

**M A S A R Y K O V A
U N I V E R Z I T A**

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Olovo v minerálech turmalínové superskupiny

Rešerše k diplomové práci

Monika Kubernátová

Vedoucí práce: doc. Mgr. Jan Cempírek, Ph.D.
Ústav geologických věd

Brno 2020

Obsah

Úvod	9
Superskupina turmalínu	10
Struktura a složení minerálů skupiny turmalínu	10
Klasifikace minerálů superskupiny turmalínu	11
Substituce v turmalínu	12
Homovalentní	12
Heterovalentní	12
Turmalíny s velkými kationty v pozici X (K, Pb, Sr)	13
K-bohaté turmalíny	13
Povondrait	13
Maruyamait	13
Pb-bohaté turmalíny	14
Sr-bohaté turmalíny	15
Syntetické turmalíny s velkými kationty (Pb, K, Sr)	16
Pb-bohaté turmalíny	16
K-bohaté turmalíny	16
Sr-bohaté turmalíny	16
Studované lokality	17
Pegmatit Minh Tien, Vietnam	17
Geologie oblasti	17
Stavba a složení pegmatitu	18
Pegmatit Tennvatn, Norsko	19
Geologie pegmatitové oblasti Tysfjord-Hamarøy	19
Stavba a složení pegmatitu	20
Ifasina a Ambatofinandrahana, Madagaskar	22
Seznam literatury	25
Internetové zdroje	27

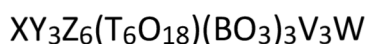
Úvod

Rešeršní část je zaměřena na velké kationty, jakožto neobvyklé prvky, vstupující do hlavní pozice X; také na doposud známé syntetizované analogy s (Pb, K, Sr) ve struktuře; na shrnutí dosavadních poznatků o zájmových lokalitách, odkud studované vzorky k diplomové práci pocházejí.

Superskupina turmalínu

Struktura a složení minerálů skupiny turmalínu

Turmalín je trigonální borosilikát (obr. 1) s obecným vzorcem



Jednotlivé pozice (podle prací Hawthorne a Henry 1999, Henry et al. 2011) mohou být obsazeny následujícími ionty:

X = Na¹⁺, Ca²⁺, K⁺, □ (vakance)

Y = Al³⁺, Li¹⁺, Fe²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺, Co²⁺, Cu²⁺, Fe³⁺, Cr³⁺, V³⁺, Ti⁴⁺

Z = Al³⁺, Fe³⁺, Cr³⁺, V³⁺, Mg²⁺

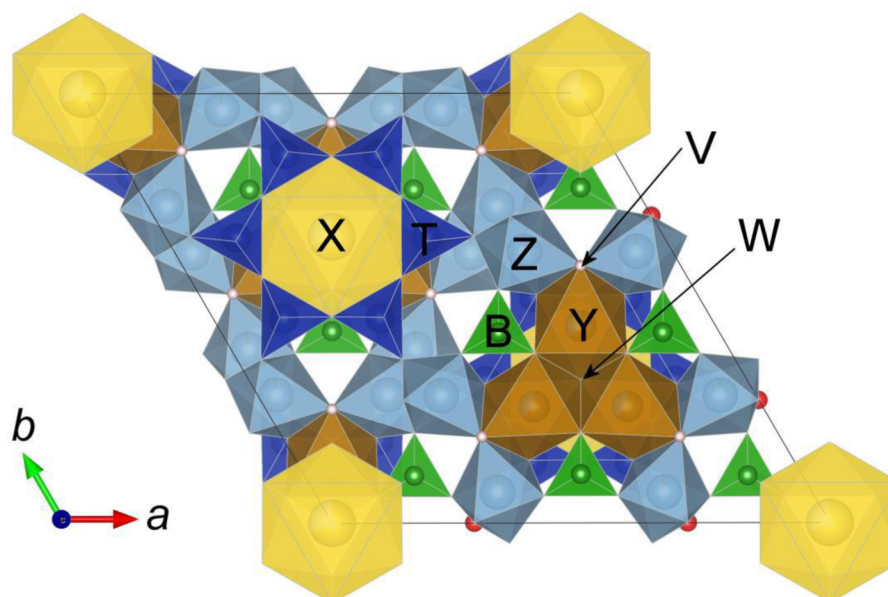
T = Si⁴⁺, Al³⁺, B³⁺

B = B³⁺

V = OH¹⁻, O²⁺

W = OH¹⁻, F¹⁻, O²⁻

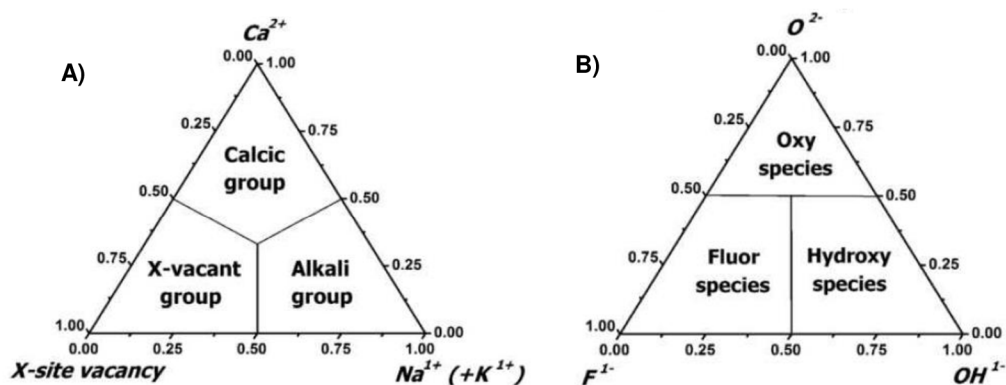
Z těžkých kovů bylo v přírodních turmalínech vzácně zjištěno např. olovo a bismut; Sokolov a Martin (2009) uvádí až 17,5 hm. % PbO a zvýšený obsah bismutu až 0,26 hm. % Bi₂O₃ naměřili Beurlen et al. (2011).



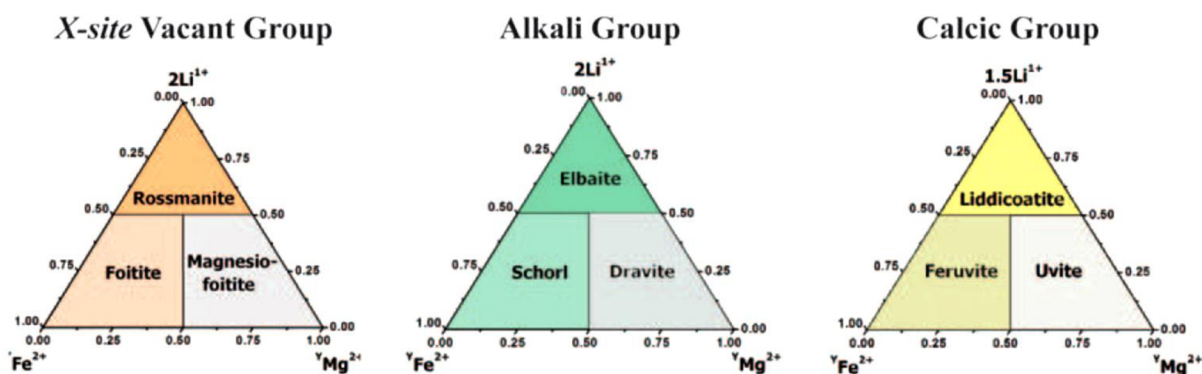
Obrázek 1. Krystalová struktura turmalínu a strukturální pozice turmalínové superskupiny; převzato z Cempírek (2016).

Klasifikace minerálů superskupiny turmalínu

Klasifikace superskupiny turmalínu se zakládá se na dominanci kationtů v jednotlivých pozicích. V současnosti platná klasifikace (Henry et al. 2011) schválená International Mineralogical Association (IMA) rozděluje superskupinu turmalínu na skupiny a podskupiny. Hlavní dělení na skupiny je podle strukturní pozice X, podle převládajícího náboje kationu (obr. 2A): alkalická (převládá náboj 1+, kationy Na^{1+} , K^{1+}); vápenatá (převládá náboj 2+, kationy Ca^{2+} a Pb^{2+}), vakantní (převládá náboj 0, pozice je převážně prázdná). Každou hlavní skupinu lze rozčlenit do několika podskupin dle heterovalentních substitucí v ostatních pozicích, především v pozici W (obr. 2B), v pozici Y (obr. 3) a dalších (Henry et. al., 2011).



Obrázek 2. Klasifikační diagramy rozdělující turmalíny: A) do hlavních skupin podle obsazení kationů v pozici X; B) do tříd na základě obsazení aniontů v pozici W; převzato z Henry et al. (2011).



Obrázek 3. Klasifikační diagramy jednotlivých skupin minerálů superskupiny turmalínu; převzato z Hawthorne a Dirlam (2011).

Substituce v turmalínu

Turmalíny jsou borosilikáty s variabilním chemickým složením a flexibilní strukturou, která umožňuje širokou škálu substitucí (Henry et al. 2011).

Substituce se dělí na homovalentní a heterovalentní.

Homovalentní substituce probíhají u iontů se stejně velkým nábojem (valencí). Naproti tomu heterovalentní substituce se dějí u iontů s různým nábojem.

Homovalentní

Nejběžnější homovalentní substitucí jednomocných kationtů je podle Henryho et al. (2011) v **pozici X**, a to $\text{Na}^{1+} \leftrightarrow \text{K}^{1+}$; uplatňuje se ale v omezeném množství.

Homovalentní substituce dvojmocných kationtů mohou probíhat v **pozici X** (např. CaPb_{-1}), ale více se uplatňují v **pozicích Y a Z**, kde se jich mohou účastnit kationty jako Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} . Nejběžnější substituce je $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$. Kationty železa a hořčíku jsou obvykle přítomné v **pozici Y**, ale mohou vstupovat i do **pozice Z**, obvykle v koncentracích do 2 apfu. Současný vstup stejných kationtů do více strukturálních pozic se označuje jako disorder (neuspořádanost).

Homovalentní substituce trojmocných kationtů se objevují v **pozicích Y, Z a T**. Objevují se zde kationty jako Al^{3+} (pozice Y, Z, T), Fe^{3+} , Cr^{3+} a V^{3+} (pozice Y, Z). Běžnou substitucí je $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+}$. Pokud je v pozici W O^{2-} , tak je pravděpodobná neuspořádanost R^{3+} a R^{2+} (nejčastěji Al a Mg) mezi pozicemi Y a Z, tj. přítomnost ${}^Z\text{Mg}$ a ${}^Y\text{Al}$.

Heterovalentní

Nejběžnější heterovalentní substitucí je vstup Li do **pozice Y**, pomocí heterovalentní substituce ${}^Y2\text{R}^{2+} \leftrightarrow {}^Y\text{Li}^{1+} + {}^Y\text{Al}^{3+}$.

Běžná je i heterovalentní deprotonační substituce, tj. vstup O^{2-} do **pozice W** nebo **V**: $\text{R}^{2+} + \text{OH}^{1-} \leftrightarrow \text{R}^{3+} + \text{O}^{2-}$.

Dalším typem, který může probíhat v **pozici T**, je Tschermakova heterovalentní substituce. Trojmocné kationty (typicky Al nebo B) vstupují do tetraedrické pozice prostřednictvím substituce $\text{R}^{2+} + {}^T\text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{R}^{3+} + {}^T\text{R}^{3+}$ (Henry et al. 2011).

Turmalíny s velkými kationty v pozici X (K, Pb, Sr)

Henry et al. (2011) uvádí v pozici X (s 9-ti četnou koordinací) přítomnost kationtů s velkými iontovými poloměry, především K^+ a Pb^{2+} . Oba tyto kationty mají větší iontový poloměr než Na^+ a Ca^{2+} (tab. 1). Další kationty (např. Sr^{2+} , Rb^+ , Cs^+ , atd.) se v turmalínu vyskytují pouze ve stopovém množství několika desetin nebo setin apfu (apfu = atoms per formula unit; Henry et al. 2011).

Tabulka 1: Iontové poloměry vybraných jedno- a dvojmocných kationtů v devítičetné koordinaci (Shannon, 1976)

Kationt	Náboj	Koord.č.	Iontový poloměr
Ca	2+	9	1.18
Na	1+	9	1.24
Sr	2+	9	1.31
Pb	2+	9	1.35
Ba	2+	9	1.47
K	1+	9	1.55
Rb	1+	9	1.63
Cs	1+	9	1.78

K-bohaté turmalíny

Povondrait $[NaFe_3^{3+}(Mg_2Fe_4^{3+})Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_3O]$ detailně popsali Žáček et al. (2000) na typové lokalitě Alto Chapare v Bolívii, kde se vyskytuje v „sádrovcovém klobouku“ ve svrchní části tělesa metaevaporitu. Povondrait zde obsahuje až 2,39 hm.% K_2O (až 0,635 apfu K), jedná se o Ti-bohatý K-analog povondraitu. Obsahuje až 0,56 apfu Ti^{4+} a variabilní vysoké obsahy Fe^{3+} (3,24-7,4 apfu). Žáček et al. (2000), popsali hlavní substituce v povondraitu pomocí substitučních vektorů $FeAl_{-1}$, $R^{3+}O(MgOH)_{-1}$, $TiOR^{3+}_{-1}(OH)_{-1}$, a KNa_{-1} .

Maruyamait $[K(MgAl_2)(Al_5Mg)Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_3O]$ je první K-dominantní turmalín v turmalínové superskupině, draselný analog oxy-dravitu. Vyskytuje se v jádrech v chemicky zonálních krystalech turmalínu ve vrstvách křemen-živcových hornin v ultravysokotlakých diamantonosných pelitických rulách v oblasti Kumdy-Kol v masívu Kokchetav v severním Kazachstánu. Jádra turmalínu (maruyamaitu) obsahují mikrodiamantové inkluze; směrem k okraji zrn klesá obsah K (jedná se o K-bohatý dravit nebo oxy-dravit) a namísto diamantu se objevuje grafit. Maruyamait pravděpodobně krystalizuje za extrémně vysokých tlaků metamorfózy, za přítomnosti vysoce draselných fluid. Obsahuje až 2,54 hm.% K_2O , což odpovídá až 0,53 apfu K (Lussier et al. 2016). Maruyamait vzniká z oxy-dravitu substitucí ${}^xK \rightarrow {}^xNa$.

Pb-bohaté turmalíny

Turmalíny se zvýšeným obsahem PbO byly potvrzeny na pěti dosud známých lokalitách na světě.

Na první lokalitě **Minh Tien** uvádějí Sokolov a Martin (2009) až 17,5 hm.% PbO v bezbarvém okraji krystalu turmalínu (což odpovídá zhruba 0,74 apfu Pb ve vzorci). Jádru turmalínu je modré a obsahuje 10 hm.% FeO. Zjištěné domény Pb-analogu liddicoatitu s anomálně vysokým množstvím olova tvoří zóny nepravidelného tvaru o velikosti 20 x 150 μm , v heterogenním turmalínu s výraznou chemickou zonalitou. Doprovází ho amazonitický K-živec (někdy „ušlechtilý“, drahokamový), obsahuje přitom pouze 0,7 hm.% PbO. Autoři se dále domnívají, že olovo vstoupilo do struktury turmalínu z amazonitu a jeho hydrotermální rekrystalizací u něj došlo ke ztrátě zelené barvy; uvádějí také substituci olova do amazonitu, a to $\text{Pb}^{2+} + \square \rightarrow 2 \text{K}^+$. Později v roce 2019, byly autorkou této práce zkoumány vzorky turmalínů z této lokality (Kubernátová 2019; Kubernátová a Cempírek 2019).

Sokolov a Martin (2009) ve svém abstraktu také zmiňují další lokalitu, kde na vzorcích naměřili až 15,4 hm.% PbO v blíže nespecifikovaném pegmatitu v oblasti **Alto Ligonha** (severní Mozambik).

Zvýšený obsah Pb v turmalínu byl nalezen na typové lokalitě liddicoatitu **Anjanaboina** (Madagaskar), kde Lussier et al. (2011) naměřili v růžovém jádře zonálního krystalu fluor-liddicoatitu obsahy PbO až 0,6 hm.%, jehož obsahy klesaly směrem k okraji. Světle zelená zóna turmalínu obsahovala do 0,3 hm.% PbO a tmavě zelená zóna ještě méně, a to max. 0,17 hm.% PbO (Lussier et al. 2011a,b; Lussier a Hawthorne 2011). Lussier et al. (2011b) podrobně popsali 6 typů substitucí pro různé zóny v turmalínu.

Další lokalitou, kde bylo zaznamenáno Pb v turmalínu je **Momeik** (Myanmar). Byl zkoumán „houbovitý“ turmalín se zvýšeným obsahem Pb (1640 ppm; zjištěno pomocí ICP-MS a 0,184 hm.% PbO pomocí EMPA). Dle výsledků z EMPA, odpovídá agregát Li-bohatému olenitu světle růžové barvy (Ertl et al. 2007).

Také v **Kreuzeck Mountains** (východní Alpy, Rakousko) byl nalezen turmalín se zvýšeným obsahem Pb. Tento vysokotlaký turmalín byl významně obohacen také o Sr. Z hlediska chemismu byl naměřen v zóně 4 u turmalínu vysoký obsah 0,64 hm.% SrO (0,06 apfu Sr^{2+}) a zvýšený obsah PbO_4 (0,54 hm.% ; 0,02 apfu Pb^{4+}). Autoři se domnívají, že Pb zoxidovalo na Pb^{4+} , neboť asi 80% z Fe_{total} bylo zoxidované; navíc Pb^{4+} má výhodnější iontový poloměr (0,78 Å) v 6-ti čtne koordinaci, který je u Fe^{2+} velikostně stejný (0,78 Å) a Mg (0,72 Å) i z tohoto důvodu autoři usuzují, že malé množství Pb (0,02 apfu) se strukturně nachází pravděpodobně v Y-pozici. Turmalín je navíc problém klasifikovat díky chybě v odhadovaném množství OH, možné zařazení turmalínu jako dravit–oxy-dravit–buergerit (Ertl et al. 2019). Podle autorů se kationt Pb^{4+} nachází v pozici Y; tuto domněnku revidovali Ertl a Bačík (2020) na Pb^{2+} v pozici X.

Sr-bohaté turmalíny

V roce 1968 Peltola et al. popsali 0,36 hm. % SrO v Cr,Mg-bohatém zeleném turmalínu z **Outokumpu** (Finsko). Turmalíny byly nalezeny v Cr-bohatých tremolitových skarnech.

Bačík et al. (2012) zkoumali turmalíny pocházející z dolomitických mramorů v blízkosti **Prosetína** (Česká republika). V Mg-bohatých turmalínech modrošedé barvy naměřili pomocí metody LA-ICP-MS až 337 ppm Sr (~0,34 hm.% Sr). Autoři shledali pozitivní korelaci mezi Sr a Ca v turmalínu ($r^2=0,77$). Některé analýzy turmalínů odpovídaly svým složením oxy-dravitu a některé magnesio-foititu. Autoři uvádějí 3 typy substitucí podle složení: v Ca-bohatém dravitu se uplatňuje substituce $\text{CaMg}(\text{NaAl})_{-1}$, v magnesio-foititu je substituce $\text{X}\square\text{Al}(\text{NaMg})_{-1}$ a v případě oxy-dravitického složení turmalínu objevuje substituce $\text{AlO}(\text{MgOH})_{-1}$.

Konzett et al. (2012) uvádí 0,15-0,56 hm. % SrO také v relativně homogenním vysokotlakém turmalínu hnědé barvy z **Kreuzeck Mountains** (východní Alpy, Rakousko).

Ertl et al. (2019) naměřili doposud nejvyšší množství Sr^{2+} v hnědém turmalínu, pocházejících z eklogitů, v **Kreuzeck Mountains**. Nejvyšší publikované obsahy SrO dosahovaly až 0,64 hm. % v turmalínu (0,06 apfu Sr^{2+}). Obohacení stronciem v turmalínu bylo vysvětleno tak, že v pozici X se nahrazuje sodík za stroncium.

Syntetické turmalíny s velkými kationy (Pb, K, Sr)

Pb-bohaté turmalíny

Kolektivu Vereshchagin et al. (2020) se podařilo vytvořit v laboratoři syntetický Pb-bohatý turmalín, hypotetický Pb analog oxy-uvitu. Turmalíny syntetizovali za těchto podmínek: 700 °C and 200 MPa ve dvou hydrotermálních experimentech – vzorek (OV-4-2) v systému MgO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂-PbO-H₂O; vzorek (OV-5-3) v systému o složení MgO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂-PbO-CaO-Na₂O-H₂O. První vzorek (OV-4-2) vytvořil jehlicovité krystaly, chemicky homogenní (v délce do 7 μm), bohaté na Pb (až do 13,3 hm.% PbO). Druhý vzorek (OV-5-3) tvořil sloupcovité chemicky zonální krystaly s délkou do 400 μm, a Pb-bohatým jádrem max. do 14,7 hm.% PbO a Pb-chudými okraji, ~2 hm. % PbO. Přídavnými fázemi v OV-4-2 byly ve stopovém množství Pb-živec, křemen, a diaspor, a v případě vzorku OV-5-3 pak mastek, mullit, spinel, a křemen.

Pomocí monokrystalového vypřesnění struktury (Single Crystal Structure Refinement – SREF) se podařilo dokázat, že v centrální zóně Pb-bohatého turmalínu (OV-5-3) obsazuje X-pozici ve struktuře turmalínu kationt Pb²⁺. Chemický vzorec odvozený z SREF výsledků Pb-turmalínu je $X(\text{Pb}_{0,63}\square_{0,37}) Y(\text{Al}_{1,71}\text{Mg}_{1,29}) Z(\text{Al}_{5,04}\text{Mg}_{0,96}) T(\text{Si}_6\text{O}_{18}) (\text{BO}_3)_3 V(\text{OH})_3 W(\text{O}_1)$. Podle autorů olovo substituje za vápník a sodík v pozici X (Vereshchagin et al. 2020).

K-bohaté turmalíny

První známou syntézu “K-dravitu” provedli Berryman et al. (2014). Největší krystal měl 50 μm na délku a 8 μm na šířku a obsahoval až 3,44 hm.% K₂O. Syntéza proběhla při tlaku 4 GPa a teplotě 700°C.

O rok později vyšel podrobný článek o hydrotermální syntéze (Berryman et al., 2015) K-bohatého dravitického turmalínu v systému MgO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂-KCl-NaCl-H₂O ze směsi oxidů při nadbytku fluid a teplotách v roamezi 500–700 °C a tlacích 0,2–4 GPa. Syntézu prováděli po dobu 4 až 25 dnů. Autoři přišli na to, že vstup draslíku do pozice-X roste se zvyšujícím se tlakem, teplotou a koncentrací KCl. Maximální množství draslíku v syntetizovaném K-dravitu (=0,71 apfu K; 0,21 pfu vakance) vstoupilo při 4 GPa a 700 °C. Dále uvádějí substituce společné pro dravit/ K-dravit, X-vakantní turmalín a magnesio-foitit $X\text{R}^+ + Y\text{Mg}^{2+} = X\square + Y\text{Al}^{3+}$. Všechny syntetizované krystaly byly zonální. Výsledek svého zkoumání srovnali s maruyamaitem z Kokchetav Masivu (Kazachstán) a naznačili, že přírodní turmalín mohl být tvořen v K-bohatém, Na-chudém prostředí při velmi vysokém tlaku, blízkému poli stability diamantu.

Sr-bohaté turmalíny

Vereshchagin et al. (2019) v abstraktu uvádějí, že syntetizovali Sr-bohatý turmalín až do ~2 hm.% SrO (0,2 apfu Sr).

Studované lokality

Oproti dosud známým publikovaným lokalitám s výskytem Pb-bohatého turmalínu jako je **Minh Tien** (Vietnam), se podařilo objevit nové potenciálně zajímavé lokality – a to **Tennvatn** (Norsko); **Ifasina** (Madagaskar), **Ambatofinandrahana** (Madagaskar), **Rio Grande do Sul** (Brazílie). V případě Ambatofinandrahany se může jednat o identickou lokalitu s Ifasinou.

Pegmatit Minh Tien, Vietnam

Geologie oblasti

Přibližně od 80. let 20. století se v blízkém okolí města Luc Yen ve vietnamské provincii Yen Bai těží z říčních sedimentů rubíny, safíry, spinely a další drahé kameny (obr. 4; z Nhung et al. 2017). Rozloha oblasti Luc Yen je přibližně 800 km²; protíná ji řeka Chay River. Z geologického hlediska ji tvoří dvě strukturní jednotky oddělené zlomem Chay River Fault; na JZ od zlomu je to zóna Red River tvořená metamorfity paleoproterozoického stáří, a SV pak zóna jednotka Lo Gam tvořená neoproterozoickými metamorfity a paleozoickými metamorfity, magmatity a sedimenty. V obou jednotkách se objevují i terciérní granitoidy komplexu Thia Ma, výrazně více zastoupené jsou ale v zóně Lo Gam (obr. 5; Nhung et al. 2017).

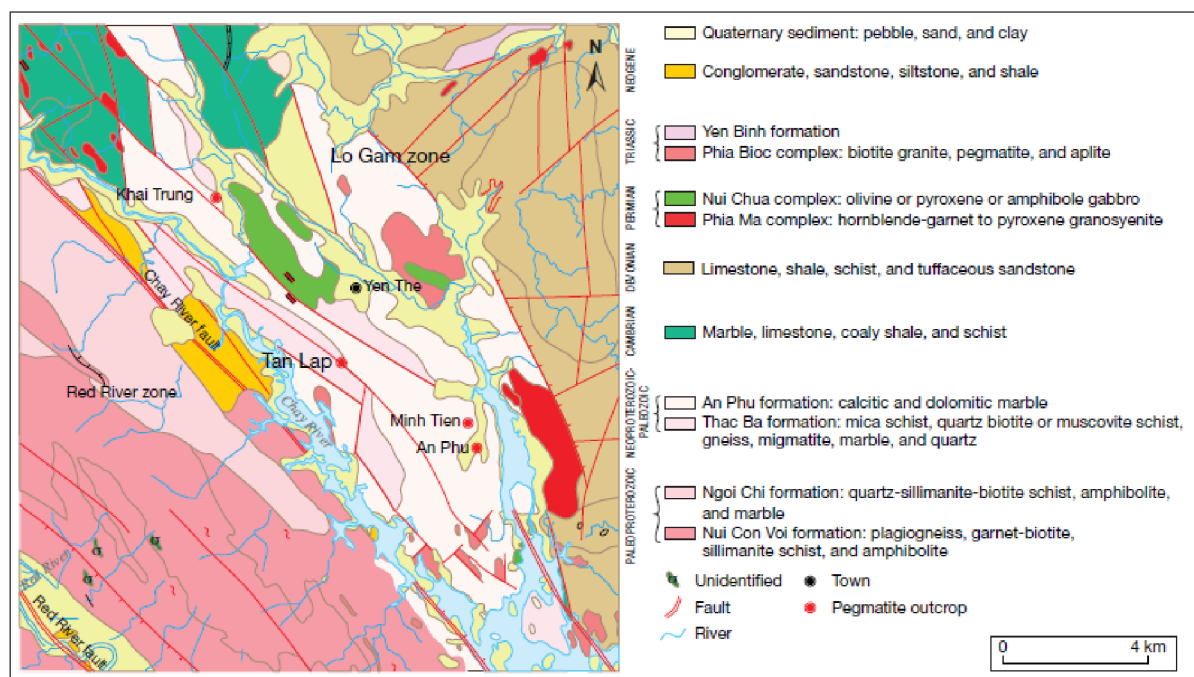


Obrázek 4. Poloha provincie Yen Bai (fialová čára) a oblasti města Luc Yen (červená čára); převzato z Nhung et al. (2017).

Gemologicky atraktivní turmalíny se nachází v granitických pegmatitech v zóně Lo Gam. Toto území je složeno z hornin neoproterozoického stáří, zahrnující především dvojslídne svory (s biotitem a muskovitem) s vložkami muskovitických svorů. Ve spodní části jednotky se objevují čočky mramorů a kvarcitů (formace Thac Ba), ve svrchní části (formace An Phu) jsou pak zastoupeny kalcitické a kalciticko-dolomitické vápence obsahující rubíny, safíry a spinely. Na povrchu převládají kvartérní aluviální a diluviální sedimenty; drahé kameny se často těží z těchto nezpevněných sedimentů. Magmatity jsou zastoupeny horninami variabilního složení a stáří, od paleozoického gabra, syenitu a granosyenitu

(komplexy Nui Chua a Phia Ma) po triasový granit (komplex Phia Bioc). Pegmatitové žíly se objevují po celém území, hlavně na jihovýchodě a severozápadě oblasti (obr. 5; Nhung et al. 2017).

Původ pegmatitů není patrně vázán na výše uvedené magmatické horniny. Živec z pegmatitu Minh Tien byl datován na 30,58 milionu let (Nhung et al., 2007, in Nhung et al., 2017), což odpovídá stáří zchladnutí flogopitu (tzv. cooling age; zchladnutí pod cca. 400 °C), který se vyskytuje v asociaci s rubíny (30,6 Ma metodou Ar-Ar; Garnier et al. 2002). Pegmatity proto patrně nesouvisí s paleozoickou či triasovou magmatickou aktivitou, ale vznikly během terciéru; jsou pravděpodobně vázány na kenozoický magmatismus vázaný na projevy kolize Indie a Eurasie v severním Vietnamu (Nhung et al. 2017).



Obrázek 5. Geologická mapa oblasti Luc Yen; převzato z Nhung et al. (2017).

Stavba a složení pegmatitu

Lokalita Minh Tien je tvořena granitickým pegmatitem pravděpodobně z pozdního eocénu až svrchního eocénu, umístěn v rubínovém mramoru kambrického stáří (Sokolov a Martin 2009); podle Wilsona (2007) byl těžen z primárního ložiska i z aluviálních sedimentů. Pegmatit obsahuje dutiny o rozměrech až 1 x 1,5 x 2,5 m. Wilson (2007) cituje abstrakt R.F. Martina, který uvádí, že výskyt ušlechtilého (průhledného) amazonitu (obsahuje 0,81 hm.% PbO a 0,65 hm.% Rb₂O). Průhlednost je dána absencí perthitů a zachováním ortoklasu, což autoři vysvětlují „karbotermálními“ fluidy, které unikly z pegmatitu při teplotě větší než 450 °C. Uvádí, že se jedná o hybridní NYF pegmatit, vzniklý v extenzivním tektonickém režimu, který byl kontaminován (Ca, B, H₂O) z okolí. Sokolov a Martin (2009) již uvádí, že se jedná o NYF pegmatit anatektického původu, Nhung et al. (2017) ale předpokládají magmatický původ.

Barevné turmalíny se zde vyskytují v asociaci s amazonitovým K-živcem, albitem, křemenem a lepidolitem. Turmalíny mohou být bezbarvé, šedé, růžové, zelené, žluté, hnědé a fialové; našly se krystaly až 20 cm velké a vážily až 2-3 kg (Wilson 2007).

Pegmatit Tennvatn, Norsko

Pegmatit se nachází v severní části Norska, v oblasti Tysfjord-Hamarøy, obci Sørfold. Lokalita Tennvatn byla těžena pro amazonit během krátkého období v 60. letech 20. století za účelem využití jako polodrahokam (Husdal et al., 2017). Jedná se o NYF pegmatit bohatý amazonitem s minerály beryllia a arsenu (Ralph, 2020).

Geologie pegmatitové oblasti Tysfjord-Hamarøy

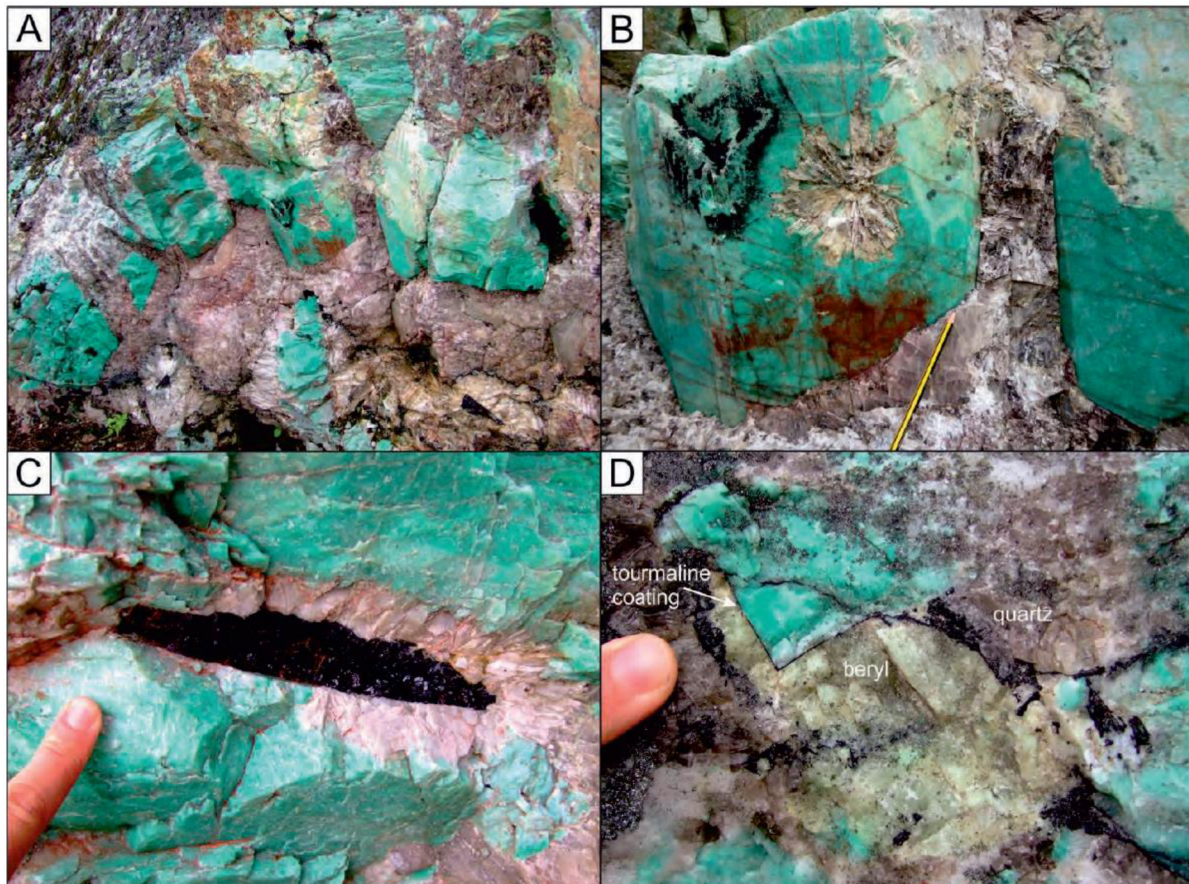
Pegmatity této oblasti jsou klasifikovány jako klasické NYF pegmatity relativně bohaté na F a geneticky související s A-typovými tysfjordskými granity. Mezi hlavní akcesorické minerály těchto pegmatitů patří allanit-(Ce), fergusonit-(Y), columbit-(Fe), beryl, různé sulfidy a fluorit. Křemeny, které obecně pocházejí z Tysfjord-Hamarøyských pegmatitů mají nízkou koncentraci stopových prvků (Husdal et al., 2017).

Těžba v oblasti v Tysfjord-Hamarøy začala v roce 1906 a nepřetržitě trvala až do roku 1970. Většina pegmatitů byla těžena pro živec, některé pro křemen a minoritně fluorit (Husdal et al., 2017).

Husdal a Škoda (2020) uvádějí, že pegmatit Tennvatn proniká do „Tysfjordské žuly“, několika deformovaných 1800 Ma starých suterénních žulových granitů, patřících k transscandinavian igneous belt (TIB). Deformace, která proniká granity neovlivnila pegmatit a radiometrické datování naznačilo, že je pegmatit post-kaledonského stáří.

Stavba a složení pegmatitu

Těleso pegmatitu je relativně malé, tvoří 25 m dlouhé nepravidelné těleso s ostrými hranicemi s „Tysfjordskou žulou“. Pegmatit je chemicky velmi vyvinutý, bohatý na amazonit, křemen a cleavelandit, s běžným skorylem (do 30 cm). Tento pegmatit patří ke druhému typu, který se v oblasti Tysfjord-Hamarøy nachází, je nedeformovaný a ukazuje klasickou vnitřní stavbu (obr.6; Husdal et al. 2017).

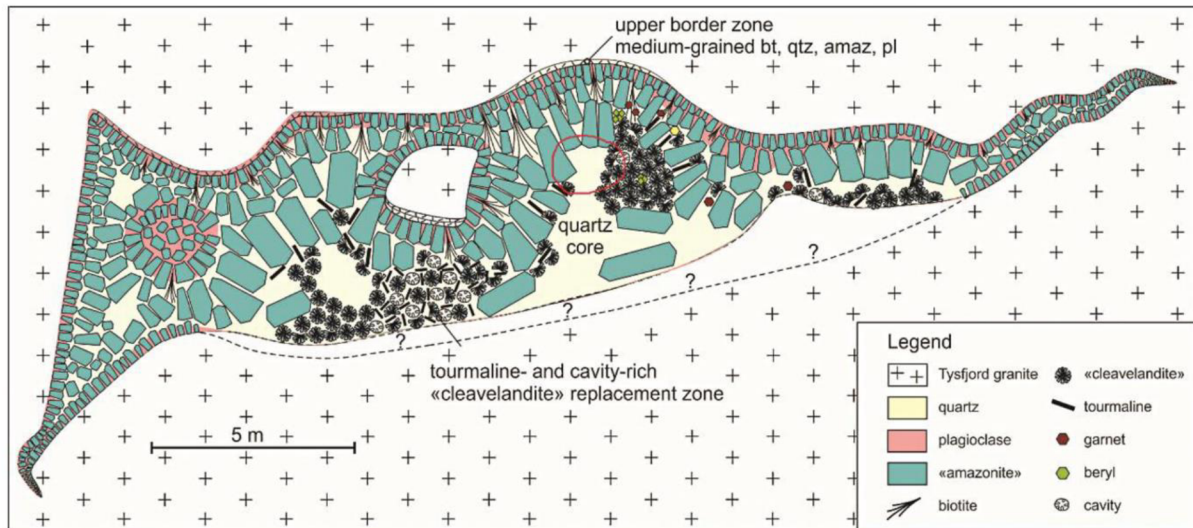


Obrázek 6. Textura pegmatitu Tennvatn; **A** – euhedrání krystaly amazonitu (velikost do 50 cm) zarostlé v křemeni, šířka záběru je 2 metry; **B** – amazonit s černým turmalínem a radiálně paprscitým cleavelanditem, detail fotografie (A); **C** – velký černý turmalín obrostlý cleavelanditem a amazonitem; **D** – anhedrání nažloutlý beryl obklopený amazonitem a křemenem, amazonit je potažen černým turmalínem; převzato z Husdal et al. (2017).

Podle Husdala et al. (2017) tento zonální pegmatit obsahuje až 5 cm širokou granitickou hraniční zónu (pouze částečně vyvinutou podél svrchního kontaktu), hrubozrnnou „wall zone“ kde dominují velké amazonitové krystaly; blokovou intermediální zónou s masivním křemenem a velkými amazonitovými krystaly až do 1 metru. Zonálnost přetištěna cleavelanditovou zónou tvořící asi 25 obj.% pegmatitu. Právě tyto nahrazující zóny jsou bohaté

na dutiny (do 10 cm), kde z pozdních fluid vznikla řada vzácných minerálů s Pb, Bi, REE, As, F, Nb, Be, U, Th a Sb. Husdal a Škoda (2020) potvrdili post-tektonický (post-kaledonský) vývoj.

Hlavními minerály tohoto pegmatitu (obr.7) jsou mikroklin (amazonit), albit (cleavelandit) a křemen s menším množstvím muskovitu, biotitu a fluor-skorylu (Husdal et al. 2017). Převažujícím opákním minerálem je galenit a příležitostně lze také nalézt vláknité sulfosole jako cosalit, nuffieldit a minerály z řady aikinitu-bismutinitu (Husdal a Škoda, 2020).



Obrázek 7. Schématicky zjednodušený výchoz pegmatitu Tennvatn; převzato z Husdal a Škoda (2020).

Kolitsch et al. (2011) uvádí složení černého turmalínu (v amazonitu) z Tennvatn, turmalín chemicky odpovídá buď blízkému koncovému členu skorylu nebo fluor-skorylu. Množství fluoru bylo odhadnuto, nikoliv kvantitativně detekováno, (proto uvádí nejistou klasifikaci).

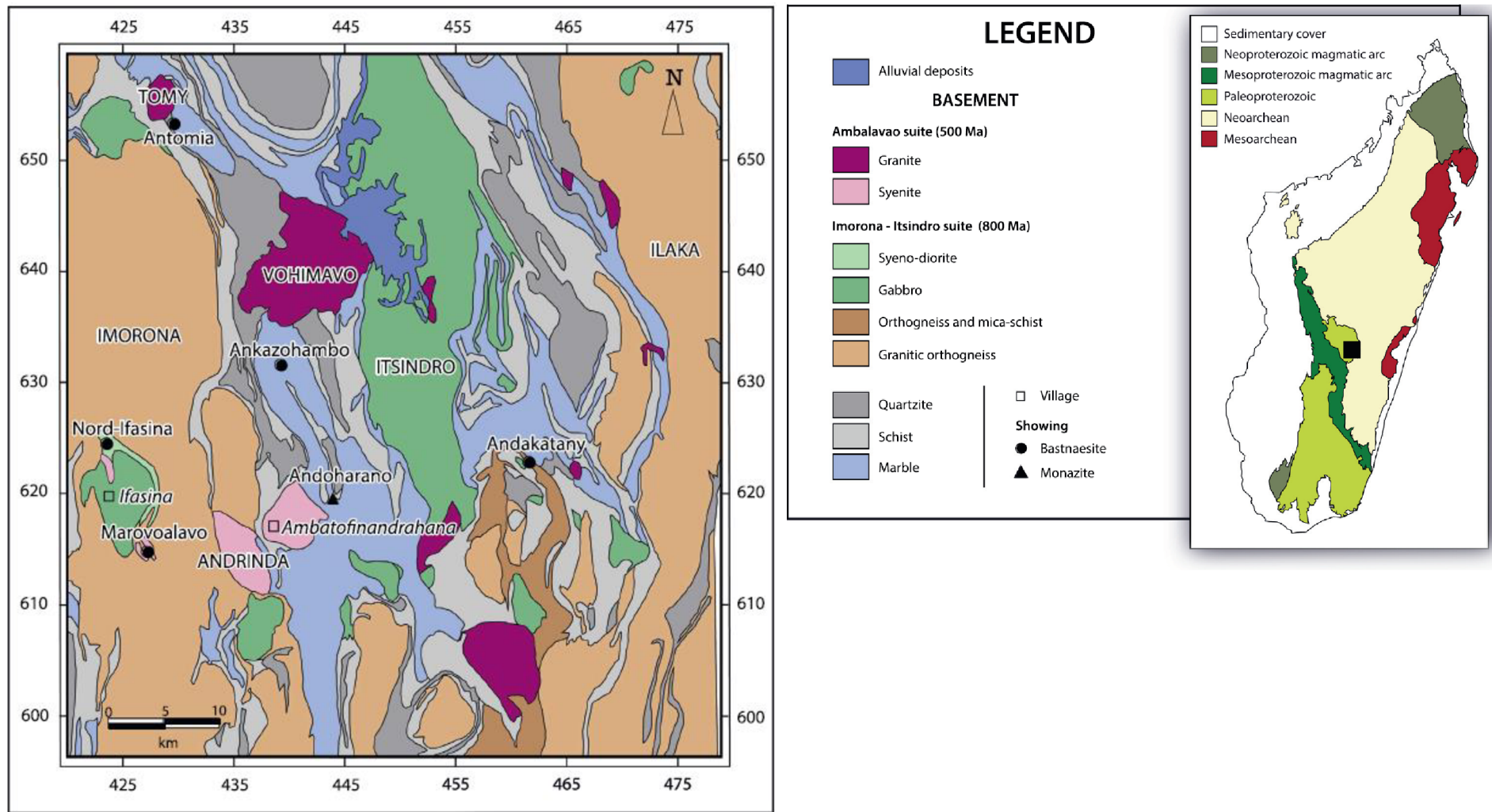
Ifasina a Ambatofinandrahana, Madagaskar

Obě lokality se nachází v centrálním Madagaskaru. Jsou to vesnice spadající pod oblast Ambatofinandrahana, provincii Fianarantsoa.

O geologických lokalitách v této oblasti nejsou podrobné informace. Zhruba 5 km severovýchodním směrem od Ambatofinandrahany se nachází naleziště monazitu – Andoharano (obr. 8). V okolí Ifasiny (asi 5 km v severním a jihovýchodním směru) jsou známy dvě naleziště bastnaesitu – Nord Ifasina v syeno-dioritech, Marovoalavo v syenitech; Rasoamalala et al. (2014).

Horniny této oblasti jsou odhadovány na paleoproterozoické stáří. (Rasoamalala et al. 2014).

O pegmatitech z této oblasti toho není v literatuře příliš známo. Podle informací dostupných z internetových zdrojů se amazonit těží v „Amazonite quarry“ především jako materiál pro dekorativní účely (Obr. 9 a 10; Gemsurfaces.com (2020); Madagascarminerals.com (2020).



Obrázek 8. Zjednodušená geologická mapa zájmové oblasti, černý čtverec zachycuje mapu v měřítku 1:200 000; převzato z Rasoamalala et al. (2014).



Obrázek 9. Fotografie odhaleného výchozu amazonitu a dalších minerálů v "Amazonite quarry"- Ifasina (Gemsurfaces.com, 2020).



Obrázek 10. Dobývání amazonitu v „Amazonite quarry“ (Gemsurfaces.com, 2020).

Seznam literatury

- Bačík, P., Uher, P., Cempírek, J., Vaculovič, T. (2012): Magnesian tourmalines from plagioclase-muscovite-scapolite metaevaporite layers in dolomite marble near Prosetín (Olešnice Unit, Moravicum, Czech Republic). – *Journal of Geosciences*, **57**, 143–153.
- Berryman, E., Wunder, B., Rhede, D. (2014): Synthesis of K-dominant tourmaline. – *American Mineralogist*, **99**, 539-542.
- Berryman, E., Wunder, B., Wirth, R., Rhede, D., Schettler, G., Franz, G., Heinrich, W. (2015): An experimental study on K and Na incorporation in dravitic tourmaline and insight into the origin of diamondiferous tourmaline from the Kokchetav Massif, Kazakhstan. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 169:28.
- Beurlen, H., De Moura, O. J., Soares, D. R., Da Silva, M. R., Rhede, D. (2011): Geochemical and geological controls on the genesis of gem-quality “Paraíba Tourmaline” in granitic pegmatites from northeastern Brazil. – *The Canadian Mineralogist*, **49**, 277-300.
- Cempírek, J. (2017): Natural Al-rich borosilicates – petrology, mineralogy, and crystal chemistry. – MS habilitační práce, PŘF MU, Brno.
- Ertl, A., Bačík, P. (2020): Considerations About Bi and Pb in the Crystal Structure of Cu-Bearing Tourmaline. – *Minerals*, **10**, 1-15.
- Ertl, A., Hughes, J.M., Prowatke, S., Ludwig, T., Brandstätter, F., Körner, W., Dyar, M.D. (2007): Tetrahedrally-coordinated boron in Li-bearing olenite from “mushroom” tourmaline from Momeik, Myanmar. – *The Canadian Mineralogist*, **45**, 891–899.
- Ertl, A., Topa, D., Giester, G., Rossman, G.R., Tillmanns, E., Konzett J. (2019): Sr-bearing high pressure tourmaline from the Kreuzeck Mountains, Eastern Alps, Austria. – *European Journal of Mineralogy*, **31**, 791–798.
- Garnier, V., Giuliani, G., Maluski, H., Ohnenstetter, D., Trong, T.P., Quang, V. H., Van, L.P., Van, T.V., Schwarz, D. (2002): Ar–Ar ages in phlogopites from marble-hosted ruby deposits in northern Vietnam: evidence for Cenozoic ruby formation. – *Chemical Geology*, **188**, 33-49.
- Hawthorne, F.C., Henry, D.J. (1999): Classification of the minerals of the tourmaline group. – *European Journal of Mineralogy*, **11**, 201-215. Stuttgart.
- Hawthorne, F.C., Dirlam, M.D. (2011): Tourmaline the indicator mineral: from atomic arrangement to Viking navigation. – *Elements*, **7**, 307-312.
- Henry, D., Novák, M., Hawthorne, F.C., Ertl, A., Dutrow, B., Uher, P., Pezzotta, F. (2011): Nomenclature of the tourmaline supergroup minerals. – *American Mineralogist*, **96**, 895-913.
- Husdal, T., Müller, A., Olerud, S., Thoresen, Ø. (2017): Pegmatites of the Tysfjord-Hamarøy area, northern Norway. In Müller et. al. (2017): Norwegian pegmatites! Tysfjord-Hamarøy, Evjelveland, Langesundsfjord. Geological Society of Norway, Geological Guides **6-2017**, 3-47.
- Husdal, T., Škoda, R. (2020): Sulfosalts of the aikinite-bismuthinite homologous series from the Tennvatn pegmatite, Nordland, Norway. *Norsk Mineralsymposium 2020*: 108-114.

Kolitsch, U., Husdal, T. A., Brandstätter, F., Ertl, A. (2011): New crystal-chemical data for members of the tourmaline group from Norway: occurrences of fluor-schorl and luinaite-(OH). Norsk Bergverksmuseum Skrift, **46**, 17–24.

Kubernátová, M. (2019): Složení Pb-bohatého turmalínu z pegmatite Minh Tien, Vietnam. MS, bakalářská práce. Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. Brno.

Kubernátová, M., Cempírek, J. (2019): Crystal chemistry of Pb-rich tourmaline. European Conference for Mineralogy and Spectroscopy 2019, Prague September 2019. Book of Abstracts.

Lussier, A.J., Abdu, Y., Hawthorne, F.C., Michaelis, V., Aguiar, P.M., Kroeker, S. (2011a): Oscillatory zoned elbaite–liddicoatite from central Madagascar. I. Crystal chemistry and structure by SREF and ^{11}B and ^{27}Al MAS NMR spectroscopy. – The Canadian Mineralogist, **49**, 63–88.

Lussier, A.J., Hawthorne, F.C. (2011b): Oscillatory zoned liddicoatite from central Madagascar. II. Compositional variation and substitution mechanisms. – The Canadian Mineralogist, **49**, 89–104.

Lussier, A.J., Ball, N. A., Hawthorne F. C., Henry, J. D., Shimizu, R., Ogasawara, Y., Ota, T. (2016): Maruyamaite, $\text{K}(\text{MgAl}_2)(\text{Al}_5\text{Mg})\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{O}$, a potassium-dominant tourmaline from the ultrahigh-pressure Kokchetav massif, northern Kazakhstan: Description and crystal structure. – American Mineralogist, **101**, 355–361.

Nhung N.T., Khoi N.N., Thuyet N.T.M., Nam N.V., Quynh P.V., Tich V.V. (2007) Establishment of some gemstone deposit types having industrial potential in Vietnam. Project QGTD.05.01 of Hanoi National University (ve vietnamštině; citováno v práci Nhung et al. 2017).

Nhung, N. T., Huong, L.T.T., Thuyet, N. T. M., Häger, T., Quyen, N.T.L., Duyen, T.T. (2017): An Update on Tourmaline Drom Luc Yen, Vietnam. – Gems & Gemology, **53**, 190–203. GIA, Carlsbad, USA.

Rasoamalala, V., Salvi, S., Béziat, D., Ursule, J. P., Cuney, M., De Parseval, P., Guillaume, D., Moine, B., Andriamampihantona, J. (2014): Geology of bastnaesite and monazite deposits in the Ambatofinandrahana area, central part of Madagascar: An overview. – Journal of African Earth Sciences, **94**, 128–140.

Shannon, R.D. (1976): Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. – Acta Crystallographica section A: crystal physics, diffraction, theoretical and general crystallography, **32**, 751–767.

Sokolov, M., Martin, R. (2009): A Pb-Dominant member of the Tourmaline Group, Minh Tien Granitic Pegmatite, Luc Yen district, Vietnam. – Estudios Geológicos, **19**, 2, 352–353.

Vereshchagin, O.S., Frank-Kamenetskaya, O.V., Wunder, B., Britvin, S.N., Rozhdestvenskaya, I.V. (2019): New synthetic tourmalines: crystal chemistry, functional properties and possible implication for geological reconstructions. 19. International Meeting on crystal chemistry, X-ray diffraction and spectroscopy of minerals, Apatity, Russia, July 2019. Abstract.

Vereshchagin O.S., Wunder B., Britvin S.N., Frank-Kamenetskaya O.V., Wilke F.D.H., Vlasenko N.S., Shilovskikh V.V. (2020): Synthesis and crystal structure of Pb-dominant tourmaline. *American Mineralogist*, in press. DOI: <https://doi.org/10.2138/am-2020-7457>.

Wilson, W.E. (2007): Tourmaline from the Minh Tien Pegmatite. – *Mineralogical Record*, **38**, 453-457.

Žáček, V., Frýda, J., Petrov, A., Hyršl, J. (2000): Tourmalines of the povondraite - (oxy)dravite series from the cap rock of meta-evaporite in Alto Chapare, Cochabamba, Bolivia. – *Journal of the Czech Geological Society*, **45**, 3-12.

Barreto, S.B., Bittar, S. M. B. (2010): The gemstone deposits of Brazil: occurrences, production and economic impact. – *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **62**, 123-140.

Internetové zdroje

Gemsurfaces.com (2020) Amazonite Quarry Ifasina. Online: <http://www.gemsurfaces.com/quarries/amazonite/>, 17. 9. 2020.

Madagascarminerals.com (2020) Amazonite. Online: <https://www.madagascarminerals.com/cat-amazonite2.cfm>, 17. 9. 2020.

Mindat.org (2020): Tennvatn pegmatite. Online: <https://www.mindat.org/loc-11289.html>, 17. 9. 2020.