

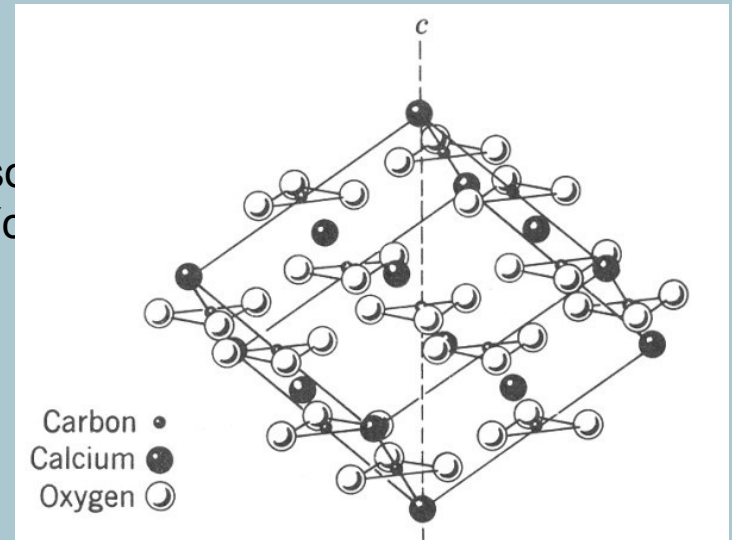
Mineralogie pro analytické geochemiky

**karbonáty, sulfáty, halovce, fosfáty,
oxidy, sulfidy, prvky**

KARBONÁTY

- Karbonáty - běžné minerály zemské kůry.
- Základem struktury karbonátů jsou aniontové skupiny $(\text{CO}_3)^{2-}$. Tvar koordinačního polyedru je – planární trojúhelník.

Struktura karbonátů (kalcitu). Základem struktury jsou atomy uhlíku v trojčetné koordinaci s kyslíkem tvořící trojúhelníkové skupiny kolmé na osu c . V mezivrstevních rovinách aniontových skupin jsou uloženy ionty Ca (Mg, Fe, Mn, Zn) v šestičetné koordinaci s kyslíky.



Dělení karbonátů:

podle přítomnosti /nepřítomnosti vody ve struktuře (bezvodé a vodnaté).

bezvodé karbonáty se dělí na skupiny: řada kalcitu, aragonitu a dolomitu.

KARBONÁTY

Skupina kalcitu - izostrukturální minerály

kalcit	CaCO_3
magnezit	MgCO_3
siderit	FeCO_3
rodochrozit	MnCO_3
smithsonit	ZnCO_3



dvojlom kalcitu

za vyšších teplot existuje dokonalá izomorfní mísitelnost mezi Ca, Mg, Fe, Mn, méně běžnými substituenty jsou Zn, Ba, Sr nebo Pb.

Krystaly klencové nebo skalenoedry, trigonální soustavě

Častěji ale jako agregáty kusové, zrnité, stébelnaté, oolity, krápníky

Relativně snadno rozpustný - často zatlačován křemenem, chalcedonem nebo limonitem



Stébelnatý agregát kalcitu



kusový agregát kalcitu



Krystaly kalcitu

Kalcit CaCO_3

- Barva: bílá, šedá, žlutá, načervenalá, namodralá, vzácně čirý – bezbarvý (tzv. „islandský vápenec“ s viditelným dvojlomem).
- Štěpnost dokonalá podle klence
- jeden z nejrozšířenějších minerálů povrchu zemské kůry
- hlavním horninotvorný minerál **v chemogenních i organogenních sedimentech** (vápence), travertiny – hornina tvořená kalcitem srážející se ve sladkých vodách (např. potocích), cicváry (konkrece v sedimentech), krápníky, sintry
- V metamorfovaných horninách - **krystalické vápence** (mramory)
- **Ca-kontaktních skarnů** - na styku granitoidů s mramory.
- V magmatických horninách vzniká primárně jen ve speciálních případech (**karbonatity**), ačkoli karbonatitové taveniny jsou často přítomné v podmínkách svrchního pláště (ale obvykle se nedochovají do povrchových podmínek) a vznikají při nízkoprocenním tavení plášťových hornin tvoří druhotné žilky,
- V magmatických horninách obvykle často jako nemagmatický - výplně dutin (z fluid) nebo sekundární při zvětrávání bazických plagioklasů.
- typickým hlušinovým minerálem **hydrotermálních žil**, může tvořit i samostatné žíly v různých typech hornin
- Je důležitým **biogenním minerálem**, který buduje pevné schránky mnoha organismů.
- Kalcit je důležitý průmyslový minerál v rámci svých hornin (vápenců a mramorů). Používá se k výrobě vápna, cementu nebo jako stavební kámen.

Magnezit MgCO_3

- Barva: bílá, šedá, žlutá
- Štěpnost podle klence
- Krystaly jsou vzácné (romboedrického typu), Běžné jsou hrubě zrnité, celistvé či stébelnaté agregáty, ve zvětralinách serpentinitů (peridotitů) má charakter hlíz a konkrecí.
- Ložiska magnezitu (tvořené převážně minerálem magnezitem) jsou metasomatického původu
- zvětráváním serpentinitů.
- v evaporitech vysrážením z vody, většinou klencové krystaly v dutinách sedimentů. jsou vzácné
- Je stabilní v podmínkách UHP metamorfózy plášťových hornin – kde spolu s dolomitem může tvořit krystalky



Siderit FeCO_3

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – 4 g/cm^3

Barva – žlutavě hnědý, hnědý, červenavě šedý, zelenavě šedý.

Štěpnost – dokonalá dle ploch romboedru

Krystalochemie:

Siderit krystaluje v trigonální soustavě

Běžně zvýšený obsah Mg méně Ca, Mn, Ba, Sr, Zn aj.

Vzhled v přírodě:

Siderit je nejčastěji složkou **hydrotermálních ložisek** spolu s dalšími minerály Fe (hematit), sulfidy a sulfosolemi Sb, As, Bi, Ag apod. Zde může tvořit v dutinách tenké až tlustě romboedrické krystaly.

Bývá součástí **sedimentárních Fe-rud**, Tvoří i tzv. **pelosiderity (konkrece v uhlonosných sedimentech)**. Někdy radiálně paprscitý.



Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – 2,8-2,9 g/cm³

Barva – bezbarvý, bílý, šedobílý, růžový, hnědavý, šedý

Štěpnost – dokonalá dle ploch romboedru,

Krystalochemie:

Magnezit krystaluje v trigonální soustavě

Běžně zvýšený obsah Fe, méně pak Mn, Ba, Sr, Zn aj.

Vzhled v přírodě:

Dolomit je velmi běžnou součástí **vápenců spolu s kalcitem**, kde je celistvý nebo jemně krystalický.

Metamorfózou i **dolomitické mramory** popř. další metakarbonátové horniny.

Bývá i **hydrotermální v rudních žilách magmatický** v Mg-bohatých **karbonatitech**, ale i v **peridotitech**, kde doklad silikát-karbonátových magmat v plášti

V dutinách tvoří klencové až čočkovité krystaly, někdy sedlovitě prohýbané.



Ankerit $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem 3 g/cm^3

Barva – hnědý, žlutohnědý, šedý, šedobílý

Štěpnost – dokonalá dle ploch romboedru

Krystalochemie:

Ankerit krystaluje v trigonální soustavě

Většinou malá příměs Mg, Mn.

Vzhled v přírodě:

Ankerit je součástí některých **metamorfovaných Fe-ložisek spolu se sideritem (páskované Fe rudy)**.

Magmatogenní v některých typech **karbonatitů**.

Hydrotermální na **rudních polymetalických žilách**.

V dutinách **krystaly tvaru romboedru**, běžný je čočkovitý habitus. **Většinou však celistvý**, jemně až hrubě krystalický.



Aragonit CaCO_3

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $2,9 \text{ g/cm}^3$

Barva – bezbarvý, bílý, šedo-, žlutobílý, fialový, hnědý

Štěpnost – nevýrazná dle $\{010\}$,

Krystalochemie:

Aragonit krystaluje v rombické soustavě

Většinou jen malá příměs Fe, Mg, Mn, Ba a Sr.

Vzhled v přírodě:

Jde o **výšetlaký polymorf CaCO_3** , vyskytuje se ve **HP metamorfovaných karbonátových sedimentech**, je metastabilní, vzniká **hydrotermálně za vyšších teplot v rudních nebo karbonátových žilách, dutinách vulkanitů** nebo v **jeskynních výplních**.

Tvoří **sloupcovité až jehlicovité krystaly** popř. pseudohexagonální polyčetné srostlice.



Karbonáty – Azurit, malachit

$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ resp. $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $3,8 \text{ g/cm}^3$

Barva – různé odstíny modré resp. zelené

Krystalochemie:

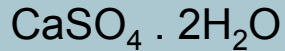
Oba krystalují v monoklinické soustavě

Vzhled v přírodě:

uhličitaný Cu, vznikající **výhradně v oxidických podmínkách**. Nejběžněji jako **sekundární minerály primárních minerálů Cu** (chalkopyrit, kuprit, aj.) **na trhlinách, v dutinách** nebo jako pseudomorfózy (malachit často po azuritu). V dutinách tvoří **azurit často dokonalé krystaly** sloupcovitého habitu, **malachit spíše vzácněji**, drobné nebo jehlicovité krystaly, radiálně paprscité **agregáty až celistvé masy s kolomorfní stavbou** (ozdobný kámen).



Sulfáty – Sádrovec



Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem 2,3 g/cm³

Barva – bezbarvý, bílý, nažloutlý, medový, šedý, hnědý

Štěpnost – dokonalá dle {010}

Krystalochemie:

Krystaluje v monoklinické soustavě

Vzhled v přírodě:

Sádrovec je typickým **minerálem evaporitů** v asociaci s **halitem, sylvínem, anhydritem a karbonáty**.

Zde **masívní** (alabastr) až **hrubě krystalický**, někdy **vláknitý** (selenit), v dutinách lištovité až čočkovité **krystaly** někdy značných rozměrů.

Dále v **jíl. sedimentech ve formě kongrecí** nebo dokonalých **krystalů** a

jejich srostlic (někdy tzv. **vlaštovčí ocase**“).

Na rudních žilách vzniká **alterací sulfidů**, zejména pyritu



Sulfáty – Anhydrit



Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem 3 g/cm^3

Barva – bílý, modravý, šedý

Krystalochemie:

Krystaluje v rombické soustavě

Vzhled v přírodě:

Anhydrit bývá **součástí evaporitů** apod. sedimentů, **vzácněji na uhelných ložiscích**, vyskytuje se **v dutinách bazaltů**, popř. rudních žil.

Tvoří jemnozrnné masy popř. krystalické agregáty s výraznou štěpností a perleťovým leskem na plochách štěpnosti, v dutinách tabulkovité až sloupcovité krystaly.



Sulfáty – Baryt



Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $4,5 \text{ g/cm}^3$

Barva – bezbarvý, bílý, nažloutlý, hnědý, modrý, medový, růžový

Štěpnost – dokonalá dle $\{010\}$

Krystalochemie:

Krystaluje v rombické soustavě

Vzhled v přírodě:

Baryt se vyskytuje

zejména hydrotermálních žilách (samostatné fluorit-barytové žíly) popř. na rudních polymetalických žilách jako součást běžně je v sedimentárních horninách (evapority, konkrece v jílech) hlušiny s karbonáty a křemenem.

vzácně v magmatických horninách (např. karbonatity – zvýšený obsah Sr

Bývá **celistvý** a polykrystalický s výraznou štěpností, v dutinách tabulkovité, čočkovité až sloupcovité **krystaly**.



Halovce

Bezokyslíkaté sloučeniny prvků s halogenidy

Halit NaCl

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $2,17 \text{ g/cm}^3$

Barva – bezbarvý, bílý, šedobílý, namodralý, narůžovělý,

Rozpustný ve vodě!

Krystalochemie:

Krystaluje v kubické soustavě,

Vzhled v přírodě:

Minerál zejména evaporitů v asociaci se sulfáty a karbonáty. Ve formě celistvých mas, polykrystalických agregátů, krápníků, běžné jsou krystaly ve tvaru krychle, někdy kostrovité, modrá barva způsobena deformacemi v krystalické mřížce.



Halovce

Fluorit CaF_2

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $3,1 \text{ g/cm}^3$

Barva – bezbarvý, bílý, modrý, zelený, fialový, žlutý, růžový, červený, hnědý, černý, běžně barevně zonální, průhledný, průsvitný

Krystalochemie:

Krystaluje v kubické soustavě

Vzhled v přírodě:

Minerál zejména **hydrotermálních fluoritových žil a ložisek v asociaci s barytem, kalcitem, sulfidy**. Hydrotermální na rudních ložiskách, v dutinách pegmatitů, **alpských žilách**, ve skarnech, magmatogenní vzácně v pegmatitech a některých alkalických ložiskách spolu s dalšími fluoridy s Al (např kryolit apod.). Celistvý, „vrstevnatý“, polykrystalický, v dutinách krystaly nejčastěji tvaru krychle, v kombinaci s osmistěnem nebo rombickým dvanáctistěnem.



Oxidy

Křemen SiO_2

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $2,6 \text{ g/cm}^3$

Barva – bezbarvý, bílý, šedobílý, hnědý, černý, fialový, nažloutlý, růžový, červená popř. zelená barva je způsobena vlivem inkluzí.

Krystalochemie:

Krystaluje v trigonální soustavě

Vzhled v přírodě:

Jeden z nejhojnějších minerálů v přírodě

Magmatické horniny: kyselé až intermediální (granit, granodiorit, ryolit, pegmatity)

Metamorfované horniny (fylity, svory, ruly, migmatity)

v klastických sedimentech (písky, pískovce, droby)

Chemogenní sedimenty – konkrerce, opály

Celistvý, velké masy v pegmatitech, v rudních žilách, valouny ve štěrcích.



Polymorfní modifikace SiO₂

- **Křemen nižší (α křemen) - trigonálně trapezodrický**
- **Křemen vyšší (β křemen) - hexagonální**
(teplota fázového přechodu obou modifikací křemene je 573°C za atmosférického tlaku).
- **vysokoteplotní a nízkotlaké modifikace (tridymit a cristobalit) – v dutinách kyselých vulkanitů (Nezdenice)**
- **vysokotlaké modifikace (coesit, stišovit) – v meteorických kráterech, vznikají při impaktu (dopadu velkých meteoritů - kráter Ries, Bavorsko), ale i UHP metamorfovaných horninách (granulitech, eklogitech) – jeden z dokladů UHP metamorfózy**
- **Krystalová struktura α křemene je blízká tektosilikátům – tetraedry SiO₄ propojené do prostorové sítě**

Hmoty SiO_2 – chalcedony

- Mikrokryсталické, navenek amorfní hmoty
- mají agregátní struktury, složené z submikroskopických vláken, zrn a tyčinek, při RTG- analýze odpovídají **křemenu**.
- Variety – achát, jaspis, onyx, karneol.



Opál ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$)

- *morfologicky i vnitřní stavbou amorfní hmota*
- hydratovaný SiO_2
- obsah vody 4-9%
- je složen z malých kuliček o velikosti asi 100 nm (vnitřní stavba). V drahém opálu toto uspořádání láme a rozkládá světlo a způsobuje ohnivý barevný třpyt.



Opál drahý

Oxidy - skupina spinelu (spinelidy)

- časté akcesorické minerály plášt'ových i korových hornin
- mohou tvořit i ekonomicky významná ložiska (magnetit, chromit)
- průhledné a barevné zajímavé variety již od starověku patří mezi ceněné drahokamy
- význam pro petrogenezi hornin - např. interpretaci PT podmínek hornin (geotermometry)

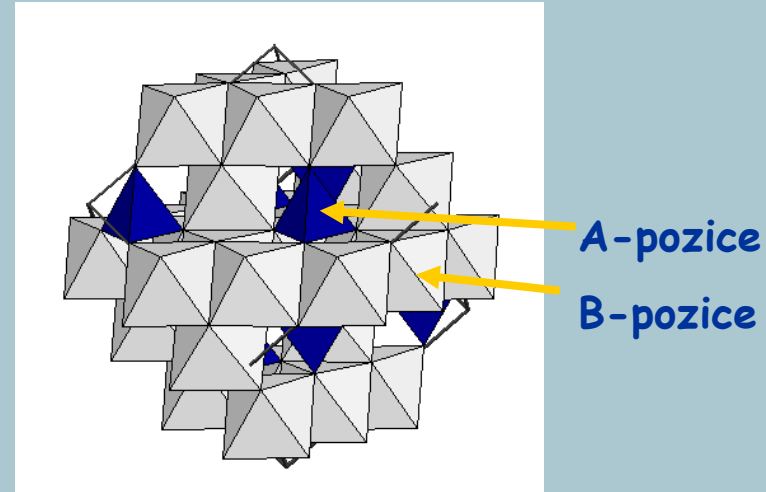
Skupina spinelu (spinelidy)

- AB_2O_4
- Kubický, prostorová grupa Fd-3m
- Často krystalový tvar - nejčastěji osmistěn, vzácněji dvanástistěn kosočtverečný, vzácně čtyřstěn, (a jejich jednoduché či komplikované spojky)
- Hojně i zrnité agregáty nebo kusový
- Oktaedrická štěpnost - špatná a lasturnatý lom
- Tvrdost 8,
- Hustota 3.5-4.1
- Spinelidy se dělí na základě dominantního trojmocného ionu v B-pozici do tří řad:
 - Řada spinelu (B = Al)
 - Řada magnetitu (B = Fe^{3+})
 - Řada chromitu (B = Cr)

Struktura minerálů ze skupiny spinelu

- Obecný vzorec AB_2O_4 spinelu

- A-pozice: Mg, Fe^{2+} , Zn, Mn, Ni - dvojmocné
- B-pozice: Al, Cr, Fe^{3+} , V, Ti - trojmocné kat.



- Struktura - z kubicky uspořádaných kyslíků (nejtěsnější uspořádání kyslíků), v nichž je kationy obsazena jedna čtvrtina **tetraedrických pozic** (pozice A) a polovina **oktaedrických pozic** (pozice B)
- Spinelidy s tzv. „normální a inverzní strukturou“
- U „**normální struktury**“ (např. $MgAl_2O_4$) je méně zastoupený kation (obvykle dvojmocný A^{2+}) okupuje 1/4 tetraedrických pozic A a více zastoupený kation (obvykle trojmocný B^{3+}) okupuje polovinu oktaedrických pozic B.
- U „**inverzní struktury**“ (např. $FeFe_2O_4$) vstupuje méně zastoupený kation do pozice B (když kationy A^{2+} silně preferují oktaedrickou pozici) a více zastoupený kation je rozdělen mezi pozice A a B.

Spinelidy

- Řada spinelu (B = Al)

název	T-pozice	O-pozice	charakter struktury
Hercynit	Fe ²⁺	Al ₂	Normální
Spinel	Mg	Al ₂	Normální
Gahnit	Zn	Al ₂	Normální
Galaxit	Mn _{0,71} Al _{0,29}	Mn _{0,29} Al _{1,71}	29% Inverzní

- Řada chromitu (B = Cr)

název	T-pozice	O-pozice	charakter struktury
Chromit	Fe ²⁺	Cr ₂	Normální
Magnesiochromit	Mg ²⁺	Cr ₂	Normální

Spinelidy

- Řada magnetitu ($B = Fe^{3+}$)

název	T-pozice	O-pozice	charakter struktury
Magnetit	Fe^{3+}	$Fe^{2+}Fe^{3+}$	Inverzní
Magnesioferrit	$Mg_{0,1}Fe^{3+}_{0,9}$	$Mg_{0,9}Fe^{3+}_{1,1}$	Z 90% inverzní
Franklinit	Zn	Fe^{3+}_2	Normální
Jaccobsit	$Mn_{0,85}Fe^{3+}_{0,15}$	$Mn_{0,15}Fe^{3+}_{1,85}$	Z 15% Inverzní
Trevorit	Fe^{3+}	$Fe^{3+}Ni$	Inverzní

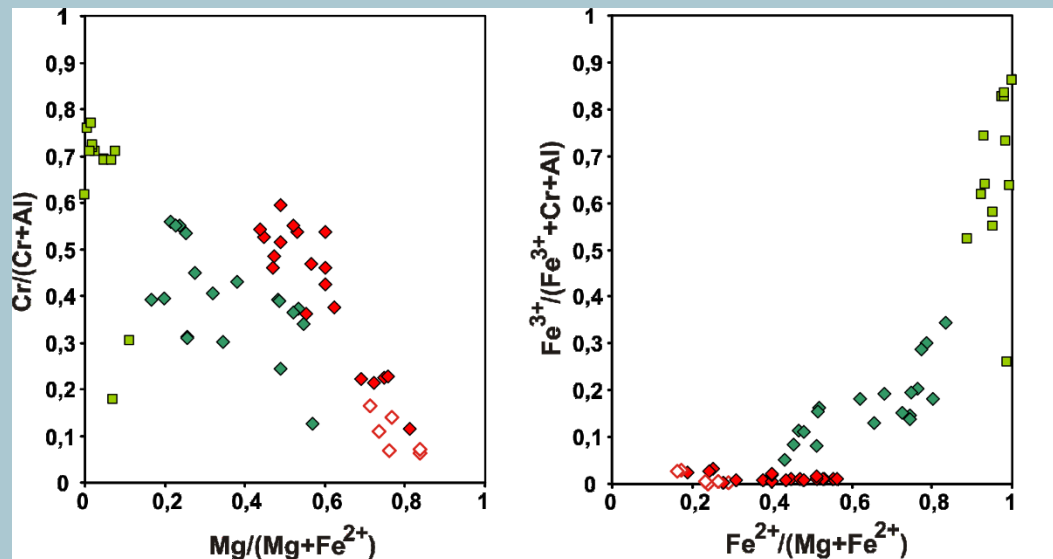
- Ti-spinely

Někdy se přiřazují k Fe-spinelům, ale na rozdíl od nich neobsahují Fe^{3+}

Název	T-pozice	O-pozice	Charakter
Ulvöspinel	Fe^{2+}	$Fe^{2+}Ti^{4+}$	100% inverzní
Quandilit	Mg^{2+}	$Mg^{2+}Ti^{4+}$	100% inverzní

Spinelidy

- Velmi dobrá mísitelnost za vysokých teplot mezi jednotlivými spinelidy i v různých řadách (Fe, Al, Cr, Ti spinely)
- Často tvoří isomorfní směs mnoha koncových členů např. spinel-hercynit-chromit-magnetit; chromit-hercynit-magnetit-franklinit
- Často jsou spinelidy výrazně zonální - vývoj přes několik koncových členů; nebo různých generací v rámci jedné horniny



Chemické složení Cr-spinelů z oblasti ranského masivu - troktolity (tmavě zelené kosočtverce - primární Cr-spinely), světle zelené čtverce - sekundární Cr-spinely
a z oblasti kutnohorského krystalinika - granátické peridotity (Čopjaková, Štědrá 2007)

=> **Problém s terminologií - jak je jednoduše nazvat?**

Al- a Cr-spinelidy

- Barva - spinel - čirý, často je zbarvený - barva v závislosti na příměsi; modravý (Co) či ceylonit (s Fe^{2+}), zelený (s Fe^{3+}), červený chromspinel (s Cr); chromit, ulvospinel - černý
- Typický vysokoteplotní minerál metamorfovaných a magmatických hornin
 - Často se vyskytuje v metamorfovaných dolomitických vápencích (**mramorech**) spolu s **diopsidem a forsteritem** (např. v pestré jednotce moldanubika - minerální asociace Cal+Dol+Fo+Sp+Phl+Ch+Cho - (Čopjaková et al. 2008) - směs **spinel-gahnit**; 660-730°C, 3-4 kbar (Novák 1989))
 - Mg-bohaté **skarny (spinel)**
 - Zn-bohaté **skarny (gahnit)**
 - Dále přítomen i v **granulitech** (řada **spinel-hercynit**) či HT metapelitech
 - Ale i **bazických a ultrabazických horniny plutonické** (řada spinel-magnesiochromit)
 - Ale i **bazických a ultrabazických horniny vulkanické** (řada spinel-magnesiochromit, ulvospinel, hercynit; magnetit)
 - Pegmatity (spinel-gahnit)
- Je typickým minerálem aluvií (vysoká tvrdost, hustota, mechanická a chemická odolnost), kde doprovází jiné drahokamové nerosty. U nás v pyropových štěrcích v Českém středohoří (Třebívlice, Měrunice)

Cr-spinely

Cr-bohaté spinely - pevný roztok chromitu-magnesiochromitu-spinelu-hercynitu

- Cr-spinely - akceosrické minerály z různých typů bazických a ultrabazických hornin (plášťové peridotity, gabra, mafické vulkanity - bazalty a tholeity a jejich metamorfované ekvivalenty).
- Obvykle krystalizují v ranných stádiích z magmatu. Kontinuální krystalizace společně s ostatními silikáty (olivín, pyroxeny, plagioklas) ve značném rozsahu T
- Chemické složení Cr-spinelu řízeno několika hlavními faktory:
 - PT podmínky,
 - Složení magmatu,
 - Stupeň parciálního tavení,
 - Frakční krystalizace,
 - Reekvilibrace v subsolidu s koo-existujícími silikáty
 - Fugacita kyslíku

(see e.g., Irvine, 1965; Hill and Roeder 1974; Medaris, 1975; Pinsent and Hirst, 1977; Fisk and Bence, 1980; Dick and Bullen, 1984; Kepezhinskas et al., 1993).

Cr-spinely plášťových hornin - peridotitů

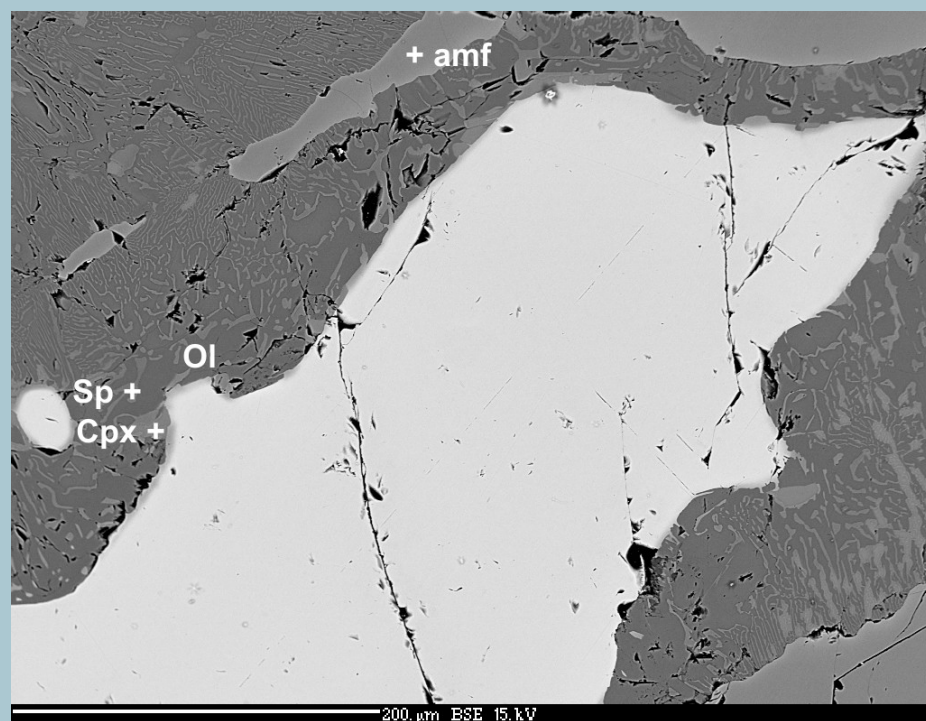
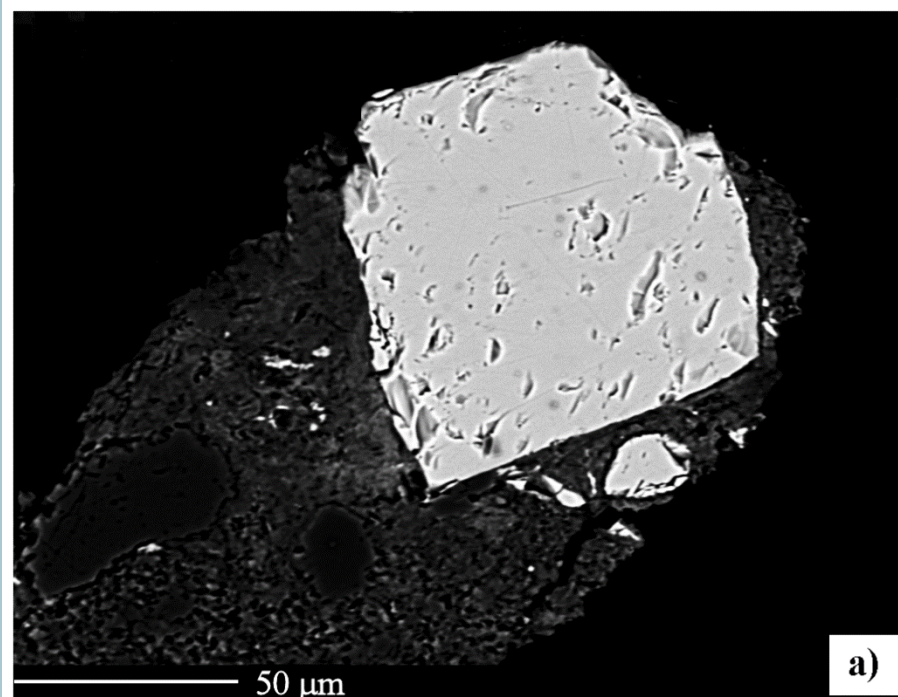
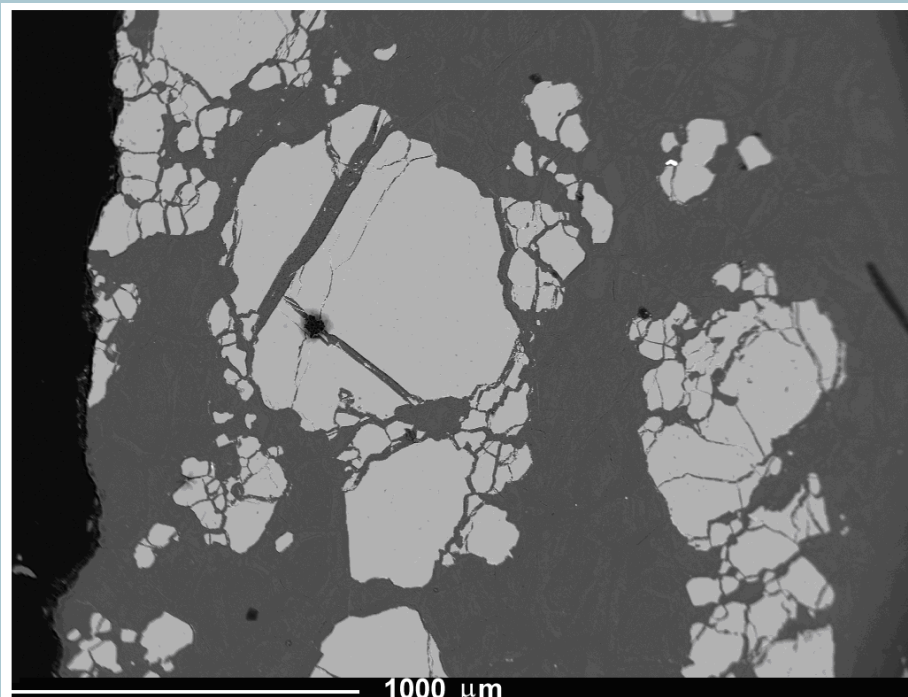
- Cr-bohaté spinely krystalizují v raných stádiích krystalizace magmatu.
- Cr-bohatý spinel běžný minerál plášťových peridotitů, v hloubkách přibližně 20 - 120 km, případně i nižších hloubek, v závislosti na obsahu Cr.
 - V nižších hloubkách, Ca-bohatý plagioklas je stabilní Al-minerál v peridotitech
 - Ve větších hloubkách je stabilní Al-minerál granát

Cr-spinely v BSE obraze

původ z „peridotitů“

často kusové či zrnité agregáty
ale i automorfní (oktaedry)

neobsahují inkluze taveniny
mohou obsahovat polyfázové inkluze



Cr-spinely vulkanické vs. peridotitové

- plášťové a vulkanické komplexy z různých tektonických prostředí vykazují význačné rozdíly ve složení Cr-spinelů (Dick a Bullen 1984, Arai 1992, Kepenzhinskas et al. 1993).
- Základní rozlišovací kritérium mezi vulkanickými a peridotitovými Cr-spinely je obsah TiO_2 a poměr $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$.
- Cr-spinely peridotitů mají obvykle poměr $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} > 3$, kdežto z vulkanických hornin mají tento poměr < 4 .
- Cr-spinely z plášťových hornin mají obsah $\text{TiO}_2 < 0,25$ hm.%.
- Vulkanické Cr-spinely s obsahem $\text{TiO}_2 < 0,25$ hm.% jsou velice neobvyklé, takto nízké obsahy Ti byly zaznamenány pouze u některých Ti chudých MORB bazaltů, tholeiitů ostrovních oblouků a boninitů.

Peridotitové spinely jsou používány jak termometr: Ol - Sp (ve vulkanitech nefunguje dobře - Ti ve struktuře)

Cr-spinely v BSE obraze

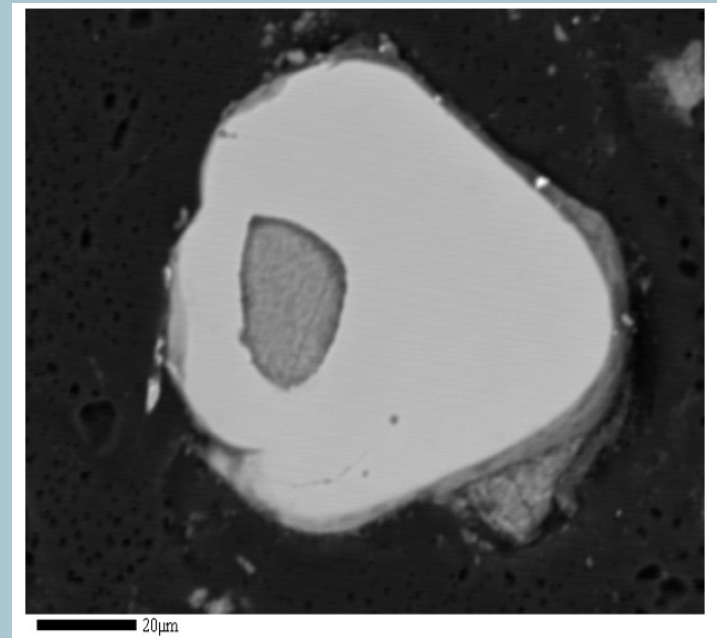
původ z „vulkanitů“

nebývají kusové a misivní
často automorfní až hypautomorfní,
menší velikosti,
mnohdy tvoří inkluze v jiných minerálech

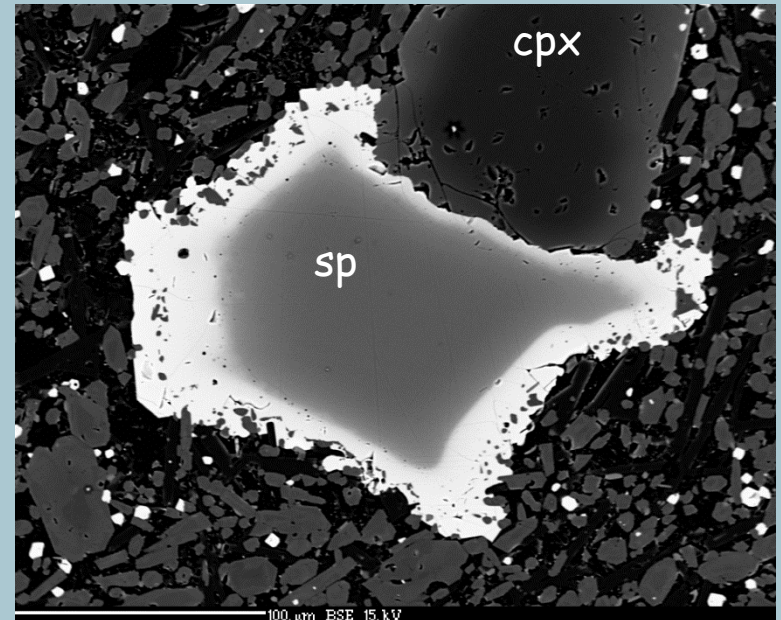
mohou obsahovat inkluze taveniny

často jsou zonální

Zonal Cr-spinel from volcanic " rock
- range from Mg-chromite in the core
to aluminous Ti-magnetite in the rim



Melt inclusion containing very small partially crystallized minerals. (Zhou et al.)



Detritické Cr-spinely v siliciklastických sedimentech

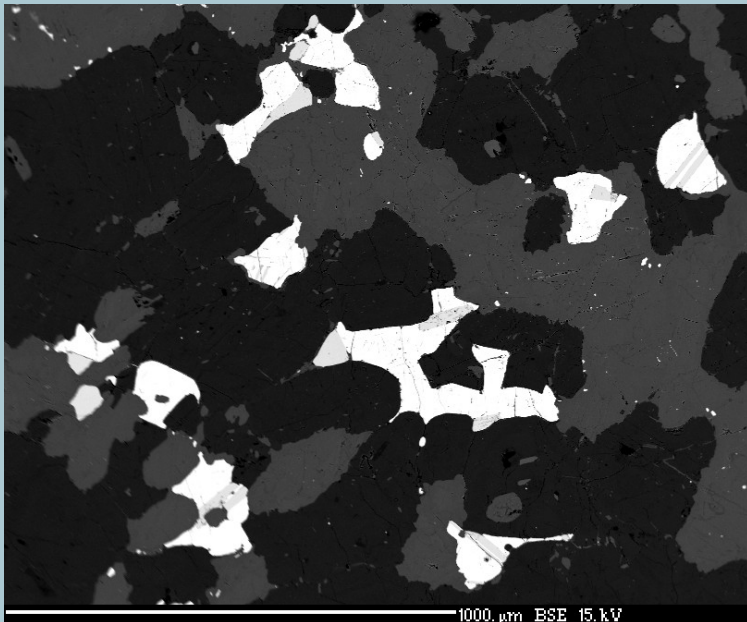
- Mezi těžkými minerály v sedimentárních horninách zauímají významné místo Cr-spinely.
- Stabilní během diagenese a rezistentní k hydrotermálním alteracím zejména vzhledem k ostatním vysokoteplotním minerálům mafických a ultramafických hornin (olivín, pyroxeny).
- Detritické Cr-spinely jsou důležitým indikátorem provenience mafických a ultramafických hornin a představují tak důležitý minerál pro paleogeografické rekonstrukce. Chemické složení spinelů poskytuje informace o tektonickém prostředí hornin, z nichž pocházejí.
- Chemismus detritických spinelů a inkluzí taveniny v nich z Claut/Clauzetto a Julian Basins (N Italy and NW Slovenia) použit ke stanovní provenience a geotektonického prostředí zdrojových hornin - Lenaz et al. (2000) - první studie inkluzí taveniny v detritických spinelech.

Fe-spinely

- **Magnetit** $\text{FeFe}^{3+}_2\text{O}_4$ - nejběžnější spinelid v zemské kůře
Nachází se v celé řadě magmatických a metamorfovaných hornin - bazické až intermediální magmatity (vulkanické i plutonické); nejvýznamnější ložiska ve **skarnech**, **vulkanosedimentárních** a **sedimentárních horninách (BIF)**.
dále amfibolity; metamorfovaná ultrabazika; metapelity; alpské žíly i jako autigenní (nízkoteplotní) v sedimentech
- **Magnesioferrit** $\text{MgFe}^{3+}_2\text{O}_4$ - jako koncový člen vzácný (vysokoteplotní - fumaroly, hořící haldy, Mg-mramory a skarny). Obvykle v pevném roztoku s magnetitem (obvykle do několika molárních %)
- **Franklinit** $\text{ZnFe}^{3+}_2\text{O}_4$ - vzácnější;
 - vyskytuje na Zn ložiscích Franklin a Sterling Hill (USA) - metasomatický, vzniklý reakcí hydrotermálních fluid s okolními horninami
 - metamorfované bazické a ultrabazické horniny obsahující Cr-bohaté spinely minimálně ve spodní amfibolitové facii - obvyklá minoritní komponenta ve spinelidech
- **Jaccobsit** $\text{MnFe}^{3+}_2\text{O}_4$ - metasomatická ložiska Mn
- **Trevorit** $\text{NiFe}^{3+}_2\text{O}_4$ - vzácný; známý z mastkových fylitů v Jižní Africe, Ni-bohatý serpentinit

Magnetit

- Za vysokých teplot je dobrá mísitelnost magnetitové a ulvospinelové komponenty (ve vulkanitech obvykle vysoký podíl Ti v magnetitech)
- S poklesem teploty může docházet k jejich odmísení a vzniku zrn tvořených střídajícími se lamelami magnetitu a ilmenitu (často pozorované v magmatitech - gabrech, ale i v metamorfitech - amfibolitech)
- Horniny, které obsahují jak pevný roztok Mt-Usp(magnetit) a Ilm-Hmt(ilmenit), je složení těchto dvou fází jednoznačně určeno teplotou a fO_2 v době, kdy se v hornině ustavila rovnováha mezi těmito minerály
- Lze tyto páry využít jako geotermometr



- Gabra ranského masivu (Mrázová 2007)
v BSE obraze světlé fáze - odmísený ilmenit od magnetitu: světlejší partie - magnetit; tmavší partie - ilmenit

Romboedrické oxidy

- Hematit Fe_2O_3
- Minerály skupiny ilmenitu:
 - Ilmenit FeTiO_3
 - Geikielit MgTiO_3
 - pyrofanit MnTiO_3

A: Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+}

B: Ti^{4+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{5+} , Nb^{5+} , Ta^{5+} , W^{5+} , Al^{3+} , Sb^{5+}

Ilm - akcesorický minerál v magmatických (plutonických i vulkanických) horninách (zejména bazické a intermediální magmatity, ale i v kyselých horninách a pegmatitech - pyrofanit)

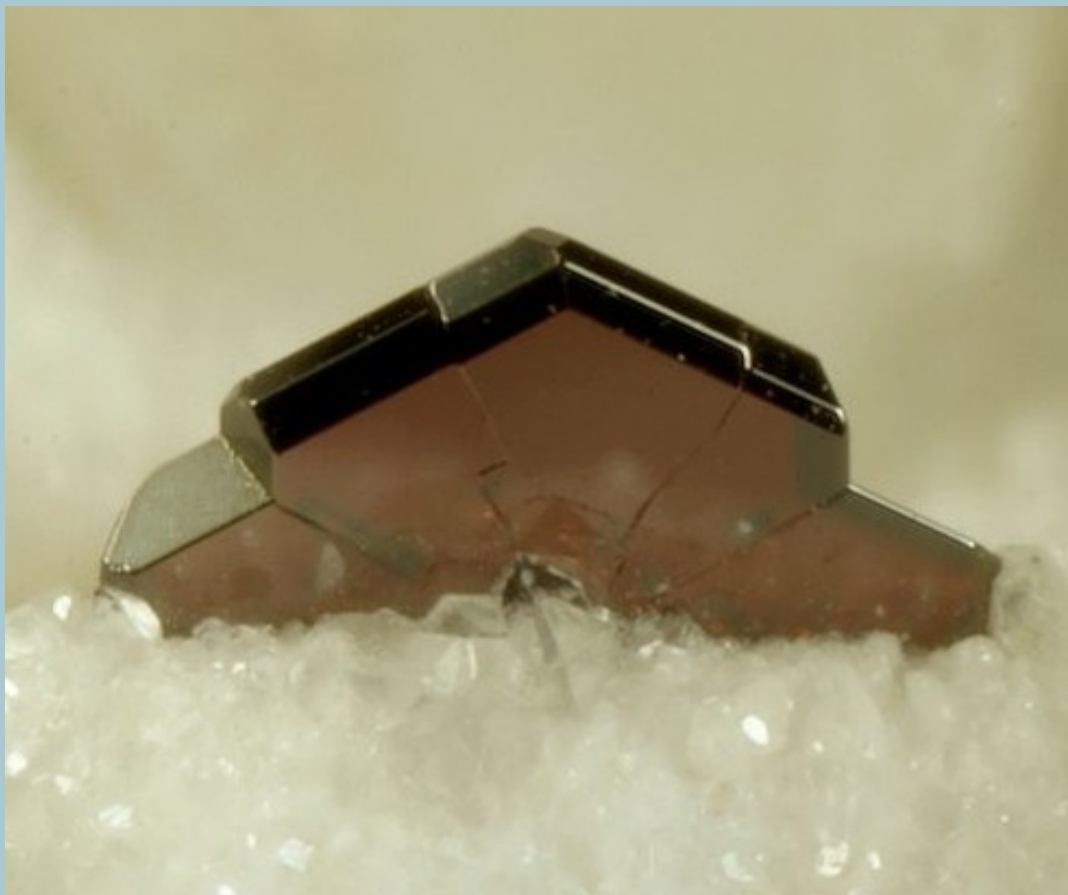
Běžný akcesorický minerál i v různých typech metamorfovaných hornin, metapelitech, amfibolitech, skarnech;
v peridotitech a mramorech je geikielit

Leukoxenizace ilmenitu - produkt tzv. leukoxen
Rozpad ilmenitu na směs rutilu, titanitu

Minerály skupiny ilmenitu

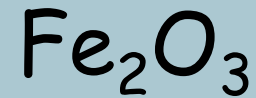


Ilmenit, Mont St. Hilaire,
Quebec, Kanada



Geikielit, Monte-Somma, Vesuv, Itálie

Hematit



- **Barva černá až červená** (dle kvality krystalů a charakteru agregátů),
- **polokovový lesk (práškovité agregáty matné)**, někdy náběhové barvy
- **krystaly jsou tabulkovité**
- **sedimentární oolitické rudy** (Barrandien – ordovik; prvohorní mořské pánve)
prekambrické železnorudné páskované formace (BIF) – sedimentární (metamorfované) - střídání Fe bohatých - [magnetit](#), [hematit](#), silikáty ([chamosit](#) - chlorit)- a vrstev Fe chudších tvořených silikáty (detrit); před vznikem O₂ bohaté atmosféry; Fe v roztoku - mobilní jen při redukčních podmínkách okolního prostředí.
- **hydrotermální** (na sideritových žilách Slovenského rudohoří, s křemenem Horní Blatná u Jáchymova)
- **Význam:** ruda Fe
- **Agregáty variabilní dle geneze:** lupenité, zrnité, paprscité („lebník“), **práškovité (okry), oolity**



Rutil – TiO_2 , kasiterit - SnO_2

- *izostrukturní fáze.*
- *atomy Ti (Sn, Mn) tvoří tetragonální buňku – prostorově centrovanou a jsou rozmístěny v oktaedrech kyslíků.*
- symetrie krystalu je **tetragonální**.

rutil

- *barva červenohnědá až hnědočerná, skelný až polokovový lesk*
- *•velmi odolný vůči zvětrávání*
- *akcesorický minerál v horninách (metamorfované – eklogity, granulity, amfibolity, ruly, peridotity), v magmatických horninách*
- *alpská parageneze – varieta „sagenit“ – bývá v křišťálech*
- *v sedimentárních horninách (i v náplavech)*
- Polymorfní modifikace anatas (autigenní v sedimentech), brookit



Krystaly rutilu



Sagenit v křemeni

Rutil – TiO_2 , kasiterit - SnO_2

Kasiterit (cínovec)

- *barva hnědá až červenohnědá, skelný až polokovový lesk*
- *velmi odolný vůči zvětrávání*
- *vysokoteplotní hydrotermální procesy – ložiska **greisen**ového typu (parageneze + křemen, wolframit, scheelit, topaz, cinvaldit, arzenopyrit*
- *pegmatity*
- *druhotně v náplavech (Malajsie)*
- *Význam: ruda Sn*



Krystaly kasiteritu

Kolumbit, tantalit

- **Kolumbit-(Fe)** FeNb_2O_6 , **Kolumbit-(Mn)** MnNb_2O_6 , **Kolumbit-(Mg)** MgNb_2O_6 ,
- **tantalit-(Fe)** FeTa_2O_6 , **tantalit-(Mn)** MnTa_2O_6 , **tantalit-(Mg)** MgTa_2O_6
- Vstup řady dalších kationů – Ti, Sn, Zn, Zr, W, Ca, Y, REE
- průmyslový název je **koltan**,
- Tvoří pevný roztok, isomorfně se mísí (Mg členy vzácné, někdy okraje pegmatitů)
- matně černá zrna, ze které se získávají prvky tantal a niob.
- **Pegmatity** a okolní **náplavy**
- Největší naleziště coltanu jsou v Africe, kde se podle odhadů nachází 80 procent celosvětových zásob, a to především v Kongu (výroba kondenzátorů do elektronických součástek pro mobilní telefony a notebooky)
- (chemické markry pro odlišení původu) – krvavý tantal

Krystaly kolumbitu

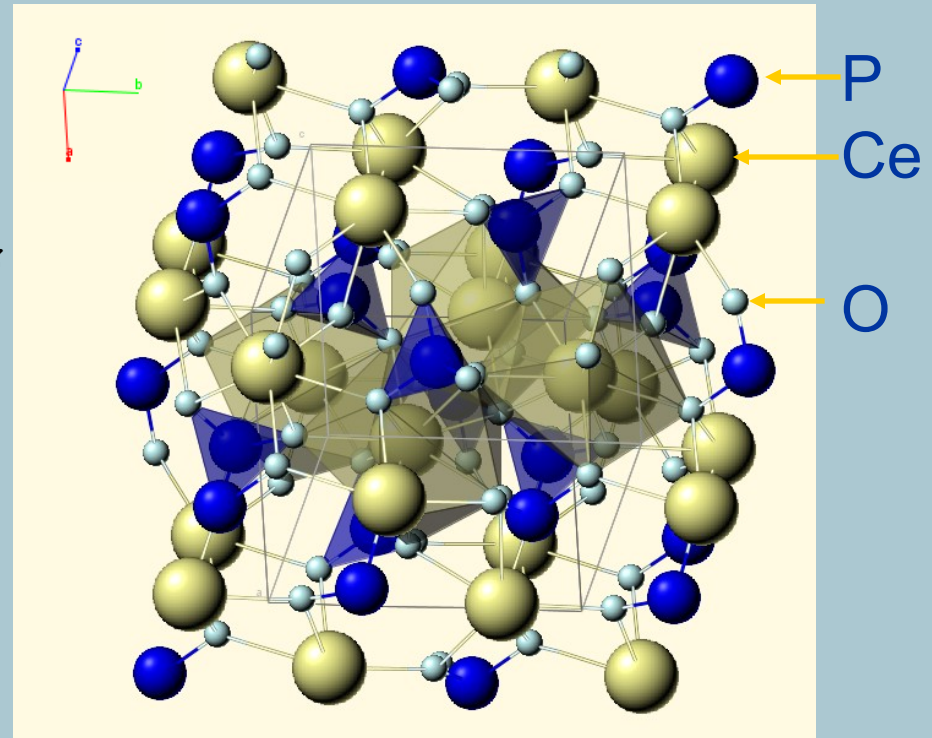


Krystaly tantalitu



Monazit

- **monazit** - monoklinický fosfát LREE
 - strukturální vzorec **LREEPO₄**
- V přírodě jsou známé monazity s dominancí La, Ce, Nd a Sm, přičemž nejhojnější je monazit-(Ce)
- Ve struktuře se střídají izolované **tetraedry PO₄** propojené přes **polyedry REE₉**. Atomy kyslíku jsou koordinovány dvěma atomy REE a jedním atomem P (Ni et al. 1995).
- Krystalochemické vlastnosti monazitu jsou v posledních letech intenzivně studovány, vzhledem k možnému využití keramiky s monazitovou strukturou pro uložení radioaktivního odpadu Krauskopf 1986, Boatner a Sales 1988



Monazit - proč je monazit intenzívně studovaný?

- Monazit je jedním z hlavních nositelů LREE v kontinentální kůře
- Je to běžný akcesorický minerál v kyselých magmatických horninách (S-typové granity), v metamorfovaných horninách, i jako detritický v sedimentárních horninách
- Možnost datování monazitu - CHIME - relativně rychlé a levné
- datování U-Pb

Izostrukturní minerály

- Monazit-(Ce): CePO_4
- Monazit-(La): LaPO_4
- Monazit-(Nd): NdPO_4
- Monazit-(Sm): SmPO_4
- Huttonit: ThSiO_4
- Cheralit: $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$

Struktura monazitu

- Struktura monazitu upřednostňuje vstup větších REE (La-Gd), naopak xenotim s tetragonální strukturou zirkonového typu upřednostňuje vstup menších REE (Tb-Lu, + Y)

Monazit

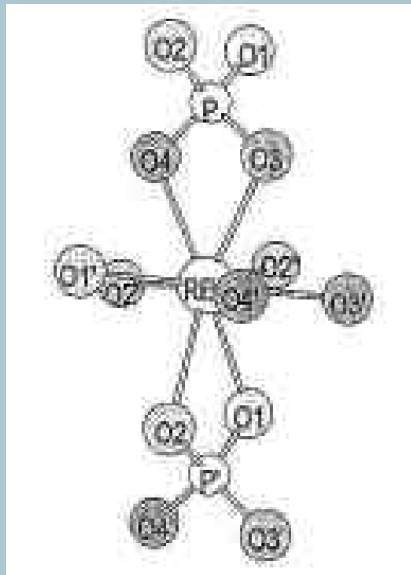
Monoklinický

struktura monazitového typu

$\alpha = 90^\circ$, $\beta = 103-104^\circ$, $\gamma = 90^\circ$

prostorová grupa $P2_1/n$

REO_9 polyedr



Xenotim

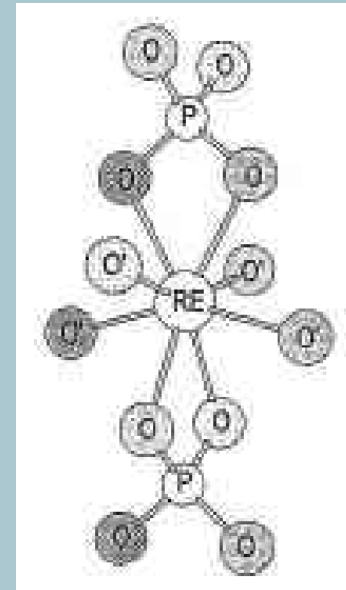
Tetragonální

struktura zirkonového typu

$\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\gamma = 90^\circ$

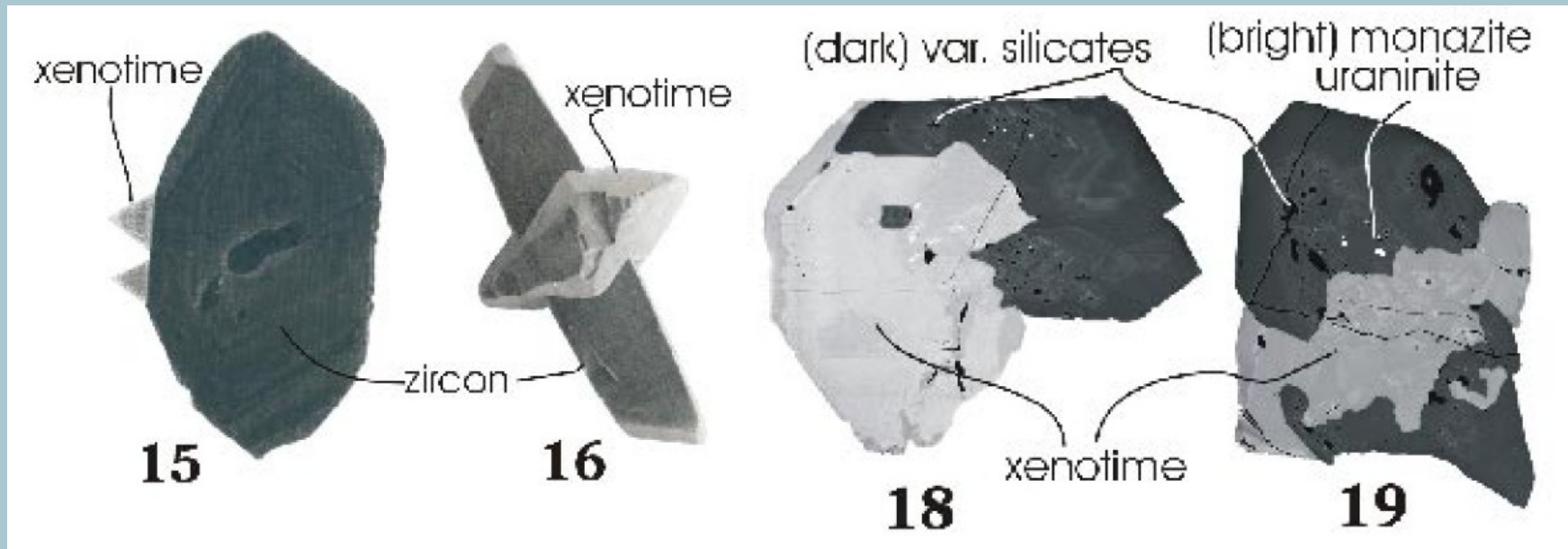
prostorová grupa $I4_1/amd$

REO_8 polyedr



Xenotim YPO_4

- Xenotim a zirkon (izostrukturální minerály) se často vyskytují společně v minerální asociaci
 - Často je pozorováno obrůstání zirkonu xenotimem (Fig 15)
 - Nebo jejich vzájemné prorůstání (Fig. 16, 18 a 19)
(Corfu et al.)



- Často srůstá s monazitem - v granitech, pegmatitech i sedimentech

Xenotim - chemické složení

- Podíl jednotlivých REE je závislý na podmínkách vzniku a chemickém složení horniny
- Vstup „lehčích“ REE do xenotimu roste s rostoucí teplotou jeho vzniku
- Dále xenotim může obsahovat Th, U, Zr, As

Xenotim v horninách

- Nejhojnější a největší zrna jsou v pegmatitech
- Typický pro dvojslídne granity, a leukokratických granitech (S-typy), pegmatity a syenity (alkalická magmatická hornina)
- V peraluminických granitech často v asociaci s granátem
- V metamorfovaných horninách může vznikat v širokém rozmezí PT podmínek od facie zelených břidlic až po migmatity (při tavení zaniká)
- V metapelitech i ortorulách
- xenotim se vyskytuje často společně s monazitem a zirkonem

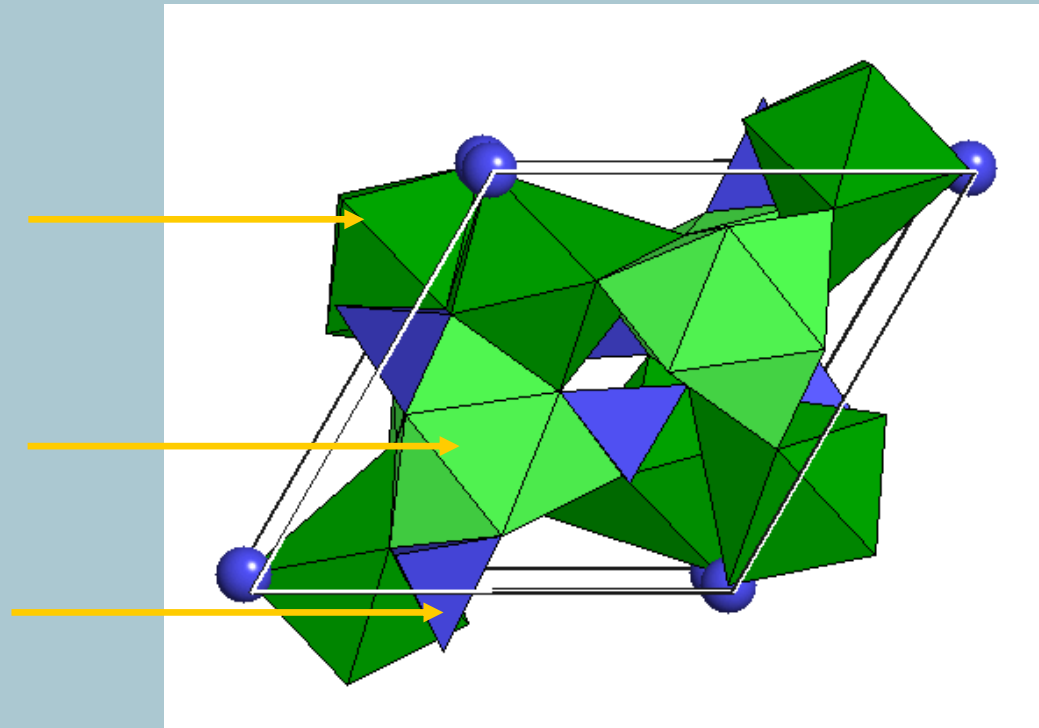
Apatit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$ - hexagonální

- $\text{CaI}_3\text{CaII}_2(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$
- Základem struktury jsou **tetraedry $[\text{PO}_4]^{3-}$** , které obklopují iony Ca ve dvou různých strukturních pozicích Ca I a Ca II.
- Iony Ca I jsou v **9-četné koordinaci - CaO_9**
- Iony Ca II jsou v koordinačních polyedrech vázány na 6 O + 1F,Cl,OH, jedná se tedy o **polyedry $\text{CaO}_6(\text{F},\text{OH},\text{Cl})_1$ - 7-četná koordinace**

- Polyedry CaO_6F

- Polyedry CaO_9

- Tetraedry PO_4



Minerály za skupiny apatitu

- **Fluorapatit**



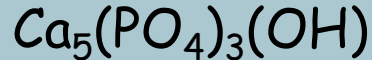
nejběžnější, magmatické (nejhojnější je v Ca-bohatých intermediálních magmatitech - křemenných dioritech, granodioritech, greisenech, karbonatitech) - zvýšený Mn, REE+Y
metamorfované horniny (různé typy)

- **Chlorapatit**



metasomatizované plášťové horniny (zvýšený Sr, U, Th)

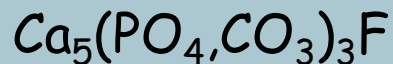
- Hydroxylapatit



- Karbonáthydroxylapatit



- Karbonátfluorapatit



Biogenní

Mimo Ca a P může do apatitu vstupovat řada dalších ionů:

- Za Ca vstupuje Fe, Mn, Mg, Na, REE+Y, Sr, U, Th, K,
- Za P vstupuje Si, C, As, S, V

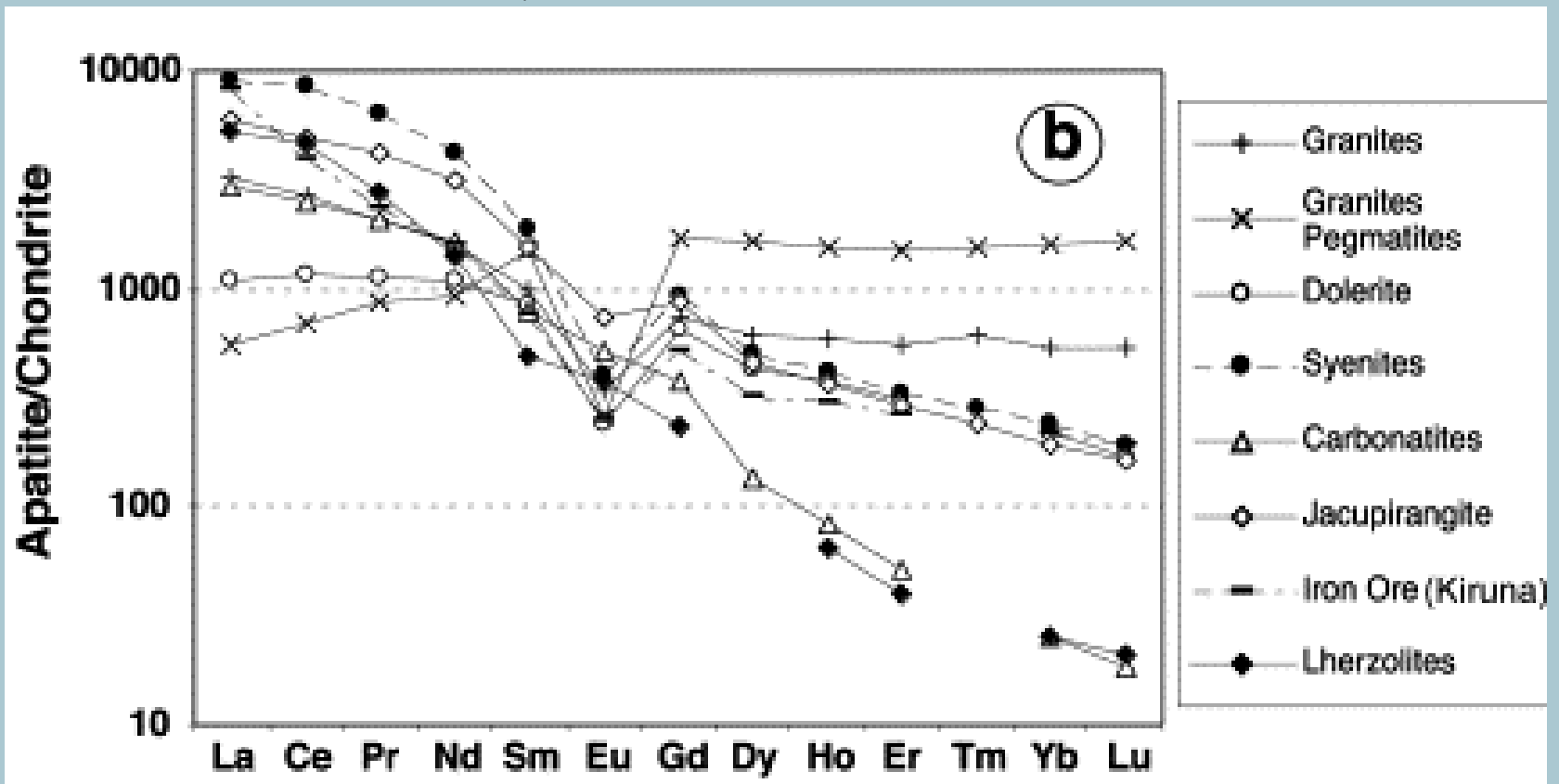
apatit



- Barva: bílá, žlutá, zelená, červená, modrá, šedá

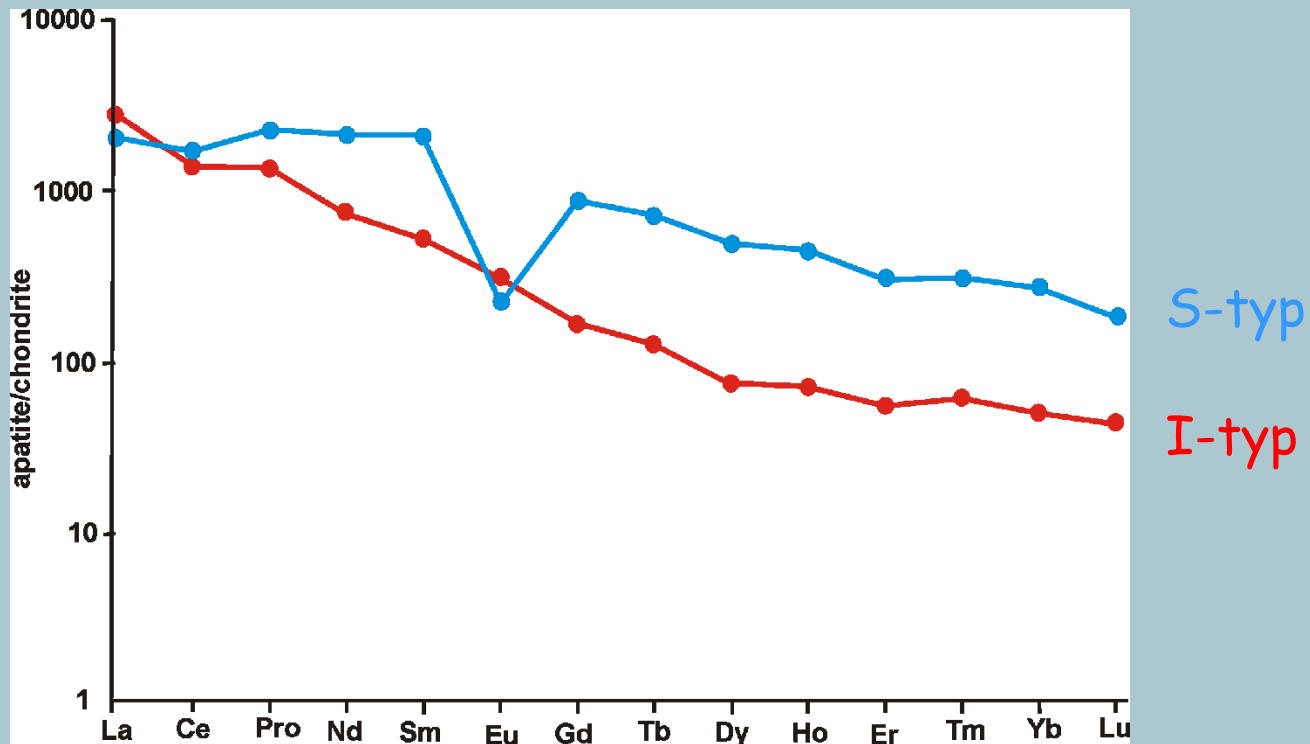
Apatit

- Tvar REE křivek v různých typech magmatických hornin (podle Belousova et al. 2002)



Apatit

- Tvar REE křivek v granitoidech Západních Karpat podle Brosky et al.



Sulfidy

Bezokyslíkaté sloučeniny většinou kovových prvků se sírou

Pyrit – chemická značka FeS_2

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem 5 g/cm^3

Barva – mosazně žlutá, při alteraci nabíhá do hnědé až rezavé

Krystalochemie:

Krystaluje v kubické soustavě

Na určitých typech ložisek může být zlatonosný.

Vzhled v přírodě:

Velmi hojný jako celistvé až polykrystalické **agregáty**, mikro- i makroskopická **zrna rozptýlená v horninách**, běžné jsou krystaly zarostlé i v dutinách (**metamorfované, magmatické i sedimentární horniny, rudní žíly, alpské žíly** atd.). Krystaly nejčastěji tvaru krychle, pentagon-dodekaedru, oktaedru.



<http://www.gemcoach.com>

Sulfidy

Chalkopyrit – chemická značka CuFeS_2

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem 4,1-4,3 g/cm³

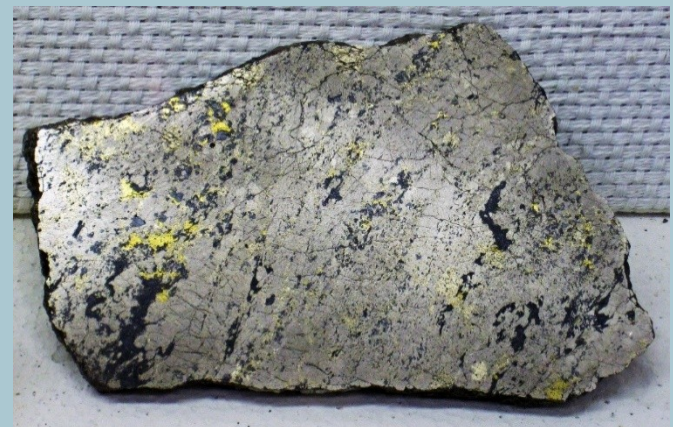
Barva – mosazně až medově žlutá, při alteraci nabíhá do zelené, modré.

Krystalochemie:

Krystaluje v tetragonální soustavě,
Někdy mívá příměs selenu,
vzácně i Pd nebo Pt.

Vzhled v přírodě:

Běžný minerál **rudních ložisek**, zejména polymetalických, rovněž **likvační ložiska**. Celistvé **agregáty, zrna nebo i krystaly** v dutinách.



Sulfidy

Sfalerit – chemická značka ZnS

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem 3,9-4,2 g/cm³ podle příměsi Fe

Barva – proměnlivá, dle příměsi Fe od černé, přes hnědou, zelenou, žlutou až do červené.

Krystalochemie:

Krystaluje v kubické soustavě

Běžná je příměs Fe až do 10 i více hm.%, méně Cd nebo In (ruda india).

Vzhled v přírodě:

Běžný minerál **rudních ložisek**, zejména polymetalických, v asociaci s galenitem, chalkopyritem ad. Celistvé agregáty, zrna nebo i krystaly v dutinách.



Sulfidy

Galenit – chemická značka PbS

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem 7,2-7,6 g/cm³

Barva – olověně šedá, ocelová. Neprůhledný.

Krystalochemie:

Krystaluje v kubické soustavě,

Běžná je příměs Ag, méně pak Zn, Fe, Cd, Sb a Se.

Vzhled v přírodě:

Běžný minerál **rudních ložisek**, zejména polymetalických, v asociaci s chalkopyritem, sfaleritem aj. **Celistvé agregáty, zrna nebo i krystaly tvaru krychle, oktaedru** a jejich spojek v dutinách. Vždy patrná výborná štěpnost dle krychle.



Sulfidy

Antimonit – chemická značka Sb_2S_3

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $4,6 \text{ g/cm}^3$

Barva – olověně šedá s namodralým odstínem,
neprůhledný,

Krystalochemie:

Krystaluje v rombické soustavě,

Běžná je příměs As, méně pak Bi, Fe aj.

Vzhled v přírodě:

Minerál **rudních ložisek**, zejména **výše temperovaných**, polymetalických, v asociaci s dalšími sulfidy nebo sulfoarsenidy apod. Celistvé agregáty, zrna, běžné jsou agregáty sloupcovitých krystalů nebo i jehlicovité až sloupcovité krystaly v dutinách.



Sulfidy

Pyrrhotin – chemická značka $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_{(x=0-0.17)}$

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $4,6 \text{ g/cm}^3$

Barva – bronzová, nahnědlá, neprůhledný, opákní,

Krystalochemie:

Krystaluje v monoklinické soustavě

Vzhled v přírodě:

Minerál některých **rudních ložisek**, například **skarnů**, **likvačních ložisek**, **běžně masívní**, v dutinách tvoří pseudohehexagonální krystaly. **Na vzduchu nabíhá** vlivem oxidačních procesů.



Sulfidy

Cinnabarit – chemická značka HgS

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem 8,1 g/cm³

Barva – šedá, hnědá, červená,

Krystalochemie:

Krystaluje v trigonální soustavě

Vzhled v přírodě:

Minerál epitermálních ložisek **spojených s vulkanickou aktivitou** popř. alkalických vřídél, v asociaci s antimonitem, realgarem, pyritem ad. Celistvé agregáty, zrna, běžné jsou agregáty čočkovitých nebo nízce sloupcovitých krystalů v dutinách spolu s karbonáty, ryzí rtuť atd.



Sulfidy

Molybdenit – chemická značka MoS_2

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $8,1 \text{ g/cm}^3$

Barva – ocelově šedá, namodralá, neprůhledný, opákní,

Krystalochemie:

Krystaluje v hexagonální soustavě,

Vzhled v přírodě:

Minerál **vysoce temperovaných hydrotermálních žil** v asociaci s dalšími sulfidy (pyrit, chalkopyrit aj.). Také jako ruda v porfyrových ložisek, v pegmatitech, greisenech **na trhlinách žul**. Tvoří **hexagonální tabulky**, rovněž masy, krystaly do dutin jsou vzácné.



Sulfidy

Markazit – chemická značka FeS_2

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – kolem $6,1 \text{ g/cm}^3$

Barva – cínově bílá až světle ocelově šedá, neprůhledný,

Krystalochemie:

Krystaluje v rombické soustavě

Vzhled v přírodě:

Minerál některých rudních ložisek, **běžný v uhlonosných sedimentech ve formě kopinatých krystalů a jejich srostlic.** Někdy také **radiálně paprscité agregáty** nebo i celistvý. Na vzduchu nestálý, podléhá rychle přeměnám na sekundární sírany.



Ryzí prvky

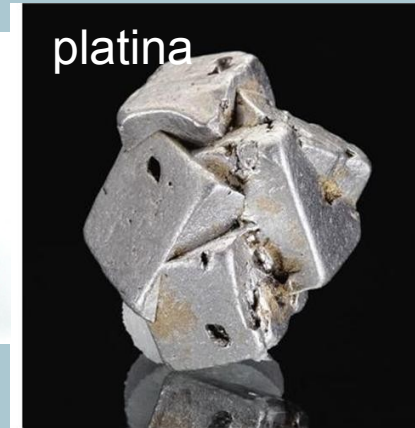
Ryzí prvky jsou v přírodě vzácné. K běžnějším patří zlato, stříbro, ryzí měď, grafit a síra. Kovy rovněž tvoří slitiny.

K dalším, avšak mnohem vzácnějším patří:

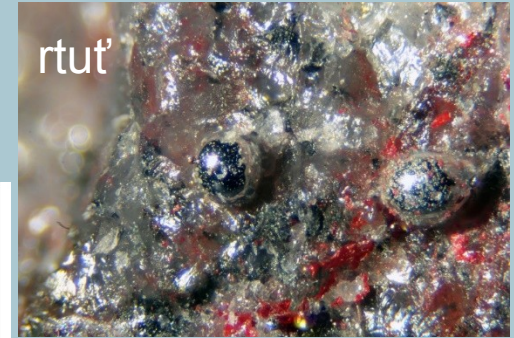
Antimon
Arsen
Bismut
Kadmium
Chrom
Indium
Železo
Kovy skupiny platiny –
platina,
osmium, iridium, palladium,
rhodium
Olovo
Molybden
Nikl
Rhenium
Selen
Křemík
Tantal
Telur
Cín
Titan
Vanad
Zinek
Rtuť



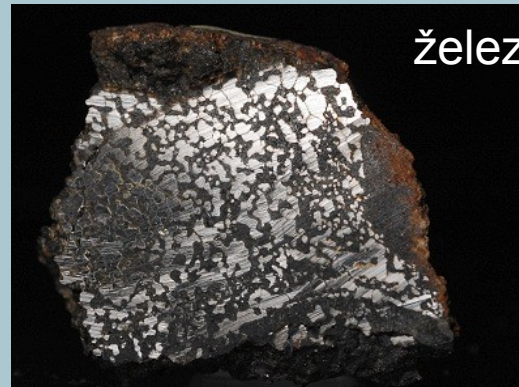
olovo



platina



rtuť



železo

Zlato – chemická značka Au

Fyzikální vlastnosti:

Hustota – $19,3\text{g/cm}^3$, většinou nižší z důvodu příměsí dalších prvků

(Ag, Cu aj.) v rozsahu $16\text{-}19\text{ g/cm}^3$

Barva – zlatožlutá, stříbrozlatá v případě vyšší příměsí stříbra

(elektrum obsah až několik desítek hm. %), načervenalá (příměs Cu)

Krystalochemie:

Krystaluje v kubické soustavě,

Vzhled v přírodě:

Primární je většinou ve formě **mikroskopických až okem viditelných zrn** rozptýlených v horninách, rudních či křemenných žilách, **vzácněji ve formě plíšků, drátků**, ojediněle ve formě **krystalů** (oktaedry, spojky oktaedrů a hexaedrů, deformované či nedokonale vyvinuté krystaly, **kostrovité formy** apod.)

Sekundárně **v náplavech či eluviích ve formě zaoblených zrn, plíšků, nugetů** apod.





- Stříbro
- měď



Grafit/diamant C

- Grafit - hexagonální nekovový minerál
- Původ **organogenní**
- ložiska grafitu vznikají při **přeměně sedimentárních hornin** ze zbytků organických látek a tvoří vrstvy nebo čočkovitá tělesa v rulách, svorech, fylitech nebo mramorech
- Pigment rozptýlený v sedimentech a metasedimentech
- Původ **hydrotermální** – vysrážením z fluid (střední až vysoké teploty fluid)
- S rostoucí teplotou vzniku se zvyšuje uspořádanost – využití pro stanovení T vzniku – ramanovskou spektroskopií (poměr a pozice ramanovských pásů)



Grafit/diamant C

- diamant – kubická modifikace C;
- Krystaly oktaedrické, dodekaedrické nebo krychlového vzhledu
- vznikají ve svrchním zemském plášti za vysokých teplot (900–1300 °C) a tlaků (4,5–6 GPa) v ultrabazických vyvřelinách - **kimberlity** (plášťové horniny) – větší krystaly, cenné
- Dále vznik při subdukci - **UHP horniny** – eklogity, granulity, peridotity – vznik z tavenin či COH-bohatých fluid; obvykle drobné krystalky do několika mikrometrů; význam pro stanovení PT podmínek
- Obsahují četné inkluze

