

## Arfvedsonitové pegmatity masivu Khan Bogd v Mongolsku: Zr mineralizace

### Arfvedsonite pegmatites of Khan Bogd massif, Mongolia: Zr mineralization

JINDŘICH KYNICKÝ<sup>1</sup> – CHENG XU<sup>2</sup> – JIŘÍ MAŠEK<sup>1</sup> – ONDŘEJ JAROŠ<sup>3</sup> – HANA KÁNOVÁ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ústav geologie a pedologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno

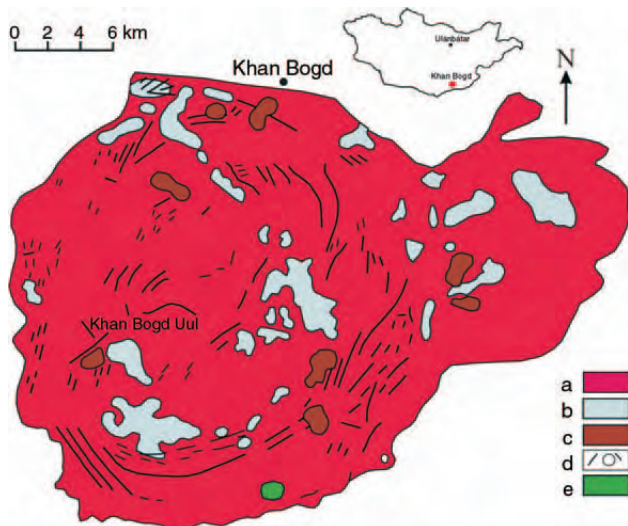
<sup>2</sup> Laboratory of Materials of the Earth's Interior and Geofluid Processes, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

<sup>3</sup> GEOTest Brno, a. s., Šmahova 112, 627 00 Brno

**Key words:** Zr, REE, arfvedsonite, pegmatites, Khan Bogd Massif, Mongolia

**Abstract:** The alkaline granitic massif Khan Bogd is located in the Gobi desert in southern Mongolia. The Khan Bogd, one of the world's largest alkaline ring complexes, is a product of strong fractional crystallization. Detailed field and petrographical research indicates that the aplite-pegmatite emplacement occurred during transitions from the ductile to the brittle regime from the most evolved granitic melt. This paper is focused mainly on the arfvedsonite pegmatites. The mineral paragenesis of the selected pegmatites is dominantly formed by quartz, elpidite, K-feldspar, albite, aegirine and arfvedsonite. Among widespread accessories the unidentified hydrated Zr-REE silicates, armstrongite and zirkon are the most considerable. The key enrichment in Zr and REE is related to magmatic process, but the alteration and metasomatism (replacement of primary elpidite mainly by secondary zircon and armstrongite) in pegmatites play also important role.

Granitický masiv Khan Bogd se nachází 550 km na J od hlavního města Mongolska Ulánbátaru a je tvořen dvěma ringovými strukturami, které vystupují z roviny pouště Gobi s lokálním převýšením až 500 m. Nejvyšší kóta je hora Khan Bogd Uul (2189 m n. m.). Masiv Khan Bogd byl popsán v pracích Yarmoljuka a Kovalenka (např. Kovalenko et al. 1973; Kovalenko – Yarmoluyk 1995),



Obr. 1. Zjednodušená geologická mapa masivu Khan Bogd (upraveno podle Kovalenka et al. 1973). a – alkalické granity, b – vulkanické a vulkanosedimentární horniny, c – alkalické biotitové syenity, d – žilná tělesa ekeritů, pegmatoidních granitických hornin, porfyrických mikrogranitů, mikrosyenitů a mikromonzonitů, e – ložisko arfvedsonitových pegmatitů.

kteří se zaměřily na předběžné určení ložiskových parametrů. Bylo zde popsáno několik nových minerálů, např. mongolit ( $\text{Ca}_4\text{Nb}_6\text{Si}_5\text{O}_{24}[\text{OH}]_{10} \cdot 5[\text{H}_2\text{O}]$ ) či armstrongit ( $\text{CaZr}[\text{Si}_6\text{O}_{15}] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). V současnosti je však celá řada zajímavých minerálních výskytů a ložisek prakticky nepřístupná a neznámá odborníkům i laikům.

Tento příspěvek přináší nové informace z probíhajících terénních výzkumů na západní ringové struktuře masivu Khan Bogd, zcela nová data a informace o diferenciaci Zr a REE a zejména pak o přítomnosti odmíšenin (zirkonu a armstrongitu) vznikajících na úkor primárního elpiditu ( $\text{Na}_2\text{ZrSi}_6\text{O}_{15} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ve studovaných alkalických pegmatitech.

### Metodika

Terénní výzkum se uskutečnil během dvou studentských expedic do Mongolska v letech 2006 a 2007. Bylo odebráno přes 100 kg horninového materiálu, tj. 105 orientovaných i neorientovaných vzorků hornin. Dalších 10 typově odlišných vzorků bylo poskytnuto Mongolskou technickou univerzitou v Ulánbátaru. Vzájemné vztahy mezi jednotlivými minerálními asociacemi byly studovány na zakrytých i leštěných výbrusových preparátech. Základní chemické složení minerálů bylo stanoveno mikrosondovými analýzami na skenovacím elektronovém mikroskopu Cameca SX 100 na Ústavu geologických věd Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Detailní chemické analýzy vybraných minerálů metodou laserové ablace ve spojení s indukčně vázaným plazmatem a hmotnostní detekcí (LA-ICP-MS) byly vyhotoveny na Ústavu chemie Přírodovědecké fakulty MU. Laserová ablace byla prováděna bodově. Jako nejvhodnější vnitřní standard byl zvolen Ca na základě předchozích mikrosondových analýz.

### Geologická stavba

Vlastní masiv tvoří dvě hlavní tělesa alkalických granitů (viz obr. 1) permského stáří, které intrudovaly do asociace devonských vulkanosedimentárních hornin (viz Kovalenko et al. 2006). Vnitřní stavba západní ringové struktury je výjimečná bohatou přítomností uzavřenin okolních hostitelských hornin a žilných těles pozdních diferenciatů granitoidního charakteru, vázaných na zbytkové taveniny a fluida po krystalizaci alkalických granitů. Velmi pestrá horni-

nová asociace je složitým sledem několika po sobě jdoucích „pulzních“ intruzí. Hlavní intruzivní fáze je charakteristická alkalickými granity s akcesorickým elpiditem, po níž následovaly intruze žilných těles panteleritů, ekeritů (Na-granitů), porfyrických ekeritů, pegmatoidních granitických hornin, porfyrických mikrogranitů, mikrosyenitů a mikromonzonitů (Kovalenko et al. 1973).

Ložisko arfvedsonitových pegmatitů (dále LAP) v jv. části západní ringové struktury je vázáno svým výskytem na příkontaktní zónu alkalických granitů s vulkanickými a vulkanosedimentárními horninami. LAP tvoří 35 těles alkalických pegmatitů a dalších převážně nejmladších žilných derivátů granitoidních hornin, které jsou svým výskytem vázány na apikální partie masivu. Terénní výzkum odhalil u všech žilných granitoidních hornin plastické i křehké deformace (křehká porušení vývojově starších zón).

Východní těleso má v porovnání se západním tělesem jednodušší stavbu. Hlavním horninovým typem jsou jemně až středně zrnité egirínové granity (Kovalenko et al. 2006).

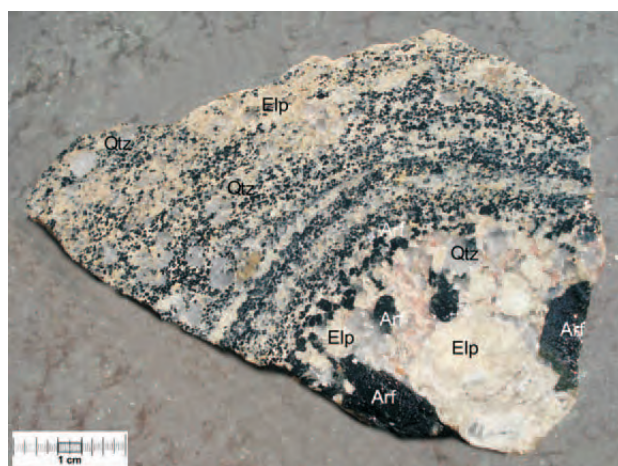
## Petrografie a mineralogie

Studovaná tělesa pegmatitů z LAP mají ve všech případech velmi výraznou zonálnost (obr. 2). V okrajových partiích se střídají zóny aplitického a granitického pegmatitu s elpiditem, které postupně přecházejí do hrubozrnného až blokového pegmatitu v centrálních a vrcholových partiích tělesa. V mocném vrcholovém naduření zonálních „pegmatoidních tělesech“ dosahují zejména krystaly arfvedsonitu gigantických rozměrů (běžně až 100 × 30 × 30 cm). Podobných, i když menších rozměrů dosahují i ostatní minerály blokové zóny (křemen, mikroklin, egirín a elpidit). Mocnost blokové zóny dosahuje až 4 m. Velikost krystalů se zvětšuje směrem do nadloží a kontaktních partií s křemenným jádrem.

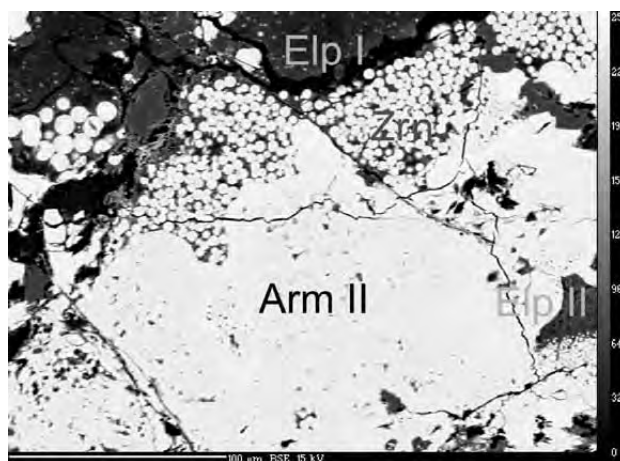
Jednotlivé zóny pegmatitů, ekeritů i granitů jsou tvořeny minerální asociací křemen, mikroklin, albit, arfvedsonit a egirín. Typickými akcesorickými minerály odebraných pegmatitů jsou elpidit, armstrongit, zirkon, neptunit, monazit a apatit.

Maximální koncentrace akcesorických minerálů byla zjištěna u pegmatitů v sz. části LAP, kde např. elpidit je lokálně nejrozšířenější horninotvorný minerál, jehož obsah dosahuje i více než 50 obj. %. Krystaly elpiditu mají červenou až červenohnědou barvu a zpravidla menší rozměry (běžně do 5 cm v průměru a 10 cm délky). Společně s elpiditem místy vystupují žluté až žlutozelené deskovité pseudomorfózy po hydratovaném silikátu Zr, jež postupně ubývají do nadložních partií pegmatitu se zvyšujícím se výskytem neidentifikovaných načervenalých silikátů Zr a REE. V blízkosti křemenného jádra jsou přítomny gigantické krystaly (max. 110 × 40 × 40 cm) egirínu a arfvedsonitu s odmíšeninami široké škály dalších silikátů. V křemenném jádru je rovněž řada pseudomorfóz po doposud neidentifikovaných hydratovaných silikátech Zr a REE.

Minerální asociace všech zón pronikají drobné žilky mladšího křemene, ve kterých je přítomen i elpidit druhé generace, a to zejména v blokové zóně (v blízkosti gigan-



Obr. 2. Řez typickým arfvedsonitovým pegmatitem menších rozměrů s výraznou zonální stavbou (Arf – arfvedsonit, Qtz – křemen, Elp – elpidit).



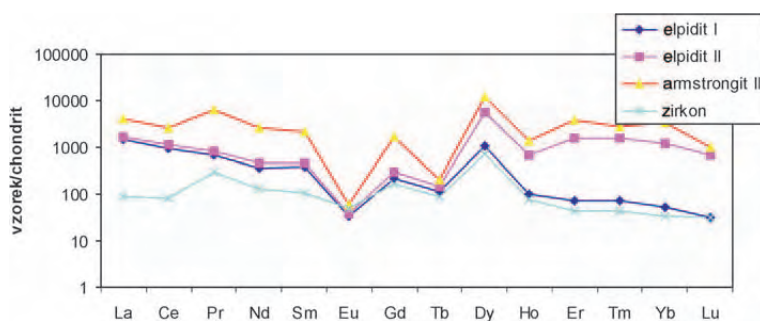
Obr. 3. Rozpad elpiditu a vznik odmíšenin zirkonu v centrálním pegmatitu arfvedsonitového ložiska Khan Bogd. Zrn – zirkon, Arm – armstrongit, Elp – elpidit.

tických krystalů elpiditu první generace). Na ostatních pegmatitových tělesech LAP je situace velmi podobná, ale zastoupení akcesorických minerálů je chudší.

## Vztah elpiditu, zirkonu a dalších Ca, Zr silikátů (armstrongitu a gittinsitu)

Elpidit první generace je nejrozšířenějším nositelem Zr ve studovaných horninách (až 50 obj. %), kde tvoří samostatné prizmatické krystaly, i velké klastry a srůsty krystalových agregátů dlouhé i více než 0,5 m. Optické studium v PL a CL mikroskopu jakož i SEM a BSE snímky (obr. 3) indikují zvýšenou přítomnost odmíšenin a nehomogenit.

Elpidit studovaných granitoidních hornin se liší od teoretického vzorce Na-elpiditu především zvýšenou přítomností Ca (max. 6 hmot. % CaO). Studium chemismu jasně naznačuje homogenitu chemického složení s vysokým obsahem Ca v čerstvých partiích (zpravidla okolo 4 hmot. % CaO), které se snižuje i pod 1 hmot. % CaO v alterovaných partiích, kde došlo k odmíšení sekundárních fází (hlavně



Obr. 4. Distribuce REE u Zr silikátů normalizovaných chondritem podle Boytona (1984).

Tabulka 1. Chemické analýzy souboru studovaných minerálů

(hmot. %)	elpidit I	elpidit II	armstrongit II	zirkon II
CaO	0,25	2,21	8,13	0,08
Na <sub>2</sub> O	6,19	5,41	0,05	bd
K <sub>2</sub> O	0,11	0,05	0,06	bd
SiO <sub>2</sub>	62,40	60,52	59,48	31,78
ZrO <sub>2</sub>	21,57	18,83	19,24	63,66
HfO <sub>2</sub>	0,44	0,41	0,64	0,97
MnO	bd	0,02	0,04	0,02
FeO	0,22	0,07	0,34	0,39
TiO <sub>2</sub>	0,13	0,02	0,03	0,06
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,22	0,79	0,37	n.a.
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.a.	n.a.	0,16	bd
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.a.	n.a.	0,28	bd
celkem	91,52	88,33	88,82	96,95
(ppm)				
La	449,0	512,7	1276,3	27,8
Ce	762,4	916,1	2156,2	66,5
Pr	81,5	98,8	768,0	35,1
Nd	211,1	283,7	1533,7	79,2
Sm	72,5	89,3	426,8	20,6
Eu	8,8	10,3	15,1	13,0
Gd	68,5	95,7	521,5	52,2
Tb	8,5	10,7	14,6	6,3
Dy	50,8	263,5	570,5	33,6
Ho	7,4	49,2	99,2	5,4
Er	15,6	319,5	821,2	9,3
Tm	2,4	51,7	92,3	1,4
Yb	10,8	258,5	712,6	6,9
Lu	1,1	21,3	31,8	0,9

zirkonu a armstrongitu). Mikrosondové studium odhaluje vyrovnané chemické složení, kde kromě hlavních prvků Na, Ca, Zr a Si přistupují v nízkých koncentracích i REE, Al a Fe vázané na mikroskopické pevné inkluze ve tvaru mikroskopických lamel.

Detailní laboratorní výzkum mikroprvků (tab. 1 a obr. 4) s využitím LA-ICP-MS dokládají diferenciaci mezi stopovými prvky. Naše studium se zaměřilo přednostně na diferenciaci REE u primárního a sekundárního elpiditu, jakož i na ně vázaných odmíšenin zirkonu, armstrongitu a gitinsitu, kdy dochází až k řádovému

obohacení HREE, které vždy převažují nad LREE, v případě novotvořených fázích na úkor primárního alterovaného elpiditu. Nejvyšší obohacení HREE je patrné u sekundárního zirkonu, naopak až o dva řády vyšší obohacení bylo pozorováno v případě armstrongitu.

## Závěr

Náš výzkum a nově probíhající revize žilných hornin se zaměřením na alkalické pegmatity západní ringové struktury masivu Khan Bogd odhalily širokou škálu minerálních výskytů.

U všech žilných granitoidních hornin dochází k rekrystalizaci a metasomatickým přeměnám minerálů obsahujících vzácné prvky. Nejčastějším jevem je rekrystalizace a alterace primárního elpiditu I doprovázená vznikem elpiditu II a odmíšenin zirkonu, armstrongitu a gitinsitu, u kterých dochází až k řádovému obohacení HREE oproti elpiditu I.

*Poděkování. Za podnětné připomínky k původní práci děkujeme recenzentům a konzultantům článku, zejména pak prof. M. Novákoví, RNDr. S. Houzarovi, Dr. A. Rečnikoví a RNDr. P. Hanžlovi.*

## Literatura

- BOYTON, W. V. (1984): Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: HENDERSON, R., Ed.: Rare Earth Element Geochemistry-Developments in Geochemistry 2, 89–92. – Elsevier, Amsterdam.
- KOVALENKO, V. I. – KUZMIN, M. I. – PAVLENKO, A. S. – PERFILEV, A. S. (1973): South Gobi Belt of Rare-Metal Alkaline Rocks in People's Republic of Mongolia and Its Structural Position. – Dokl. Akad. Nauk SSSR, 210, 4, 911–914 (v ruštině).
- KOVALENKO, V. I. – YARMOLUYK, V. V. (1995): Endogenous Rare Metal Ore Formations and Rare Metal Metallogeny of Mongolia. – Econ. Geol., 90, 520–529.
- KOVALENKO, V. I. – YARMOLUYK, V. V. – SAL'NIKOVA, E. B. – KOZLOVSKI, A. M. – KOTOV, A. B. – KOVACH, V. P. – SAVATENKO, V. M. – VLADYKIN, N. V. – PONOMARCHIK, V. A. (2006): Geology, Geochronology, and Geodynamics of Khan Bogd Alkali Granite Pluton in South Mongolia. – Geotectonics, 40, 450–466.