

Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta,

Katedra fyzickej geografie a geoekológie

## **Evolúcia minerálov**

**Prof. RNDr. Pavel Uher, CSc.**

*Katedra mineralógie a petrológie, Prírodovedecká fakulta UK v Bratislave*

TEXT K PREDNÁŠKE

2019

---

*Prednáška a text sú súčasťou riešenia projektu: KEGA č. 003UK-4/2017: Terénne vyučovanie geovied s využitím vybraných náučných chodníkov*

## Úvod

Druhovú rozmanitosť minerálov je výsledkom zložitého geologického vývoja našej planéty, resp. iných vesmírnych telies od ich vzniku po súčasnosť. Minerály, podobne ako živé organizmy, prešli evolúciou, počas ktorej rástla ich druhová diverzita a komplexnosť, v tesnej interakcii s endogénnymi a exogénnymi geologickými procesmi, ako aj s vyvíjajúcou sa hydrosférou, atmosférou a biosférou. Nárast počtu minerálov a ich evolúcia v čase nie je kontinuálna, ale prebiehala v nepravidelných skokoch v závislosti najmä od geologických a biologických faktorov (vývoj kontinentov a oceánov, evolúcia organizmov).

Minerály sú základným stavebným materiálom našej Zeme, ako aj planét, ich mesiacov, malých planetárnych telies, komét aj meteoritov vo vesmíre. Zvykli sme ich vnímať ako prírodné tuhé látky, chemické zlúčeniny alebo prvky s pravidelnou vnútornou kryštalickou štruktúrou, ktoré sa navonok môžu vyskytovať v podobe estetických kryštálov alebo nepravidelných agregátov. V súčasnosti evidujeme okolo 5450 druhov minerálov, pričom toto číslo nie je zďaleka konečné, vedci každý rok opíšu 80 až 100 nových minerálnych druhov. Napriek tomu je druhová rozmanitosť minerálov rádovo nižšia v porovnaní s miliónmi druhov známych a ešte neopísaných organizmov na Zemi. Druhovú rozmanitosť (diverzita) organizmov je výsledkom ich evolúcie, teda dlhodobého vývoja, keď sa život vyvíjal od najprimitívnejších a najjednoduchších druhov k vyvinutejším, zložitejším a druhovo rozmanitejším organizmom, vrátane človeka. Evolúcia rastlín, živočíchov a ďalších foriem živej hmoty počas geologickej histórie Zeme patrí medzi základné piliere biologických vied už od čias zakladateľa evolučnej biológie, Charlesa Darwina v polovici 19. storočia.

Mineralógovia podrobne skúmali a skúmajú najmä ich štruktúrne, chemické a fyzikálne vlastnosti, och genézu, stabilitu a rozpad pri rôznych teplotách a tlakoch, v závislosti od dostupných laboratórnych metód, resp. ich využitie v praxi. Ale až pred niečo vyše desiatimi

rokmi skupina mineralógov pod vedením prof. Roberta Hazena (Carnegie Institution, Washington) začala systematicky skúmať a formulovať zákonitosti vzniku, vývoja a diverzity minerálnych druhov počas vývoja Zeme, v interakcii s geologickými procesmi a vývojom organizmov, teda evolúciu minerálov (Hazen et al. 2008, 2009, 2011, 2012, 2013a, b, 2015; Hazen 2013; Grew & Hazen 2014; Grew et al. 2016).

### **Najstaršie minerály vo vesmíre**

*Kedy vznikli jednotlivé minerály? Ktoré sú najstaršie minerály?* Na tieto otázky nie sú jednoduché a jednoznačné odpovede, pretože veľkú väčšinu minerálnych druhov dosiaľ nedokážeme priamo datovať (napr. pomocou rozpadu rádioaktívnych izotopov), avšak pomáhajú nám vedecké výsledky z iných prírodných vied, najmä astronómie a geologických vied (historickej geológie, stratigrafie a paleontológie). Na základe fyzikálnych vlastností a výskytu vo vesmíre možno predpokladať, že najstarším minerálom je diamant, ktorý kondenzoval v uhlíkom obohatených zónach raného vesmíru pri teplotách pod približne 3700°C, nasledovaný grafitom - ďalšou formou prírodného uhlíka, od teploty pod 3200°C. Pri podobných teplotách vznikali aj ďalšie najstaršie minerály vo vesmíre: karbidy moissanit SiC, cohenit (Fe,Ni,Co)<sub>3</sub>C, ako aj karbidy Ti, Mo a Zr. Všetky tieto uhlíkom bohaté najstaršie minerály vznikali v dôsledku záverečných dramatických štádií vývoja hviezd, keď v dôsledku ich explózií došlo k nahromadeniu uhlíka a ďalších relatívne ťažkých prvkov v horúcich „molekulárnych mrakoch“ v rámci hmoty, ktorá bola vymrštená vybuchujúcou hviezdou. Pri ďalšej kondenzácii týchto hustejších častí hmoty pôvodných hviezd sa tvorili ďalšie zlúčeniny najmä ľahkých prvkov (napr. H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>), ktoré mohli pri nízkych teplotách kondenzovať na kryštalické tuhé látky.

Pri finálnych štádiach termonukleárných reakcií najmä hmotnejších hviezd, ktoré vybuchovali ako supernovy, došlo k vzniku ďalších minerálov, ktoré označujeme ako presolárne, teda staršie ako naše Slnko a planetárna sústava. Patrí k nim prírodné železo s prímiesou Ni, osbornit (TiN) a nierit ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), rutil ( $\text{TiO}_2$ ), korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), spinel ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), hibonit ( $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ ), bridgmanit ( $\text{MgSiO}_3$ ) a forsterit ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ). Všetky uvedené najstaršie minerály majú teda viac ako 4,6 miliardy rokov (vznik našej Slnčnej sústavy) a boli zistené v podobe veľmi drobných nano až mikročastíc a kryštálov v časticiach medzihviezdnej hmoty, ktorá dopadá na Zem samostatne alebo býva uzavretá v meteoritoch.



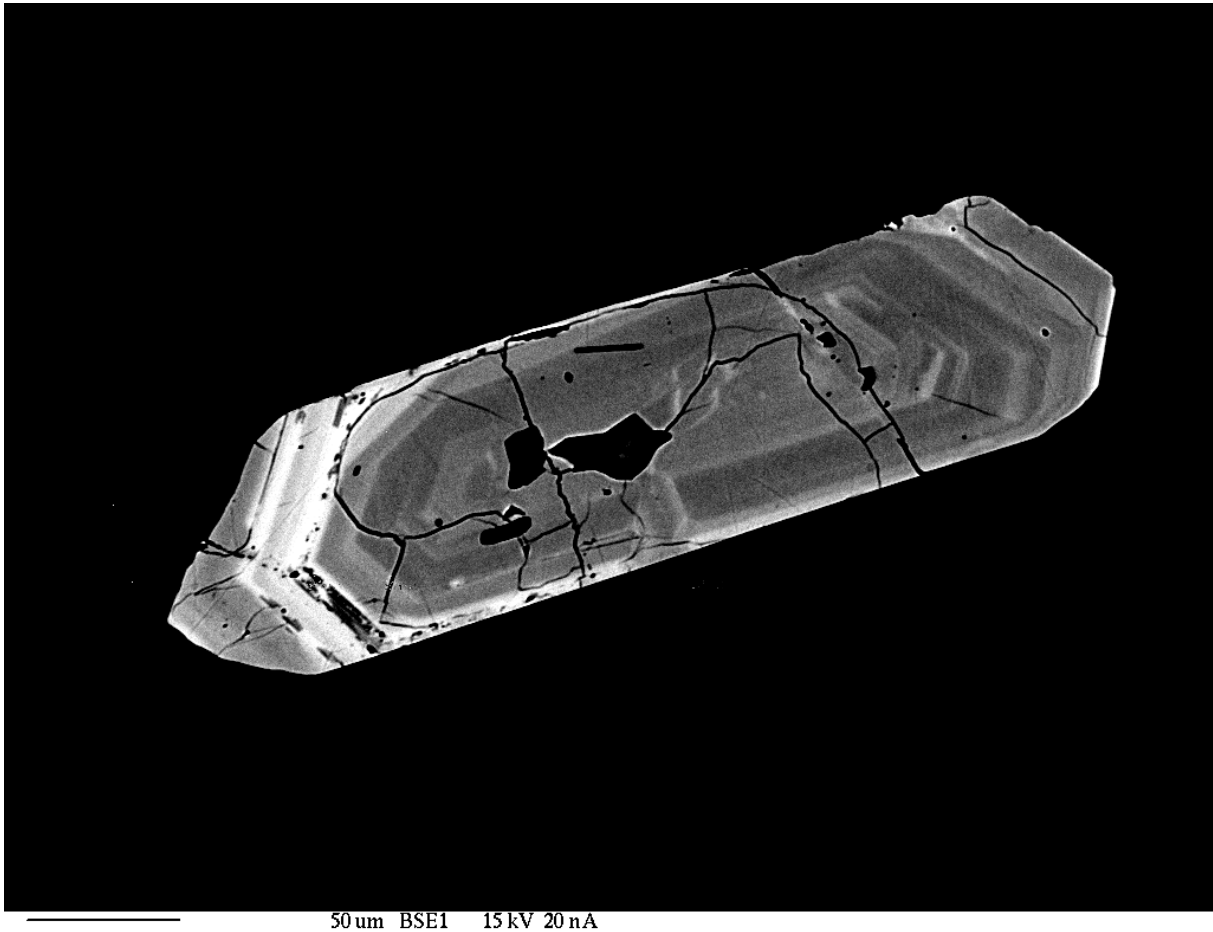
Obr. 1. Železný meteorit Sichote-Alin, ktorý dopadol v r. 1947 na ruskom Ďalekom východe. Úlomok meteoritu (veľkosť 5 cm) je tvorený takmer výhradne so zliatin železa s niklom (kamacitom a taenitom). Kryštalické železo patrí k najstarším minerálom vo vesmíre. Materiál a foto autora.

## **Minerálna evolúcia na ranej Zemi (hadeán až archaikum)**

Vznik našej Zeme ako pevného telesa (pred 4,567 miliardami rokov) odštartoval tvorbu ďalších druhov minerálov, ktoré vznikali v dôsledku prvotných magmatických a metamorfných procesov. Podobne sa tvorili minerály aj v ďalších telesách Slnecnej sústavy. Najmä prvých zhruba 500 miliónov rokov od vzniku Slnecnej sústavy dochádzalo k intenzívnym vzájomným zrážkam ranej Zeme a ďalších pevných telies. V prípade našej planéty hovoríme o etape „hustého bombardovania“, keď pravdepodobnou kolíziou s telesom veľkosti Marsu sa oddelila hmota, z ktorej vznikol Mesiac. Z tohto najrannejšieho obdobia (4,56 - 4,55 mld. rokov) máme zatiaľ zachované minerály len z meteoritov. Kým z najstarších a geochemicky najprimitívnejších meteoritoch (chondritoch) je známych okolo 60 minerálnych druhov, v pokročilejších achondritoch tento počet stúpa na cca 250 druhov. Najstarším datovaným minerálom, ktorý vznikol na Zemi, je zirkón z oblasti Jack Hills v Západnej Austrálii. Jeho vek bol na základe rádioaktívneho rozpadu izotopov uránu stanovený na 4,4 miliardy rokov. Primárna, pravdepodobne magmatická hornina, v ktorej zirkón kryštalizoval, sa však už nezachovala, po jej zvetraní sa však odolné kryštály zirkónu nezničili a dostali sa do mladších sedimentárnych a neskôr metamorfovaných hornín.

Najstaršou doteraz bezpečne zistenou horninou, ktorej zirkóny kryštalizovali priamo v nej, sú tonalitické ruly v oblasti Acasta (Acasta gneiss) v severozápadnej Kanade. Vek týchto zirkónov bol stanovený na 4,03 mld. rokov. Samozrejme, okrem zirkónu kryštalizovali už v najstaršom období geologickej histórie Zeme, označovanej ako hadeán (4,567 až 4,0 mld. rokov), mnohé ďalšie minerály. Odhadujeme, že v dôsledku prvotných magmatických, metamorfných a sedimentárnych procesov za prítomnosti tekutej vody sa na ranej Zemi počas hadeánu mohlo vytvoriť okolo 350 až 500 druhov minerálov. Evolúcia minerálov tak pokročila k značnej diverzite druhov, pričom sa už tvorili aj štruktúrne zložitejšie minerály, obsahujúce

hydroxylovú skupinu a vodu, napr. hydroxylapatit, amfiboly, sludy, neskôr aj zeolity a ílové minerály.



Obr. 2. Pozdĺžny rez kryštálom zirkónu ( $ZrSiO_4$ ) z granitu typu Hrončok v Kamenistej doline pri Čiernom Balogu. Zirkón je najstarším datovaným minerálom na Zemi, tento exemplár má vek okolo 265 miliónov rokov (perm). Mikrofotografia v spätne rozptýlených elektrónoch (BSE), dĺžka kryštálu: 0,33 mm. Materiál autora, foto: I. Holický

### **Vznik života a archaická evolúcia minerálov**

Atmosféra mladej Zeme počas hadeánu a nasledujúceho archaika (pred 4,0 až 2,5 miliardami rokov) bola stále chudobná na kyslík, a preto mnohé minerálne druhy, stabilné pri vysokej koncentrácii (fugacite) kyslíka ešte neexistovali, pretože neboli v daných, relatívne anoxických podmienkach stabilné. Niekedy pred približne 3,9 až 3,6 miliardami rokov však prichádza nový zásadný fenomén: vznik prvých primitívnych organizmov, začína biologická

evolúcia na Zemi. Ako presne vznikol život, či prišiel z vesmíru v meteoritoch a kométach, alebo vznikol priamo na Zemi, je dodnes predmetom diskusií. Je však zrejmé, že na vznik života museli byť vhodné podmienky, ktoré okrem iného vytváral aj minerálny substrát, na ktorom resp. v okolí ktorého prvé organizmy žili. Tak sa súčasne začína aj spoločná evolúcia (koevolúcia) minerálov a živých organizmov na Zemi, kde sa oba systémy vzájomne ovplyvňovali a napomáhali tak rozvoju diverzity a komplexnosti nových druhov minerálov a organizmov.

V období stredného a mladšieho archaika, najmä od doby pred približne 3 miliardami rokov sa už začínajú množiť geochronologické údaje, datujúce jednotlivé minerály (najmä zirkón, monazit, xenotím, titanit a uraninit). V litosfére vtedy dochádzalo k čoraz rôznorodejším procesom za stále kontrastnejších teplotno-tlakových podmienok ako dôsledok progresívnych zmien tektonických procesov. Vznikali stále rôznorodejšie typy magmatických, metamorfovaných a sedimentárnych hornín. Z obdobia zhruba pred 3 mld. rokov máme prvé jasnejšie indície pohybu litosferických dosiek, cyklických procesov vzniku a zániku kontinentov a superkontinentov. Táto nová dynamika Zeme v spojení s čoraz intenzívnejšími prejavmi sedimentárnych procesov (vznik mohutných súvrství, ale aj zvetrávanie) boli hybným motorom ďalšej evolúcie minerálov. Vznik prvých masívov magmatických alkalických hornín (najmä nefelínových syenitov) a telies vzácno-prvkových pegmatitov ako produktov extrémnej magmatickej frakcionácie a intenzívnej migrácie fluíd (F, H<sub>2</sub>O) pred 3,0 až 2,5 mld. rokov dal vznik mnohým minerálom vzácnych litofilných prvkov (Li, Be, B, Nb, Ta, Zr, Hf a REE - prvkom vzácnych zemín), ktoré sú dnes ťažené ako strategické nerastné suroviny. Mnohé nové minerály od archaika sú spojené aj s metamorfnými procesmi pri subdukcii a kolízii platní kontinentálnej a oceánskej kôry, ako aj interakcií s horninami zemského plášťa. Čoraz intenzívnejšia úloha vody, CO<sub>2</sub>, halogénov (F, Cl) a ďalších volatilných zložiek na a pri povrchu



Zeme znamenali vznik mnohých ďalších druhov minerálov, najmä karbonátov, sulfátov a halogenidov. V období do konca archaika pred 2,5 mld. rokov tak môžeme konštatovať rast diverzity minerálov na približne 1500 druhov. Tieto zmeny mali nepochybne vplyv aj na postupne sa rozvíjajúce formy života, ktoré však ešte stále neposkytovali minerálom dostatok kyslíka na ich ďalšiu evolúciu.



Obr. 3. Tmavozelené dipyramidálne kryštály libethenitu -  $\text{Cu}_2+2(\text{PO}_4)(\text{OH})$ , veľké do 4 mm, s hnedým limonitom na bielom kremeni. Evolúcia libethenitu je spojená s oxidačným prostredím v najmladšom, fanerozoickom období vývoja Zeme. Zbierky Mineralogického múzea Univerzity Komenského v Bratislave, foto: D. Ozdín.

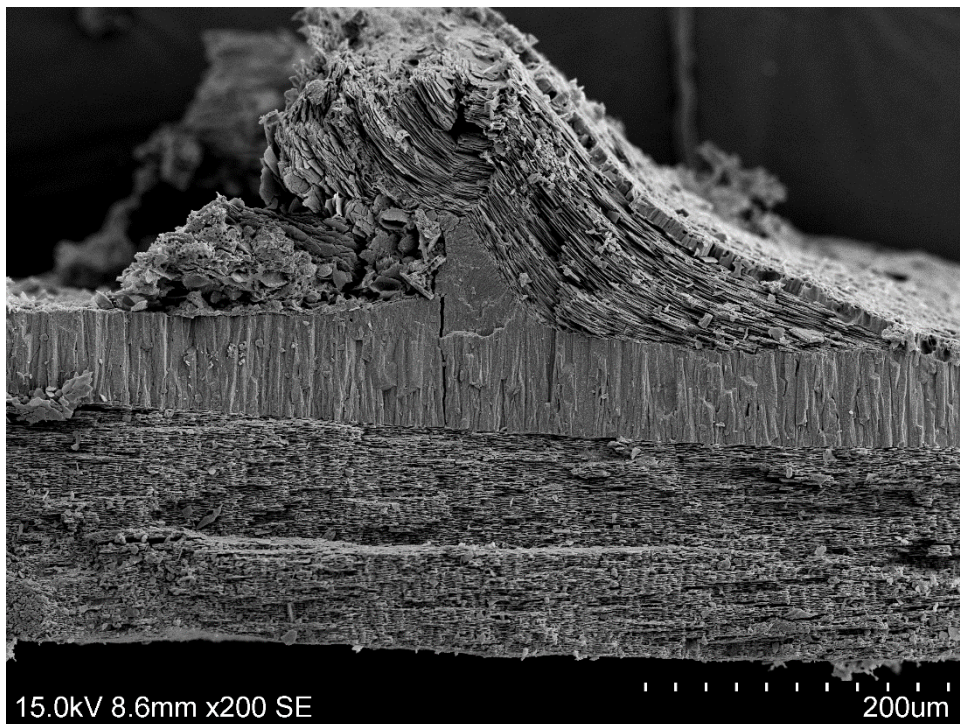


## **Minerálna evolúcia od veľkej oxidačnej udalosti**

Zlom nastal niekedy v období pred približne 2,4 až 1,9 miliardami rokov, v období proterozoika (2,5 až 0,54 mld. rokov). V dôsledku evolúcie organizmov došlo k prvému významnému rozšíreniu kyslíkovej fotosyntézy a následnému relatívne prudkému nárastu kyslíka v atmosfére. Tomuto obdobiu, keď koncentrácia O<sub>2</sub> v atmosfére stúpila na viac ako 1 %, hovoríme ako o veľkej oxidačnej udalosti. Táto udalosť navždy zmenila tvár Zeme: v dôsledku rastúcej koncentrácie kyslíka, pomerne reaktívneho plynu, došlo k veľkému zrýchleniu procesov oxidácie na povrchu Zeme a tvorby nových, dovtedy nestabilných minerálov a často k ich akumulácii v podobe ložísk (napr. minerály trojmocného železa, šesťmocného uránu, päťmocného vanádu, štvormocného mangánu, dvojmocnej medi). Tieto oxidačné minerály sa v dôsledku následnej subdukcie a kolízie dostávali do nižších úrovní litosféry, kde po metamorfóze a pretavení kryštalizovali v podobe ďalších kombinácií prvkov, teda nových a nových druhov minerálov. Uvedenú progresívnu evolúciu minerálov a koexistujúcich organizmov dočasne pribzdilo obdobie globálneho zaľadnenia, resp. série mohutných zaľadnení Zeme vo vrchnom proterozoiku pred zhruba 1 až 0,55 miliardami rokov. Každopádne na konci proterozoika pred 540 miliónmi rokov už možno predpokladať vznik veľkej väčšiny súčasne známych minerálov, okolo 4000 druhov.

Posledná etapa histórie našej Zeme je fanerozoikum, ktoré datujeme od doby pred 540 miliónmi rokov dodnes; zahŕňa známe útvary ako paleozoikum, mezozoikum a kenozoikum vrátane kvartéru. Deliacu hranicu fanerozoika stanovili geológovia už dávno, je ňou nápadne rýchle objavenie sa veľkého počtu nových druhov organizmov, predovšetkým najrôznejších foriem mnohobunkových druhov živočíchov na začiatku kambria. Vzájomná evolúcia organizmov a minerálov odvtedy dosiahla najvyššiu úroveň: mnohé živočíchy si začali vyrábať pevné minerálne schránky, najmä z minerálov kalcitu a aragonitu, ďalšou revolúciou bol vznik

pevnej kostry stavovcov najmä na báze hydroxylapatitu. Aj niektoré primitívnejšie mikroskopické organizmy si začali vlastnými biologickými pochodmi budovať vlastné schránky a kostry z minerálneho materiálu (napr. riasy - rozsievky, s kostrami na báze  $\text{SiO}_2$ ). Schránky a kostry uhynutých organizmov vytvorili mohutné súvrstvia vápencov, fosfátov, uhlia a ďalších hornín a minerálov. Minerálna diverzita v kvartéri, teda v súčasnosti, dosahuje vyše 5400 známych druhov a ďalšie stovky až tisíce dosiaľ neopísaných druhov.



Obr. 4. Prierez schránkou hlavonožca (nautiloida) rodu *Aturia* zo spodného miocénu (neogén, mladšie treťohory) z Cerovej na Záhorí. Schránka je tvorená vrstevnatými a prizmatickými agregátmi aragonitu ( $\text{CaCO}_3$ ). Mikrofotografia v riadkovacom elektrónovom mikroskope (SEM), mierka: 0,2 mm (200  $\mu\text{m}$ ). Materiál a foto: J. Schlögl.

Z nich vyše polovica sú produkty oxidačného prostredia, ktoré by nemohli vzniknúť bez prispenia kyslíka biogénneho pôvodu. Výsledná druhová pestrosť minerálov, ale súčasne aj foriem živej hmoty na Zemi je teda v podstatnej miere dôsledkom vzájomnej evolúcie minerálov a organizmov už takmer 4 miliardy rokov. Takéto podmienky sú unikátne na Zemi a nemohli byť dosiahnuté na susedných menších terestriálnych planétach a mesiacoch našej Slnecnej sústavy, kde sa v dôsledku nedostatočnej geologickej a minerálnej evolúcie

pravdepodobne nevytvorili vhodné podmienky na vznik života alebo prinajmenšom jeho vyvinutejších foriem, čo malo podstatný vplyv na relatívne slabú diverzitu minerálov.

## **Literatúra**

Grew ES, Hazen RM (2014) Beryllium mineral evolution. *Am Mineral* 99:999–1021

Grew ES, Krivovichev SV, Hazen RM, Hystad G (2016) Evolution of structural complexity in boron minerals. *Can Mineral* 54:125–143

Hazen RM (2013) Paleomineralogy of the Hadean Eon: A preliminary list. *Am J Sci* 313:807–843

Hazen RM, Papineau D, Bleeker W, Downs RT, Ferry J, McCoy T, Sverjensky DA, Yang H (2008) Mineral evolution. *Am Mineral* 93:1693–1720

Hazen RM, Ewing RC, Sverjensky DA (2009) Evolution of uranium and thorium minerals. *Am Mineral* 94:1293–1311

Hazen RM, Bekker A, Bish DL, Bleeker W, Downs RT, Farquhar J, Ferry JM, Grew ES, Knoll AH, Papineau D, Ralph JP, Sverjensky DA, Valley JW (2011) Needs and opportunities in mineral evolution research. *Am Mineral* 96: 953–963

Hazen RM, Golden J, Downs RT, Hystad G, Grew ES, Azzolini D, Sverjensky DA (2012) Mercury (Hg) mineral evolution: a mineralogical record of supercontinent assembly, changing ocean geochemistry, and the emerging terrestrial biosphere. *Am Mineral* 97: 1013–1042

Hazen RM, Jones A, Kah L, Sverjensky DA (2013a) Carbon mineral evolution. *Rev Mineral Geochem* 75:79–107

Hazen RM, Sverjensky DA, Azzolini D, Bish DL, Elmore SC, Hinnov L, Milliken RE (2013b) Clay mineral evolution. *Am Mineral* 98:2007–2029

Hazen RM, Grew ES, Downs RT, Golden J, Hystad G. (2015) Mineral ecology: chance and necessity in the mineral diversity of terrestrial planets. *Can Mineral* 53:295–324