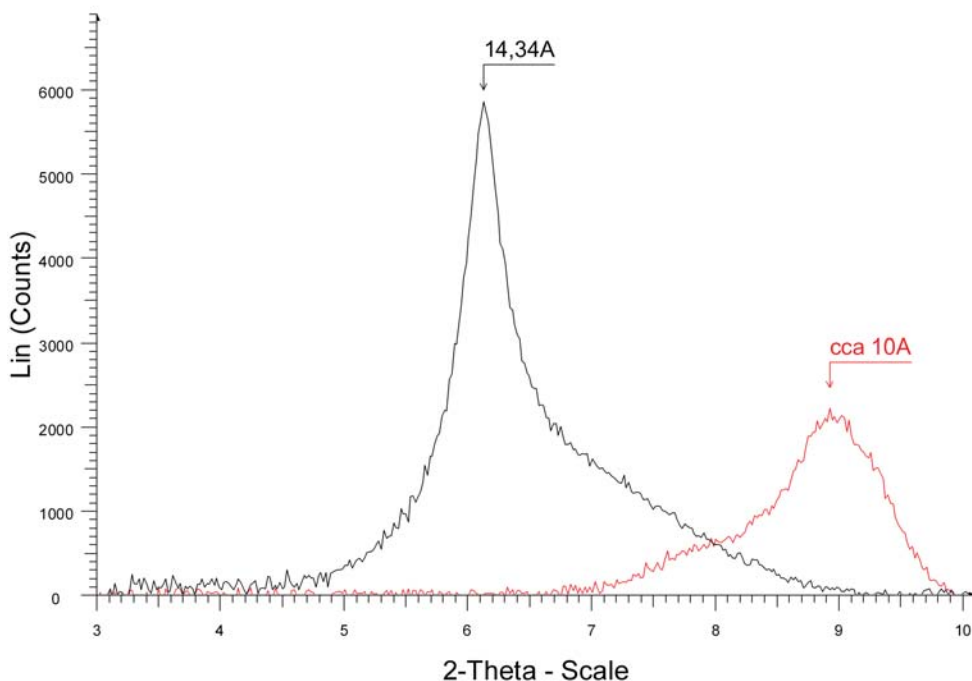
Reliktní biotit nebyl též zjištěn. Zejména zcela chybí jeho bazální difrakce na 0 0 1 ( $d = 10,01\text{-}10,20 \text{ \AA} / I_r = 100$  - záznamy z databáze PDF 2), jejíž pozice je v difraktogramu na obr. 6 naznačena šipkou.

Reflexe vermikulitu 0 6 0 koinciduje s reflexemi 1 5 8, -3 3 2, 2 0 14, -3 1 11 a -3 3 4. Tyto reflexe tvoří společně s 0 6 0 difúzní difrakční linií v oblasti kolem 60° 2 $\theta$  (obr. 6) a nelze proto reflexe 060 v tomto případě použít pro identifikační účely.



Obr. 6. Difraktogram sloupečkového krystalu „biotitu“ (černá křivka) z lokality Brno-Líšeň, odpovídající vermikulitu (červené pozice piků). Dále je vyznačena pozice bazální difrakce biotitu 001 a piky křemene (modře).

Fig. 6. X-ray diffraction pattern of columnar „biotite“ (black curve) from Brno-Líšeň giving the reflections of vermiculite (red peak positions). Marked points represent the basal reflection of biotite (001) and diffraction peaks of quartz (blue colour).



Obr. 7. Difraktogram krystalu „biotitu“ z lokality Brno Líšeň; před zahřátím (černá křivka) a po zahřátí (červená křivka).

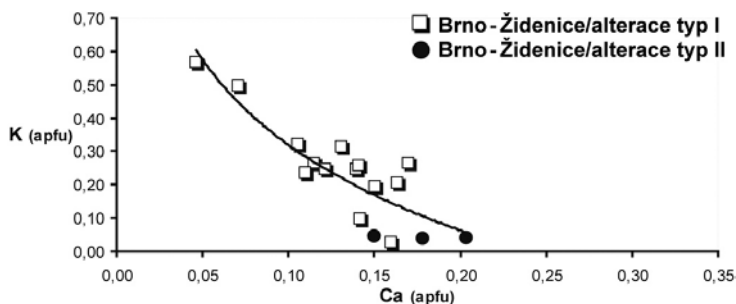
Fig. 7. X-Ray diffraction pattern of „biotite“ crystal from Brno-Líšeň; untreated (black curve) and heat-treated (red curve).

## KRYSTALOCHEMIE SLOUPECKOVITEHO „BIOTITU“

Reprezentativní WDX-analýzy vzorků alterovaného biotitu s přepočty empirických vzorců na sumu 11 atomů kyslíku jsou uvedeny v tab. 2 a 3. Chemizmus sloupečkovitých krystalů biotitu z obou studovaných lokalit je srovnatelný a vykazuje velmi podobný stupeň alterace. Vzorky biotitů jsou v obraze ve zpětně odražených elektronech (BSE) vesměs homogenní, bez výraznější chemické zonality. I přesto lze na základě chemického složení, stádia přeměny a vývoje v zastoupení hlavních prvků rozeznat u zkoumaných fází dva odlišné alterační trendy.

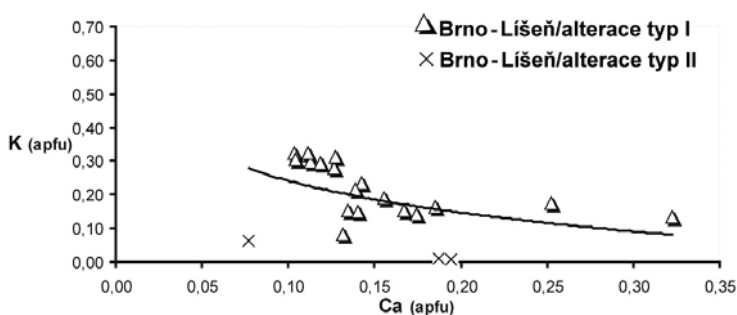
U prvního a objemově zcela převládajícího typu přeměny (alterace I), který je dominantní jak u automorfních krystalů „biotitu“ z lokality Brno-Židenice tak z lokality Brno-Líšeň, byly v mezivrstevních pozicích zjištěny prvky v následující posloupnosti:  $K > Ca > Na > Ba$ . U všech zkoumaných vzorků lze sledovat snížené obsahy mezivrstevního K pohybující se zpravidla od 0,1 do 0,5 apfu. Pokles zastoupení draslíku pod 0,2 apfu je substituován nárůstem obsahu Ca (obr. 8 a 9). Vápník, jehož obsahy nejčastěji kolísají od 0,1 do 0,3 apfu, tak představuje v cca 5 % provedených bodových analýz dominantní kationt. Dále se v mezivrstvi objevuje Na a Ba, avšak obsahy těchto prvků jsou zanedbatelné, popř. pod detekčním limitem. Celková obsazenost mezivrstevních pozic se nejčastěji pohybuje kolem 0,4 apfu, přičemž nejvyšší hodnoty (až 0,6 apfu) byly detekovány ve vzorcích biotitu z lokality Brno-Židenice a vždy korespondují se zvýšeným obsahem mezivrstevního K. Vzhledem k tomu, že studované krystaly biotitu jsou zjevně alterovány, nelze vyloučit,

že do mezivrstevních pozic vstupuje rovněž Mg, což je běžným jevem u některých sekundárních produktů přeměny biotitu (např. vermikulitu).



Obr. 8. Diagram – poměr K vs. Ca (apfu) sloupečkovitých biotitů z lokality Brno-Židenice s vyznačením vývojového trendu chemických analýz.

Fig. 8. K vs. Ca (apfu) diagram of columnar biotite crystals from Brno-Židenice showing the development trend curve of the representative chemical analysis points.



Obr. 9. Diagram – poměr K vs. Ca (apfu) sloupečkovitých biotitů z lokality Brno-Líšeň s vyznačením vývojového trendu chemických analýz.

Fig. 9. K vs. Ca (apfu) diagram of columnar biotite crystals from Brno-Líšeň showing the development trend curve of the representative chemical analysis.

Mezi majoritní oktaedrické kationty patří Fe a Mg. Železo ve všech bodových analýzách převládá nad Mg a jeho zastoupení kolísá mezi 1,3 a 1,6 apfu oproti obsahu Mg, který se pohybuje od 1,0 do 1,3 apfu (obr. 10 a 11). Mezi oktaedricky koordinované minoritní prvky patří především Ti, jehož obsah vždy mírně přesahuje hodnotu 0,2 apfu a převládá tak nad  $Al^{VI}$ , jehož hodnota se zpravidla pohybuje kolem 0,1 apfu. V podřadném množství se objevuje Mn a Zn. Obsazenost oktaedrických pozic kolísá v rozmezí 2,8–3,1 apfu, v porovnání s teoretickými 3 atomy na vzorcovou jednotku u trioktaedrických slídků.

Substituce Si za Al v tetraedrické koordinaci kolísá od  $Si_{2,8}Al_{1,2}$  do  $Si_{2,9}Al_{1,1}$  apfu. V aniontové skupině se kromě obvyklého OH vyskytuje ještě F. Obsahy F však nepřesahují 0,1 apfu.

Tabulka 2. Reprezentativní chemické analýzy krystalů „biotitu“ (Brno-Líšeň).

Table 2. Representative chemical analyses of „biotite“ crystals (Brno-Líšeň).

Lokalita – vzorek č.	Líšeň - 1					Líšeň - 2				
Bod měření	L1-1	L1-2	L1-3	L1-4	L1-5	L2-1	L2-2	L2-3	L2-4	L2-5
SiO <sub>2</sub>	36,01	36,07	36,37	36,15	36,81	36,73	35,58	35,97	35,67	35,93
TiO <sub>2</sub>	4,06	3,91	4,07	3,91	4,12	5,05	2,39	1,99	3,82	5,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,75	13,31	13,31	13,51	13,76	13,74	15,47	14,48	12,96	13,35
FeO	21,71	21,47	20,47	21,28	20,71	20,48	23,28	23,66	22,44	20,98
MnO	0,44	0,33	0,31	0,34	0,35	0,34	0,30	0,39	0,35	0,31
MgO	10,73	10,94	10,40	10,25	10,76	8,73	8,29	9,18	9,81	8,05
CaO	1,59	2,06	1,33	1,32	2,00	3,00	1,63	1,52	1,38	3,78
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,09	0,07	0,10	0,11	0,11	0,08	0,18	0,11	0,14
K <sub>2</sub> O	1,52	1,39	2,95	3,21	1,55	1,77	1,47	0,80	2,88	1,31
BaO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ZnO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
F	0,33	0,32	0,31	0,35	0,25	0,20	0,08	0,17	0,19	0,26
Cl	0,09	0,10	0,10	0,10	0,08	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	b.d.	0,01	0,01	b.d.	0,02	0,01	b.d.	b.d.	0,01
NiO	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00
H <sub>2</sub> O*	3,63	3,62	3,61	3,60	3,70	3,72	3,69	3,64	3,64	3,63
Subtotal	93,96	93,64	93,32	94,12	94,21	93,91	92,30	92,02	93,31	92,95
O=F,Cl	0,16	0,16	0,15	0,17	0,12	0,09	0,04	0,08	0,09	0,12
Total	93,81	93,48	93,17	93,95	94,08	93,82	92,26	91,94	93,22	92,83
Si	2,834	2,848	2,885	2,861	2,871	2,881	2,858	2,895	2,861	2,862
Al <sup>IV</sup>	1,166	1,152	1,115	1,139	1,129	1,119	1,142	1,105	1,139	1,138
Al <sup>VI</sup>	0,110	0,087	0,130	0,121	0,136	0,151	0,322	0,269	0,087	0,115
Ti	0,240	0,232	0,243	0,232	0,241	0,298	0,145	0,121	0,230	0,310
Cr	0,001	b.d.	0,001	0,001	b.d.	0,001	0,001	b.d.	b.d.	0,001
Fe	1,429	1,418	1,358	1,408	1,351	1,343	1,564	1,592	1,506	1,397
Mn	0,029	0,022	0,021	0,022	0,023	0,023	0,020	0,026	0,024	0,021
Mg	1,259	1,288	1,230	1,209	1,251	1,020	0,993	1,102	1,173	0,956
Zn	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000
Ca	0,134	0,174	0,113	0,112	0,167	0,252	0,141	0,131	0,119	0,322
Na	0,016	0,013	0,011	0,015	0,017	0,016	0,012	0,027	0,018	0,022
K	0,152	0,140	0,299	0,324	0,154	0,177	0,150	0,082	0,295	0,133
Ba	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
OH*	1,906	1,906	1,908	1,899	1,927	1,946	1,976	1,952	1,946	1,929
F	0,082	0,081	0,078	0,088	0,063	0,051	0,021	0,044	0,048	0,066
Cl	0,012	0,013	0,014	0,013	0,010	0,003	0,003	0,004	0,006	0,005
O	11,906	11,906	11,908	11,899	11,927	11,946	11,976	11,952	11,946	11,929
catsum	7,371	7,377	7,405	7,446	7,341	7,282	7,347	7,352	7,452	7,278
Mg/(Mg+Fe)	0,468	0,476	0,475	0,462	0,481	0,432	0,388	0,409	0,438	0,406
<p>* vypočteno ze stechiometrie – calculated from stoichiometry  n.d. = neanalyzováno – not analyzed  b.d. = pod mezí detekce – below detection limit</p>										

Tabulka 3. Reprezentativní chemické analýzy krystalů „biotitu“ (Brno-Židenice).  
Table 3. Representative chemical analyses of „biotite“ crystals (Brno-Židenice).

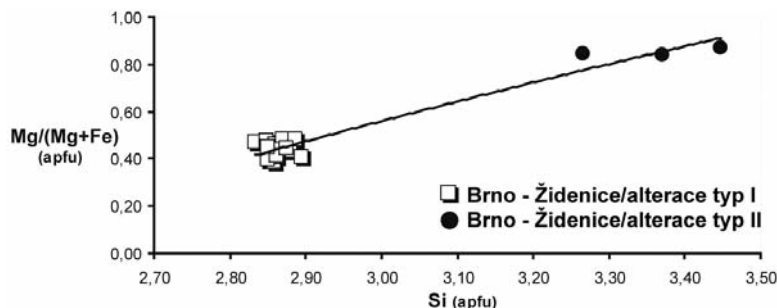
Lokalita - vzorek č.	Židenice - 1						
	Ž1-11	Ž1-12	Ž1-13	Ž1-14	Ž1-15	Ž1-16	Ž1-17
SiO <sub>2</sub>	36,15	36,14	35,90	35,90	36,25	35,72	36,14
TiO <sub>2</sub>	4,01	3,88	4,09	4,08	3,85	3,72	3,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,23	13,22	13,26	13,78	13,27	13,12	13,72
FeO	20,62	21,03	21,42	21,20	21,05	21,77	20,72
MnO	0,51	0,34	0,29	0,31	0,35	0,31	0,35
MgO	9,90	10,47	9,83	9,22	10,33	10,15	10,08
CaO	1,63	1,76	1,65	1,99	1,43	1,34	1,23
Na <sub>2</sub> O	0,15	0,16	0,10	0,09	0,12	0,16	0,03
K <sub>2</sub> O	2,41	1,92	2,53	2,59	2,44	2,59	3,15
BaO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ZnO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
F	0,33	0,33	0,27	0,30	0,28	0,34	0,37
Cl	0,07	0,06	0,08	0,04	0,06	0,04	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	b.d.	b.d.	b.d.	0,02	b.d.	0,01	0,02
NiO	b.d.	b.d.	0,02	b.d.	0,01	0,02	b.d.
H <sub>2</sub> O*	3,58	3,60	3,61	3,61	3,62	3,56	3,58
Subtotal	92,56	92,92	93,02	93,14	93,05	92,85	92,90
O=F,Cl	0,15	0,15	0,13	0,14	0,13	0,15	0,16
Total	92,41	92,76	92,89	93,01	92,92	92,69	92,74
Si	2,891	2,875	2,868	2,863	2,884	2,866	2,884
Al <sup>IV</sup>	1,109	1,125	1,132	1,137	1,116	1,134	1,116
Al <sup>VI</sup>	0,137	0,116	0,117	0,158	0,128	0,107	0,175
Ti	0,241	0,232	0,245	0,244	0,230	0,225	0,210
Cr	b.d.	b.d.	b.d.	0,001	b.d.	0,000	0,001
Fe	1,379	1,400	1,431	1,414	1,401	1,461	1,383
Mn	0,034	0,023	0,019	0,021	0,024	0,021	0,024
Mg	1,180	1,241	1,170	1,096	1,225	1,214	1,200
Zn	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	b.d.	b.d.	0,001	b.d.	0,001	0,001	b.d.
Ca	0,139	0,150	0,141	0,170	0,122	0,115	0,105
Na	0,024	0,025	0,015	0,015	0,018	0,025	0,005
K	0,245	0,195	0,257	0,263	0,247	0,265	0,320
Ba	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
OH*	1,908	1,908	1,922	1,919	1,922	1,907	1,906
F	0,082	0,084	0,068	0,076	0,070	0,087	0,094
Cl	0,009	0,008	0,010	0,005	0,008	0,006	0,001
O	11,908	11,908	11,922	11,919	11,922	11,907	11,906
catsum	7,380	7,382	7,398	7,383	7,396	7,433	7,423
Mg/(Mg+Fe)	0,461	0,47	0,45	0,437	0,466	0,454	0,465
<p>* vypočteno ze stechiometrie - calculated from stoichiometry  n.d. = neanalyzováno - not analyzed  b.d. = pod mezí detekce - below detection limit</p>							



Tabulka 3. (pokračování) Reprezentativní chemické analýzy krystalů „biotitu“ (Brno-Židenice).  
Table 3. (continuation) Representative chemical analyses of „biotite“ crystals (Brno-Židenice).

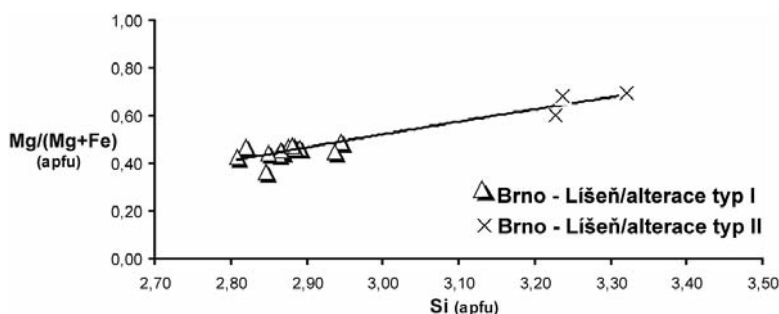
Lokalita - vzorek č.	Židenice - 2									
	Ž2-4	Ž2-6	Ž2-7 alt. II	Ž2-8 alt. II	Ž2-9 alt. II	Ž2-10	Ž2-11	Ž2-12	Ž2-13	Ž2-14
SiO <sub>2</sub>	34,99	36,80	45,53	42,33	47,63	35,79	35,91	38,18	37,76	33,74
TiO <sub>2</sub>	3,79	4,13	0,18	0,22	0,09	3,60	3,79	4,02	3,86	0,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,40	13,25	21,98	22,78	23,33	13,54	13,53	13,65	14,15	13,82
FeO	20,93	20,88	8,30	7,29	6,66	23,72	21,78	19,96	21,38	26,91
MnO	0,36	0,34	0,07	0,09	0,12	0,27	0,30	0,33	0,40	0,30
MgO	10,31	10,64	9,50	6,58	8,58	9,93	9,60	10,75	9,62	8,56
CaO	1,52	1,94	2,67	2,18	2,01	0,84	0,55	1,33	1,70	1,77
Na <sub>2</sub> O	0,15	0,11	0,17	0,06	0,04	0,16	0,04	0,12	0,04	0,08
K <sub>2</sub> O	3,06	2,07	0,40	0,40	0,48	4,95	5,57	2,40	0,98	0,25
BaO	0,25	0,25	0,11	0,18	0,13	0,34	0,27	b.d.	b.d.	b.d.
ZnO	0,12	0,06	0,04	0,21	0,01	0,03	0,04	b.d.	b.d.	b.d.
F	0,06	0,07	b.d.	0,02	b.d.	b.d.	b.d.	0,05	0,01	b.d.
Cl	0,08	0,09	0,03	0,04	0,01	0,08	0,06	0,11	0,07	0,02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	b.d.	0,03	0,01	b.d.	0,01	0,01	b.d.	0,01	0,01
NiO	b.d.	b.d.	b.d.	0,03	b.d.	0,03	0,04	b.d.	0,02	0,06
H <sub>2</sub> O*	3,67	3,77	4,21	3,91	4,30	3,80	3,76	3,84	3,83	3,55
Subtotal	92,72	94,40	93,19	86,32	93,38	97,09	95,26	94,73	93,81	89,57
O=F,Cl	0,04	0,05	0,01	0,02	0,00	0,02	0,01	0,05	0,02	0,00
Total	92,67	94,35	93,19	86,30	93,38	97,07	95,25	94,68	93,78	89,57
Si	2,820	2,881	3,237	3,230	3,323	2,808	2,850	2,945	2,938	2,846
Al <sup>IV</sup>	1,180	1,119	0,763	0,770	0,677	1,192	1,150	1,055	1,062	1,154
Al <sup>VI</sup>	0,093	0,104	1,079	1,279	1,242	0,060	0,116	0,186	0,235	0,221
Ti	0,230	0,243	0,009	0,012	0,005	0,212	0,226	0,233	0,226	0,032
Cr	0,001	b.d.	0,002	0,001	b.d.	0,000	0,000	b.d.	0,000	0,001
Fe	1,411	1,367	0,494	0,465	0,389	1,557	1,446	1,287	1,391	1,899
Mn	0,025	0,022	0,004	0,006	0,007	0,018	0,020	0,022	0,026	0,021
Mg	1,239	1,242	1,007	0,749	0,893	1,161	1,136	1,236	1,116	1,076
Zn	0,007	0,003	0,002	0,012	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000
Ni	b.d.	b.d.	b.d.	0,002	b.d.	0,002	0,003	b.d.	0,001	0,004
Ca	0,131	0,163	0,203	0,178	0,150	0,071	0,046	0,110	0,142	0,160
Na	0,024	0,017	0,023	0,009	0,006	0,024	0,007	0,017	0,006	0,013
K	0,314	0,207	0,036	0,039	0,043	0,495	0,564	0,236	0,097	0,027
Ba	0,008	0,008	0,003	0,005	0,004	0,010	0,008	0,000	0,000	0,000
OH*	1,974	1,971	1,996	1,990	1,999	1,989	1,992	1,974	1,988	1,998
F	0,015	0,018	b.d.	0,005	b.d.	b.d.	b.d.	0,012	0,003	b.d.
Cl	0,011	0,011	0,004	0,005	0,001	0,011	0,008	0,014	0,009	0,002
O	11,974	11,971	11,996	11,990	11,999	11,989	11,992	11,974	11,988	11,998
catsum	7,482	7,376	6,861	6,757	6,738	7,613	7,576	7,328	7,239	7,454
Mg/(Mg+Fe)	0,468	0,476	0,671	0,617	0,697	0,427	0,44	0,49	0,445	0,362
* vypočteno ze stechiometrie - calculated from stoichiometry n.d. = neanalyzováno - not analyzed b.d. = pod mezí detekce - below detection limit										

Pro sloupečkovité krystaly biotitu z obou studovaných lokalit je typický výskyt tmavší (v BSE obraze) i morfologicky odlišné minoritní fáze, jejíž výskyt je úzce spjat s trhlinami štěpnosti biotitu při okrajích krystalů. Tyto útvary hřebenovitého až vretenovitého tvaru o rozměru až 1 000×200 μm vznikly na úkor původních biotitových vrstev a mají silně expanzivní charakter, čímž působí destruktivně na okolní vrstvy (obr. 12 a 13).



Obr. 10. Diagram - poměr Mg/(Mg + Fe) vs. Si (apfu) sloupečkovitých biotitů z lokality Brno-Židenice s vyznačením vývojového trendu chemických analýz alterovaných biotitů.

Fig. 10. Mg/(Mg + Fe) vs. Si (apfu) diagram of columnar biotite crystals from Brno-Židenice showing the development trend curve of the representative chemical analysis points.

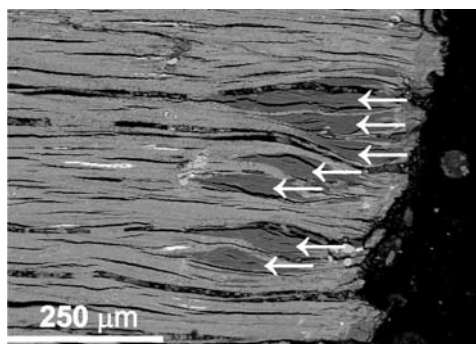


Obr. 11. Diagram - poměr Mg/(Mg + Fe) vs. Si (apfu) sloupečkovitých biotitů z lokality Brno-Líšeň s vyznačením vývojového trendu chemických analýz alterovaných biotitů.

Fig. 11. Mg/(Mg + Fe) vs. Si (apfu) diagram of columnar biotite crystals from Brno-Líšeň showing the development trend curve of the representative chemical analysis points.

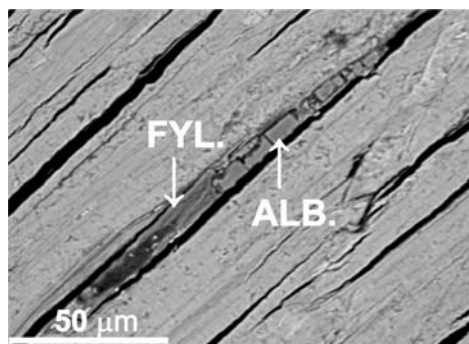
Chemickými analýzami této nově vzniklé fáze bylo zjištěno, že dochází k významné redistribuci prvků ve všech strukturních pozicích a lze ji vyčlenit jako produkt odlišného typu či stádia přeměny (alterace II). Zastoupení prvků v mezivrstevních pozicích nepřesahuje hodnotu 0,3 apfu a dominantním kationtem se stává Ca, v pořadí  $Ca > K > Na$  (obr. 8 a 9). K dalšímu rozdílu v chemismu těchto útvarů, v porovnání s celkovým chemismem alterovaných biotitů, dochází především v obsazování oktaedrických pozic. Patrný je především významný úbytek Fe, který ve vzorcích z obou lokalit kolísá od 0,3 do 0,5 apfu. U těchto vretenovitých agregátů z lokality Brno-Židenice převládá v oktaedrických pozicích Al v rozsahu 1,1–1,3 apfu, zatímco na lokalitě Brno-Líšeň dominuje v těchto pozicích Mg a to v hodnotách od 1,8 do 2,3 apfu (obr. 10 a 11). K výraznému poklesu dochází rovněž u Ti a Mn.

Ve vzorcích z lokality Brno-Židenice, kde mezi oktaedricky koordinovanými kationty převládá Al, dochází k poklesu obsazenosti oktaedrických pozic na hodnotu 2,5–2,6 apfu. U biotitů z lokality Brno-Líšeň s dominujícím Mg, dosahuje obsazenost oktaedrických pozic hodnot kolem 2,9 apfu. V tetraedrických pozicích dochází k poklesu substituce Al za Si, která se na vzorcích z obou lokalit pohybuje od  $Si_{3,2}Al_{0,7}$  do  $Si_{3,5}Al_{0,5}$  apfu. Aniontová skupina je zastoupena pouze OH.



Obr. 12. Útvary novotvořené fáze, které vznikají paralelně s trhlinami štěpnosti biotitu a vykazují expanzivní charakter; BSE; foto P. Gadas.

Fig. 12. Shapes of newly formed expansive mineral phases occurring parallel to the biotite cleavage.; back-scattered electrons (BSE); photo P. Gadas.



Obr. 13. BSE obraz nové fáze fyllosilikátového charakteru na úkor původního biotitu v asociaci s novotvořeným albitem; BSE; foto P. Gadas.

Fig. 13. BSE image showing the formation of new fyllosilicate mineral phase at the expense of parent biotite in association with newly formed albite.; photo P. Gadas.

## DISKUZE

V rámci předloženého článku byly zkoumány pseudohehexagonální krystaly „biotitu“ sloupečkovitého habitu, které byly odebrány z granodioritu typu Královo Pole v městské části Brno-Židenice a Brno-Líšeň. Již na základě mikroskopického studia je možno konstatovat, že studované vzorky nejsou tvořeny původním biotitem a vždy jsou postiženy různě pokročilým stupněm alterace.

Výzkum krystalů v odražených elektronech poukázal na velmi podobné chemické složení alterovaných vzorků z obou studovaných lokalit. Posouzení charakteru a stupně alterace však znesnadňuje fakt, že nebyl nalezen původní nepřeměněný biotit, soudě dle obsahu a zastoupení jednotlivých (především mezivrstevních) kationtů.

Na základě vlnové disperzních (WDX) analýz byly zjištěny dva typy alterace. Hlavní typ přeměny biotitu (alterace I) nevykazuje výraznější zonalitu a poměry jednotlivých prvků jsou víceméně konstantní. Vývojový trend obsazení mezivrstevních pozic jednotlivými kationty charakterizuje trojúhelníkový diagram K/Na/Ca (obr. 14), z nějž jsou dobře patrné mírně zvýšené obsahy draslíku na lokalitě Brno-Židenice oproti alterovaným biotitům z Brna-Líšeň. I přes značný úbytek obsahu kationtů v mezivrstevních pozicích draslík stále zůstává ve většině měřených bodů dominantním kationtem. Diagram zastoupení  $Fe/Al^{VI}/Mg$  v oktaedrických pozicích (obr. 15) dokumentuje, že všechny zkoumané vzorky biotitu jsou v případě alterace prvního typu vždy mírně obohaceny železem. Poměr Si:Al v tetraedrech se blíží ideálnímu (3:1).

Následující empirické vzorce, vypočtené na základ 11 atomů kyslíku, dokumentují pravděpodobně nejméně a nejvíce pokročilé stádium alterace (viz. též tab. 2 a 3).

### Lokalita Brno-Židenice

**Bod č. 11**  $(K_{0,56} Ca_{0,05} Ba_{0,01} Na_{0,01})_{0,63} (Fe_{1,45} Mg_{1,14} Ti_{0,23} Al_{0,12} Mn_{0,02} \square_{0,04})_3 (Si_{2,85} Al_{1,15})_4 O_{10} (OH_{1,99} Cl_{0,01})_2$

**Bod č. 14**  $(Ca_{0,16} K_{0,03} Na_{0,02})_{0,20} (Fe_{1,90} Mg_{1,08} Al_{0,22} Ti_{0,03} Mn_{0,02})_{3,25} (Si_{2,85} Al_{1,15})_4 O_{10} (OH)_2$

### Lokalita Brno-Líšeň

**Bod č. 3**  $(K_{0,33} Ca_{0,10} Na_{0,01})_{0,44} (Fe_{1,47} Mg_{1,14} Ti_{0,24} Al_{0,12} Mn_{0,02} \square_{0,01})_3 (Si_{2,86} Al_{1,14})_4 O_{10} (OH_{1,98} F_{0,01} Cl_{0,01})_2$

**Bod č. 5**  $(Ca_{0,32} K_{0,13} Na_{0,02})_{0,47} (Fe_{1,40} Mg_{0,96} Ti_{0,31} Al_{0,12} Mn_{0,02} \square_{0,19})_3 (Si_{2,86} Al_{1,14})_4 O_{10} (OH_{1,93} F_{0,07})_2$

Reprezentativní soubor WDX-bodových analýz alterovaného biotitu s přepočtem na empirické vzorce je uveden v tab. 2 a 3.

Negativní vrstevní náboj u T-O-T vrstev alterace typu I se nejčastěji pohybuje v intervalu od 0,5 do 0,7 při vzorcové jednotce  $T_4O_{10}$ .

U druhého typu alterace biotitu (alterace II), která je úzce vázána na prostor štěpných trhlin při okrajích krystalů, je patrna výrazná změna v chemickém složení. Od prvního typu přeměny se zkoumaná fáze typu II zřetelně odlišuje jak vysokými obsahy  $Si^{IV}$  (obr. 10 a 11) a dominancí Ca v mezivrstvi (obr. 14), tak i výrazně expanzivním charakterem. Ke kompletní redistribuci kationtů dochází rovněž v oktaedrických pozicích a zatímco u alterovaného sloupečkovitého biotitu z Brna-Líšeň převládá oktaedricky koordinovaný hořčík, u přeměněných biotitů z Brna-Židenic se dominantním oktaedrickým kationtem stává Al (obr. 15). Pravděpodobně se jedná o pokročilejší stádium alterace, které by se dalo vyjádřit následujícím empirickým vzorcem (viz. též tab. 2 a 3):

### Lokalita Brno-Židenice

Bod 7:  $(Ca_{0,20} K_{0,04} Na_{0,02})_{0,26} (Al_{1,08} Mg_{1,01} Fe_{0,49} Ti_{0,01} \square_{0,41})_3 (Si_{3,24} Al_{0,76})_4 O_{10} (OH)_2$

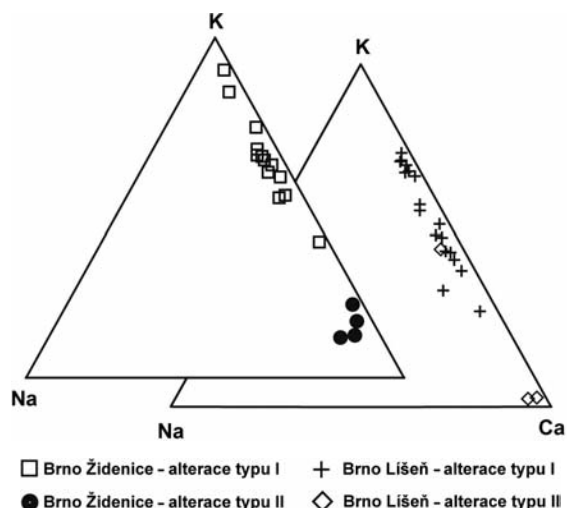
Bod 9:  $(Ca_{0,15} K_{0,04} Na_{0,01})_{0,20} (Al_{1,24} Mg_{0,89} Fe_{0,39} Mn_{0,01} \square_{0,47})_3 (Si_{3,32} Al_{0,68})_4 O_{10} (OH)_2$

### Lokalita Brno-Líšeň

Bod č. 22  $(Ca_{0,19})_{0,19} (Mg_{2,26} Fe_{0,33} Al_{0,31} Mn_{0,01} Ti_{0,01} \square_{0,08})_3 (Si_{3,45} Al_{0,55})_4 O_{10} (OH_{1,96} F_{0,04})_2$

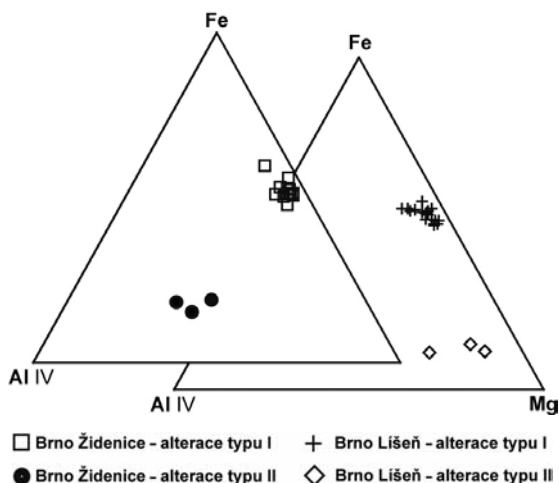
Bod č. 20  $(Ca_{0,08} K_{0,07} Na_{0,01})_{0,16} (Mg_{1,79} Al_{0,73} Fe_{0,32} Ti_{0,03} Mn_{0,01} \square_{0,12})_3 (Si_{3,26} Al_{0,74})_4 O_{10} (OH)_2$

Oproti alteraci I vykazuje alterace II nižší negativní náboj vrstevního komplexu a to od 0,16 do 0,5 pro základ vzorcové jednotky  $T_4O_{10}$ .



Obr. 14. Ternární diagram K/Na/Ca (apfu) s projekčními body chemických analýz alterovaných biotitů z lokalit Brno-Židenice a Brno-Líšeň.

Fig. 14. Ternary plot of altered biotites from Brno-Židenice and Brno-Líšeň in K/Na/Ca (apfu) ternary system showing the projection points of the representative chemical analysis.

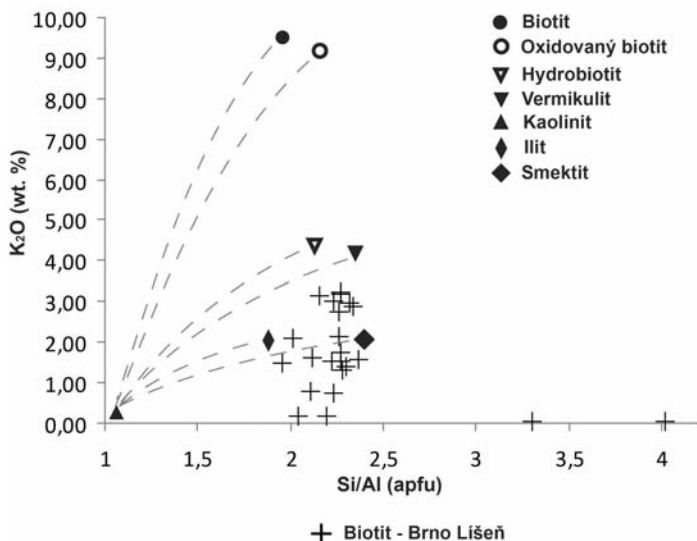


Obr. 15. Ternární diagram Al(okt.)/Mg/Fe (apfu) s projekčními body chemických analýz alterovaných biotitů z lokalit Brno-Židenice a Brno-Líšeň.

Fig. 15. Ternary plot of altered biotites from Brno-Židenice and Brno-Líšeň in Al(okt.)/Mg/Fe (apfu) ternary system showing the projection points of the representative chemical analysis.

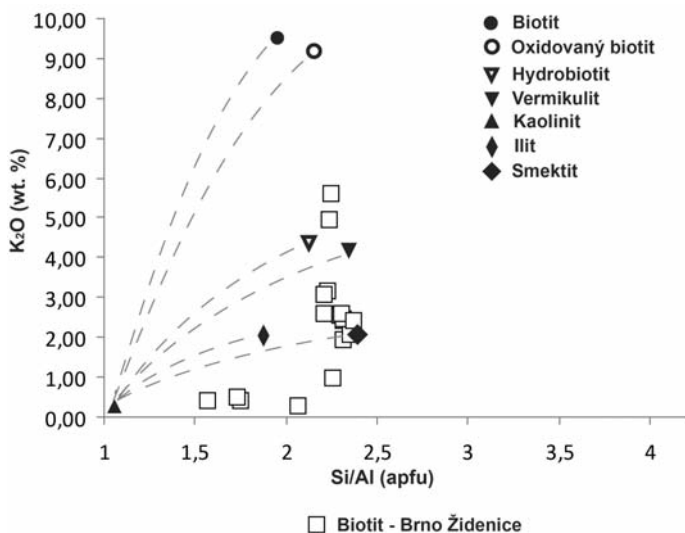
Vývojové diagramy na obr. 16 a 17 znázorňují postavení chemismu sloupečkovitých „biotitů“ v sekvenci vybraných fylosilikátů, vznikajících přeměnou biotitu navržené dle FORDHAMA (1990).





Obr. 16. Reprezentativní chemické analýzy alterovaných biotitů z lokality Brno-Líšeň zobrazující vztah  $K_2O$  (hm. %) vůči poměru Al/Si (apfu) - symboly představují průměrné složení nepřeměněného biotitu a produktů jeho alterace (upraveno dle FORDHAMA 1990).

Fig. 16. Representative chemical analysis of altered biotites from Brno-Lisen showing relation of  $K_2O$  (wt. %) plotted against Si/Al ratios (apfu) - symbols are related to the average composition of unaltered biotite and its alteration products (modified after FORDHAM 1990).



Obr. 17. Reprezentativní chemické analýzy alterovaných biotitů z lokality Brno-Židenice zobrazující vztah  $K_2O$  (hm. %) vůči poměru Al/Si (apfu) - symboly představují průměrné složení nepřeměněného biotitu a produktů jeho alterace (upraveno dle FORDHAMA 1990).

Fig. 17. Representative chemical analysis of altered biotites from Brno-Židenice showing relation of  $K_2O$  (wt. %) plotted against Si/Al ratios (apfu) - symbols are related to the average composition of unaltered biotite and its alteration products (modified after FORDHAM 1990).

Chemické složení zkoumaných sloupečkovitých „biotitů“ z obou lokalit se pohybuje směrem od pomyslné oblasti odpovídající nepřeměněnému biotitu přes složení blízké hydrobiotitu a dále napříč polem smíšených struktur typu biotit/vermikulit nebo biotit/smektit. Tento trend snižování obsahu mezivrstevního draslíku za téměř konstantního zastoupení Mg, Fe a poměru Si/Al odpovídá běžné alteraci typu I. Prudký úbytek oktaedrického Fe a nárůst  $Mg^{VI}$ ,  $Al^{VI}$  a  $Si^{IV}$  jsou hlavními znaky alterace typu II, která je charakteristická vazbou na bezprostřední okolí štěpných ploch, kde se projevuje především zvětšením objemu postižených míst.

Z uvedených zjištění je zřejmé, že původní krystaly biotitu z lokalit Brno-Líšeň a Brno-Židenice podlely přeměnám, které byly způsobeny jednak účinkem nízkoteplotních hydrotermálních fluid a rovněž procesem zvětrávání, což vedlo k nahrazení původní biotitové struktury nově vzniklými fázemi ve formě obtížně identifikovatelných smíšených struktur. Vzhledem k tomu, že troj- či více komponentní systém se v přírodě vyskytuje velmi vzácně (MOORE a REYNOLDS 1997), mohlo by se jednat o dvojkomponentní smíšený systém blízký skupině vermikulit-smektit.

Z RTG-difrakčního pohledu však hmota sloupečkovitých krystalů „biotitu“ odpovídá dominantně pouze jedné fázi, a to vermikulitu. Lze připustit, že výše popsaná alterace biotitu typu II, produkující fáze blízké skupině smektitu, je svým rozsahem minoritní, a proto nemusí být v difraktogramech zřetelná.

V minulosti byl proces přeměny trioktaedrických slíd na vermikulit popisován pomocí dvou rozličných reakcí. U železnatých slíd byla kompenzace ztráty pozitivního náboje v důsledku deficitu draslíku v mezivrstevním prostoru vysvětlována prostřednictvím oxidace  $Fe^{2+}$  na  $Fe^{3+}$  nebo vstupem  $H^+$  kationtů do mezivrsteví (GRUNER 1934, ROY a ROMO 1957). Odlišný proces vermikulitizace nezávislý na obsahu Fe popisuje BARSHAD (1948) jako nahrazování mezivrstevního draslíku hydratovanými Mg kationty. V současnosti je přijímán názor na vzájemnou provázanost obou těchto procesů (FANNING *et al.* 1989, DONG *et al.* 1998, MURAKAMI *et al.* 2003, WEISS a KUŽVART 2005).

## ZÁVĚR

Sloupečkovité krystaly „biotitu“ z granodioritů brněnského masivu představují pseudomorfózy Fe-bohatého vermikulitu po biotitu. Důkazem jsou výsledky RTG-práškové difrakční analýzy v oblasti nízkých difrakčních úhlů, typických pro fylsilikáty. Bazální difrakce biotitu nebyla zaznamenána, možná koincidence difrakcí vermikulitu a chloritu byla vyloučena opakovaným záznamem před a po ohřevu vzorku. Navzdory variabilitě chemického složení nedochází ze strukturního pohledu k tvorbě smíšených struktur a z difrakčních záznamů je patrné, že produktem alterace sloupečkovitých krystalů původního biotitu je tedy pouze jedna fáze, vermikulit.

Alterované vzorky sloupečkovitého „biotitu“ jsou mikroskopicky nehomogenní a obsahují hojně minerální uzavřeniny. Mezi uzavírané minerály, které vznikly v ranné fázi krystalizace magmatu, patří především apatit, ilmenit, magnetit, K-živec, plagioklas I (oligoklas), titanit a zirkon. Mezi sekundární fáze se řadí rozličné směsi oxidů a hydroxidů železa, dále plagioklas II (albit), rutil a titanit. Vznik sekundárních minerálů souvisí s působením nízkoteplotních hydrotermálních fluid. Nabohacení těchto fluid např. Ca, Ti a dalšími prvky může být spojeno s rozpouštěním plagioklasů a samotného biotitu a v něm uzavřených minerálů.

S ohledem na diskutované rentgenografické a krystalochemické vlastnosti studovaných sloupečkovitých krystalů „biotitu“ z lokality Brno-Líšeň a Brno-Židenice je zřejmé, že k jejich vermikulitizaci v počáteční fázi nevyhnutelně nedocházelo prostřednictvím intenzivní oxidace  $Fe^{2+}$  či nahrazením deficitního obsahu draslíku v mezivrstevních pozicích masivním vstupem hydratovaných Mg kationtů. Negativní náboj tetraedrické vrstvy, způsobený substitucí Al za Si, je dostatečně kompenzován vyšším pozitivním nábojem oktaedrické vrstvy a obnovení neutrality celé struktury je dosaženo substitucí Ca za K v mezivrsteví.

Výsledná hodnota vrstevního náboje se pohybuje v rozsahu, který je dle nomenklatury v dobré shodě s vrstevním nábojem vermikulitů.

Morfologicky i chemicky odlišné minoritní enklávy výrazně expanzivního charakteru, které jsou typicky vázány na okolí štěpných trhlin nově vzniklého vermikulitu, nebyly rentgenograficky prokázány a to pravděpodobně vzhledem k nízkému podílu na celkovém objemu původního krystalu biotitu. S ohledem na distribuci prvků v jednotlivých strukturálních pozicích a rovněž na nižší náboj vrstevního komplexu, by tyto minerální fáze mohly odpovídat minerálům skupiny smektitu. Vyšší pozitivní náboj oktaedrické vrstvy, který kompenzuje vysoký náboj vrstvy tetraedrické, poukazuje na příslušnost k trioktaedrickým smektitům (LAGALY a WEISS 1976, CHRISTIDIS a EBERL 2003).

V diskuzi popsany průběh vermikulitizace zahrnující inkorporaci Mg do mezivrství a oxidaci  $Fe^{2+}$  se bude pravděpodobně intenzivněji uplatňovat v dalším průběhu zvětrávacích procesů.

### Poděkování

Autoři děkují RNDr. Blance Šreinové a RNDr. Martinu Štátnému, CSc. za kritické pročtení rukopisu a konstruktivní připomínky k jeho úpravě. Příprava publikace byla podpořena v rámci projektu OPVK „Výzkumný tým pro ukládání jaderných odpadů a jadernou bezpečnost“ (reg. č. CZ.1.07/2.3.00/20.0052).

### LITERATURA

- BARSHAD, I., 1948: Vermiculite and its relation to biotite as revealed by base exchange reactions, X-ray analyses, differential thermal curves, and water content. – *American Mineralogist*, v. 33, pp. 655–678.
- BURKART, E., 1953: Moravské nerosty a jejich literatura. – *Nakl. CSAV Praha*, 384, 446.
- CEHÁK, K., ZEMAN, M., 1960: Zpráva o některých výskytech vermikulitu v Čechách a na Moravě. – *Věst. Ústř. Úst. geol.*, XXXV, 111–119, Praha.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J., 1962: *Rock-Forming Minerals*, Vol. 3: Sheet Silicates. – *Geol. Soc. New York*.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J., 1996: *An introduction to the rock-forming minerals: micas* 2nd. ed. – *Geol. Soc. London*.
- DUDEK, A., 1980: The crystalline basement block of the Outer Carpathians in Moravia: Bruno-Vistulicum. – *Rozpr. Čs. Akad. Věd, Ř. mat. přír. Věd*, 90, 8, 3–85, Praha.
- DONG, H., PEACOR, D. R., MURPHY, S. F., 1998: TEM study of progressive alteration of igneous biotite to kaolinite throughout a weathered soil profile. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 1 881–1 887.
- FANNING, D. S., KERAMIDAS, V. Z., EL-DESOKY, M. A., 1989: Micas. In J.B. Dixon and S.B. Weed, Eds., *Minerals in Soil Environments*, p. 551–634. – *Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin*.
- FINGER, F., FRASL, G., DUDEK, A., JELÍNEK, E., THÖNI, M., 1995: Cadomian plutonism in the Moravo-Silesian basement. In: Dallmeyer RD, Franke W, Weber KP (eds) *Tectonostratigraphic Evolution of the Central and Eastern European Orogens*. – *Springer-Verlag, Berlin*, pp 495–507
- FINGER, F., PIN, CH., 1997: Arc-type crustal zoning in the Bruno-Vistulicum, eastern Czech Republic: A trace of the late Proterozoic northern Euro-Gondwana margin. – *J. Czech Geol. Soc.* 42, 3 (MEAGS Session), 53, Praha.
- FINGER, F., TICHOMIROVA, N., PIN, C., HANŽL, P., 2000: Relics of an early Panafrican metabasite-metarhyolite formation in the Brno Massif, Moravia, Czech Republic. – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)* 89, 2, 328–335. Stuttgart.
- FINGER, F., HANŽL, P., PIN, C., VON QUADT, A., STEYRER, H. P., 2000a: The Brunovistulian: Avalonian Preambrian sequence at the eastern end of the Central European Variscides ? – In Franke W., Altherr R., Haak W., Oncken O., Tanner D., ed.: *Orogenic processes: Quantification and modelling in the Variscan belt*. *Geol. Soc. – London Spec. Publ.* 179, 103–112. Oxford.
- FORDHAM, W., 1990: Weathering of biotite into dioctahedral clay minerals. – *Clays and Clay Minerals*, 25, 51–63.
- FLEET, M. E., 2003: *Rock-forming minerals. Micas*. 2nd. ed. – London.
- FRIEDL, G., FINGER, F., PAQUETTE, J.-L., VON QUADT, A., MCNAUGHTON, N. J., FLETCHER, I. R., 2004: Pre-Variscan geological events in the Austrian part of the Bohemian Massif deduced from U-Pb zircon ages. – *Int. J. Earth Sci.* 93, 5, 802–823. Heidelberg.

- GRUNER, J. W., 1934: The structures of vermiculites and their collapse by dehydration. - *American Mineralogist*, v. 19, pp. 557-575.
- HANŽL, P., PRICHYSTAL, A., MELICHAR, R., 1995: The Brno massif: volcanites of the northern part of the metabasite zone. - *Acta Univ. Palackianae Olomucensis, Geol.* 34, 73-79. Olomouc.
- HANŽL, P., MELICHAR, R., 1997: The Brno massif: a section through the active continental margin or a composed terrane? - *Krystalinikum* 23, 33-58
- HANŽL, P., MELICHAR, R., GREGEROVÁ, M., 2000: Brněnský masív - In *Geologie Brna a okolí*. - Český geologický ústav, 14-17, Brno.
- CHRISTIDIS, G. E., EBERL, D. D., 2003: Determination of layer charge characteristics of smectites. - *Clays Clay Miner.* 51 pp. 644-655.
- KRUŽA, T., 1966: Moravské nerosty a jejich literatura 1940-1965. - *Moravské museum Brno*, 152, 166.
- LAGALY, G., WEISS, A., 1976: The layer charge of smectitic layer silicates: in *Proc. - Int. Clay Conf.*, Mexico City, 1975, S. W. Bailey, ed., Applied Publishing, Wilmette, Illinois, 157-172.
- LEICHMANN, J., HÖCK, V., TOMEK, ČE., DIRNHOFER, M., KALVODA, J.: The Brunovistulicum and its relation to Gondwana. In *Europrobe. Transeuropean Structure Zone*, Ksiaz. Polsko. - Panstwowy Institut Geologiczny Wroclaw, 1996. s. 1-1.
- MÍŠAŘ, Z., 1965: Regionální geologie ČSSR: geologie Českého masívu, IV oblast moravskoslezská. - Státní pedagogické nakladatelství, Praha.
- MOORE, D. M., REYNOLDS, R. C. JR., 1997: X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. - Oxford University Press, 332, 1997.
- MURAKAMI, T., UTSUNOMIYA, S., YOKOYAMA, T., KASAMA, T., 2003: Biotite dissolution processes and mechanisms in the laboratory and in nature: Early stage weathering environment and vermiculitization. - *American Mineralogist*, v. 88, pp. 377-386.
- POUCHOU, J. L., PICOIR, F., 1985: „PAP“ procedure for improved quantitative microanalysis. - *Microbeam Analysis* 20 104-105.
- RIEDER, M. et al., 1998: Nomenclature of the micas. - *Canad. Min.*, 36, 905-12.
- ROY, R., ROMO, L. A., 1957: Weathering studies. 1. New data on vermiculite. - *J. Geol.*, v. 65, pp. 603-610.
- STRAKOVÁ-JOHNŮVÁ, J., 1973: Studium biotitu z některých hornin brněnského masívu. - MS, diplomová práce. Přírodovědecká fakulta MU. Brno.
- ŠTELCL, J., WEISS, J. et al., 1986: Brněnský masív. - *Universita J.E. Purkyně v Brně*, 1. vyd., Brno.
- WEISS, Z., KUŽVART M., 2005: Jilové minerály - jejich nanostruktura a využití. - *Karolinum*, Praha.
- ZAPLETAL, K., 1931: Geologie a petrografie země Moravskoslezské (Brněnský masív vyvřelý). - 88-106, Brno.