

Jak vzniká tektonický model

Je to právě 100 let, kdy byl věhlasný český geolog Radim Kettner (1891–1967) jmenován mimořádným profesorem na Českém vysokém učení technickém. Na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy se jím stal až o 6 let později. Kettnerovy nákresy geologických profilů z mnohých lokalit dodnes budí uznání, přestože tehdejší pohled na tektonické procesy v zemském tělese je již značně překonán. Terénní data jsou však pro většinu geologů i po uplynutí 100 let stěžejním studijním materiálem. Pokrok v dalších přírodovědných oborech navíc poskytuje široké použití rozličných analytických a numerických metod. Ty umožňují výrazně detailnější pohled do procesů odehrávajících se nejen při povrchu, ale také hluboko v kůře, a to s poměrně vysokým rozlišením v čase a prostoru. Geologové se pokoušejí dešifrovat jednotlivé geologické události, jež vedly k utváření dnešního geologického obrazu Země, a tím pochopit dynamické procesy dodnes probíhající hluboko pod zemským povrchem. V tomto článku se pokusíme přiblížit, jaké moderní a přitom běžně prováděné metody geologové PŘF UK používají, aby sestavili co nejpodrobnější sekvence dějů – tektonické modely, které formovaly nejen vznik Českého masivu.

Český masiv jako ideální laboratoř

Jedním z mnoha fascinujících jevů na zemském tělese je tvorba horských pásem – orogenů. Také Český masiv je hluboce erodovaná část rozsáhlého orogenu, který se postupně utvářel při variském vrásnění během necelých 100 milionů let (od devonu zhruba před 390 miliony let po hranici karbon–perm asi před 300 miliony let). V průběhu této dlouhé doby se odehrála řada dílčích tektonických událostí, které se různou měrou podílely na výsledné architektuře Českého masivu.

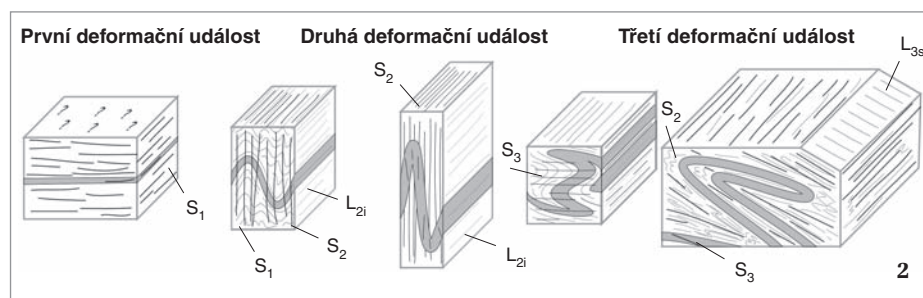
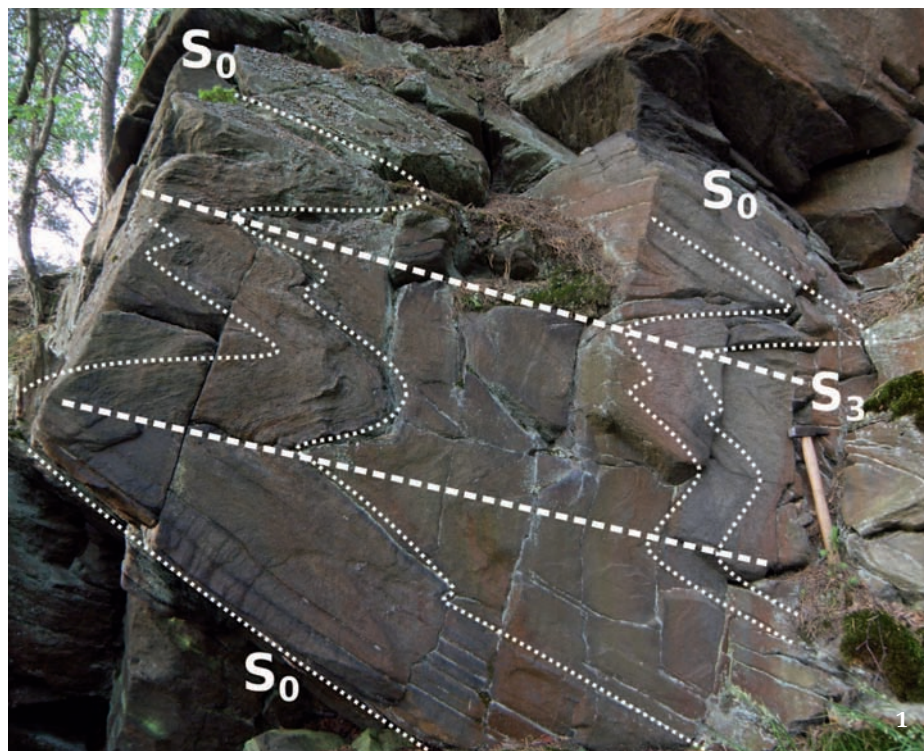
Klíčem k úspěšnému sestavení tektonického modelu vývoje oblasti je dostatečná pestrost horninových typů, ideálně takových, které se utvářely v odlišných hloubkách. Vzájemné vztahy jednotek pocházejících z různých hloubek jsou potom hlavními aspekty, jež by měl tektonický model vysvětlovat. Český masiv představuje v tomto směru vynikající terén, neboť na poměrně malém území nacházíme horniny setrvávající po celou dobu své existence pouze v blízkosti povrchu (a to po více než půl miliardy let) stejně jako horniny, které byly zanořeny do hloubek přes 100 km a krátce nato znovu vytaženy zpět k povrchu. Sedimentární horniny poskytují informaci o tehdejší biosféře, dynamice reliéfu a o horninách vystupujících tehdy na povrchu. O podpovrchových procesech, utvářejících reliéf, však více napovídá přímo horniny z hloubi – horniny metamorfované.

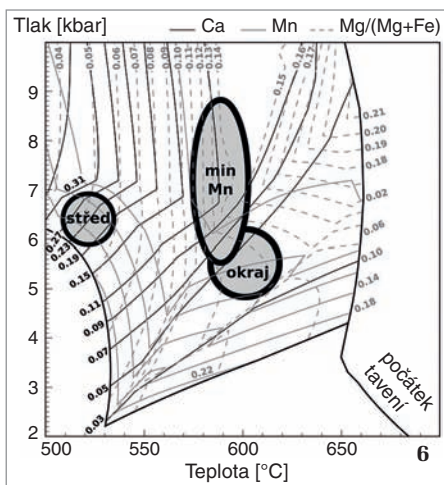
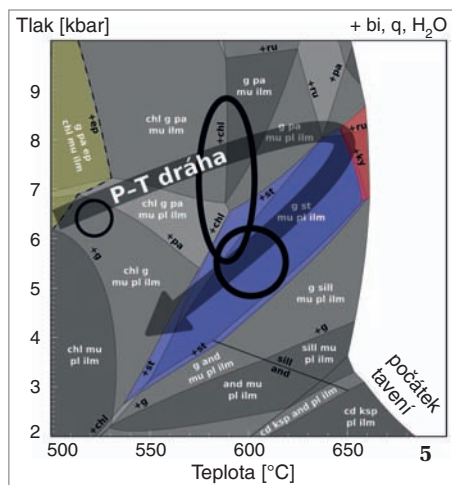
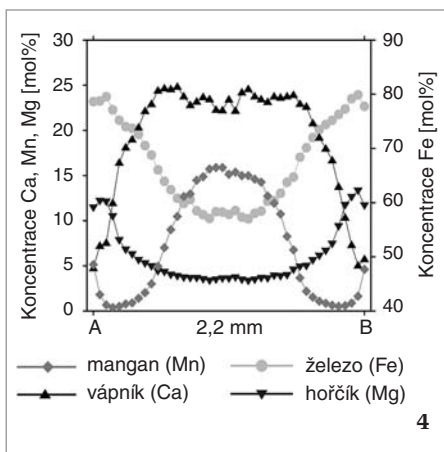
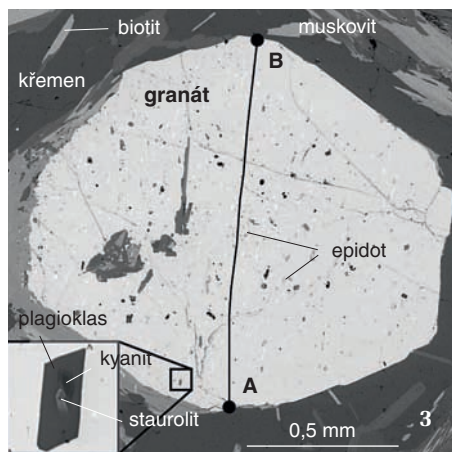
Co ukrývají metamorfované horniny

Ve větších hloubkách dochází vlivem vyššího tlaku a teploty k přeměnám neboli metamorfóze hornin. Minerály se přizpůsobují novým podmínkám, některé zanikají a jiné se tvoří. Např. z jílu s narůstající hloubkou (a tedy teplotou) vzniká nejdříve fylit, hlouběji pak svor, který se poté za teplot kolem 650 °C začíná tavit. Rekordman v Českém masivu granulity, jež prošly teplotami i přes 1 000 °C, a to v hloubkách přes 70 km. Právě proto poskytují nejcennější informace o procesech v hloubi zemské kůry metamorfované horniny, kterým se v tomto textu budeme věnovat především.

Stejně jako každý jiný materiál, i horniny se snaží dosáhnout rovnováhy s okolními podmínkami změnou svého vnitřního uspořádání tak, aby se dostaly do energeticky co nejúspornějšího stavu. V metamorfovaných horninách proto při změně tlaku a teploty dochází k chemickým reakcím mezi minerály, čímž se mění výsledná minerální asociace, objemové zastoupení jednotlivých minerálů i jejich chemické složení. Pro určení stabilní minerální asociace a složení jednotlivých minerálů se v současnosti používá obsáhlý a stále se zdokonalující výpočetní aparát, založený na termodynamice a fázových rovnováhách. Takto je možné minerální změny za širokého rozmezí teplot a tlaků numericky modelovat.

Velmi častým případem je, že horniny nedosáhnou rovnováhy v celém objemu, a tak zůstanou zbytky nezreagovaného materiálu. Ty jsou ale vodítky pro pochopení metamorfních asociací, jež mohly být v hornině v rovnováze dříve, a to i za velmi odlišných teplotně-tlakových pod-





1 a 2 Interpretace skalních výchozů (Žlutice, asi 25 km od Karlových Varů, obr. 1) a sledu deformačních událostí (2)

3 a 4 Zrno granátu v elektronovém mikroskopu. Granát v sobě během růstu uzavírá řadu jiných minerálů (inkluzí). Vyznačený profil A–B ukazuje změny v chemickém složení krystalu.

5 a 6 Ukázka termodynamického modelování. Diagram znázorňuje pole stability minerálů v teplotně-tlakovém prostoru (P–T; obr. 5). Zvýrazněná pole ukazují významné minerály, skutečně pozorované v hornině. Ve všech polích je navíc biotit, křemen a voda. Na obr. 6 změny chemického složení granátu v P–T prostoru vypočtené pro stejnou horninu. Elipsy vyznačují měřené složení zrn od středu zrna směrem k okraji. Zkratky v obr. 5: bi – biotit, q – křemen, mu – muskovit, pa – paragonit, ilm – ilmenit, ru – rutíl, ky – kyanit, g – granát, st – staurolit, and – andalusit, sill – silimanit, pl – plagioklas, ksp – draselný živec, ep – epidot, chl – chlorit, cd – cordierit

7 Radiometrické určení stáří – datování zrna monazitu *in situ*. Datovat lze i několik růstových domén v rámci jednoho zrna. Číslo udává věk jednotlivých domén v milionech let.

mínek. Velká část minerálů tvoří sloučeniny, v nichž dochází k výměnám prvků s podobnou velikostí a nábojem na určitých pozicích v krystalové mřížce. Pokud minerály rostou za měnící se teploty a tlaku, mění se i složení jednotlivých přírůstkových zón. Vzniká zonalita v chemickém složení, která je nejjednodušším příkla-

dem zachovalé starší rovnováhy. Navíc minerály během růstu mohou zachytávat drobná zrna okolních minerálů, která jsou s právě rostoucím zrnem v rovnováze. Takovým způsobem se dají postupně trasovat jednotlivé rovnovážné stavy, kterými hornina během své cesty zemskou kůrou prošla. Srovnáním pozorovaných rovnovážných stavů s termodynamickým modelem můžeme jednotlivým rovnovážným stavům přiřadit konkrétní teplotu a tlak, a sestavit tak jakousi trajektorii horniny teplotně-tlakovým prostorem neboli P–T dráhu (Pressure–Temperature).

Na obr. 3–6 schematicky vidíme, jak lze P–T dráhu sestavit. Základem je určení dílčích stabilních minerálních asociací a přiřazení chemického složení jednotlivým minerálům. Z pohledu chemického složení představuje jeden z nejlepších významníků granát, protože často tvoří poměrně velká zrna a jeho složení je značně citlivé na změnu teplotně-tlakových podmínek (obr. 3). Profil chemickým složením

granátu (obr. 4) ukazuje, že v jádru zrna se nachází vysoká koncentrace manganu (Mn) a vápníku (Ca), a nízká koncentrace železa (Fe) a hořčíku (Mg). Na okraji zrna je naopak nižší koncentrace Mn a Ca, vyšší Fe a Mg. Navíc jádro zrna obsahuje drobné inkluze (uzavřeniny) např. epidotu, zatímco okraj granátu uzavírá minerály staurolit a kyanit. Když tato pozorování porovnáme s výpočtem fázových rovnováh pro dané celkové složení horniny, můžeme jednotlivým minerálním asociacím a složením přiřadit poměrně úzké rozmezí teplot a tlaků, ve kterém mohou společně koexistovat. Propojením jednotlivých polí stability získáme představu o P–T dráze horniny.

Určení teplotně-tlakových podmínek hornin také poskytuje informaci o místním geotermálním gradientu, jenž udává míru, s jakou teplota narůstá s hloubkou. Tato informace je důležitá pro určení tektonického prostředí metamorfózy. Např. v oblasti subdukčních zón, kde se chladná oceánská deska zasouvá do pláště, teplota s tlakem narůstá velmi pomalu. Naopak v místech, kde se zemská kůra ztenčuje a žhavý zemský plášť leží v poměrně malé hloubce, je geotermální gradient velmi vysoký.

Deformace hornin

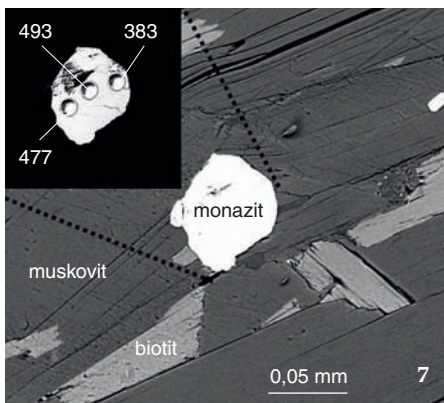
Metamorfóza hornin bývá doprovázena jejich deformací a vrásněním. Působením orientovaného napětí získávají horniny přednostní uspořádání jednotlivých minerálních zrn, která během metamorfózy rostou. Toto uspořádání, tzv. foliace, nám tedy zprostředkovává informaci o orientaci napětí působícího na horniny při jejich metamorfóze. Můžeme tak např. odvodit, v jakém směru byl orogen zkracován, případně jakým směrem horninový materiál „tekl“.

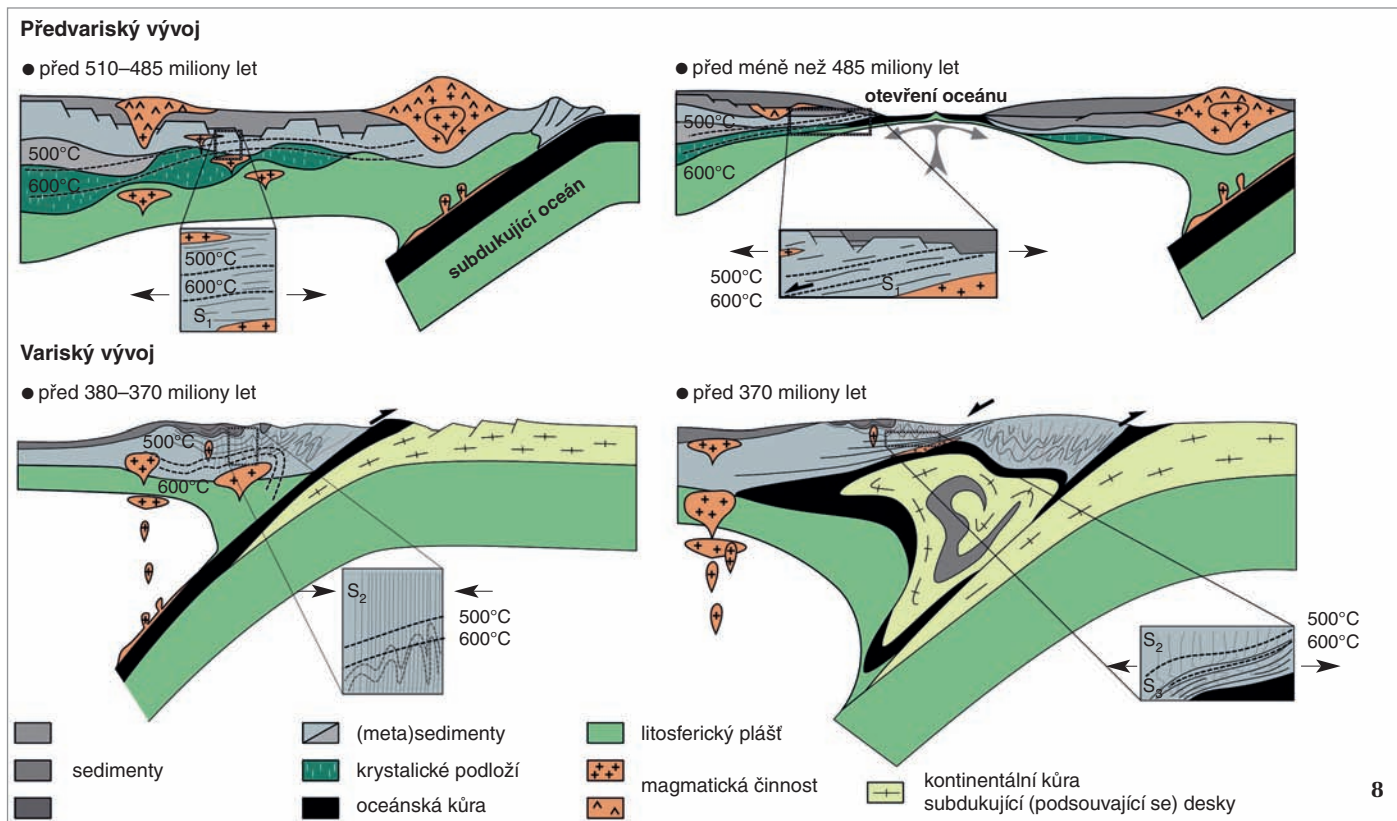
Podobně jako metamorfní minerální asociace zachovávají informaci o jednotlivých teplotně-tlakových podmínkách hornin podél své P–T dráhy, deformace hornin a výsledný vrásnový vzor jsou odrazem jednotlivých napětíových stavů, které hornina podél své P–T dráhy zaznamenala. Představíme-li si, že horninu deformujeme vícekrát (obr. 1 a 2), výsledný vrásnový vzor může být skutečně komplikovaný a rozpoznání jednotlivých událostí pak bývá opravdovým oříškem.

Deformace hornin má další zajímavou vlastnost. Je totiž heterogenní – postihuje horniny s rozličnou intenzitou v závislosti na jejich složení a pozici v deformovaném sledu. Vzhledem k tomu, že deformace významně usnadňuje metamorfní reakce, silně deformované domény zachovávají mladší minerální asociace, zatímco starší minerální asociace bývají zachovány v méně deformovaných doménách. Výsledkem souhry deformace a metamorfózy je proto pestrá mozaika finálních stavů, kde každý stav zaznamenává specifickým způsobem část společné tektonické historie.

Datování

Některé minerály do své krystalové mřížky dokážou začlenit malé množství radioaktivních izotopů některých prvků. Díky rozvoji analytických metod v uplynulých dekádách jsme schopni u stále většího počtu minerálů analyzovat tyto stopové





koncentrace, a to se stále se zvětšující přesností a současně ze zmenšujícího se objemu materiálu. Výsledkem je možnost určení stáří minerálů dokonce *in situ* – v jejich původní pozici v horninovém výbrusu, a tedy v kontextu jednotlivých minerálních vztahů. Takto lze zjistit nejen stáří minerálů samotného, ale dovést i stáří jednotlivých metamorfních asociací, a tedy i teplotně-tlakových podmínek určitých deformačních událostí. Využití radiometrického datování pak poskytne časové měřítko geologických procesů (obr. 7). Zároveň umožňuje velmi robustní korelaci daných tektonických událostí na různých hloubkových úrovních a také korelaci vývoje na různých místech světa, a to i napříč geologickými odvětvími.

Ukázka tektonického modelu

Kompilací P–T drah s datováním a deformační analýzou jsme schopni dostat poměrně ucelený obrázek o napětovém režimu a relativních pohybech horninových celků v čase. Na obr. 1–7 je uvedena řada příkladů, všechny pocházejí z Českého masivu, z oblasti mezi Žluticemi a Mariánskými Lázněmi. V tomto terénu vycházejí na povrch převážně metamorfované horniny, které během své historie dosáhly hloubek asi od 20 km u nejméně metamorfovaných, až po 90 km u těch silně metamorfovaných. Oblast si lze představit jako poměrně mocný řez jednotlivými patry kontinentální zemské kůry v době variské orogeneze. Pokusíme se přiblížit si jednu z možných interpretací tektonického vývoje oblasti, který byl pomocí výše popsaných metod v nedávné době rekonstruován (obr. 8, pro podrobnosti viz Peřestý a kol. 2017 a 2020, Collett a kol. 2018).

Nejstarší zaznamenaná událost se datuje do doby zhruba před 485 miliony let, kdy došlo ke ztenčení kůry, jejím prohrátí a výhledu metamorfovaných hornin smě-

rem k povrchu. Postupné ztenčování kůry vedlo pravděpodobně až k jejímu roztržení a otevření nového oceánu. Tyto procesy jsou zaznamenány v jádrech granátu, která svým složením ukazují na teploty mezi 500–600 °C v hloubce kolem 15 km, tedy na vznik v prostředí s vysokým geotermálním gradientem, který je pro takové prostředí typický. Stáří této události bylo určeno datováním metodou uran-olovo na zrně monazitu, jenž byl v granátu nalezen.

Následovalo období relativního klidu. To bylo přerušeno v době asi před 390 miliony let, kdy došlo k podsouvání oceánské kůry pod kůru kontinentální podobně, jako se tomu dnes děje pod Andami. Indikátorem tohoto procesu je metamorfóza některých horninových typů v hloubce kolem 90 km při zhruba 700 °C, ukazující na relativně nízký geotermální gradient. Stáří této epizody bylo určeno datováním krystalů granátu (metodou lutecium-hafnium). Událost odráží první známky variského vrásnění v Českém masivu. Krátce poté se v rychlém časovém sledu staly dvě významné události. Starší zaznamenaná ztlustění celé kůry a zanoření hornin na její bázi do hloubek více než 55 km a s teplotou přes 800 °C doprovázené jejich zahříváním podél typického orogenního geotermálního gradientu. Vrásky vznikající v té době naznačují horizontální zkrácení ve směru severozápad–jihovýchod ve všech korových úrovních. Tak se utvářela vertikální stavba (foliace), která byla posléze znovu vrásněna mladší deformační událostí, jež způsobila závěrečné vytažení měkkých vysoce metamorfovaných hornin z hloubi orogenu směrem k povrchu. Tyto události byly dobře datovány metodou uran-olovo na monazitu, ale i argon-argon na slídách. Obě metody ukazují překrývající se stáří těchto dvou dějů v době před 380 a 370 miliony let. Přestože poté již v oblasti žádná významná metamorfóza nenastá-

8 Ukázka tektonického modelu vývoje Tepelsko-Barrandienské oblasti v Českém masivu. Všechny obr. upraveny podle: V. Peřestý a kol. (2017)

la, zdaleka nejde o konec metamorfních procesů v Českém masivu. Mladší děje můžeme pozorovat např. na celé Českomoravské vysočině, ale i mnoha jiných místech. To už ale přesahuje zaměření článku.

Závěrem

Cílem tohoto textu bylo především představit způsoby, jakými tektonické modely v současnosti vznikají, a jak probíhá práce části vědeckých týmů na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy po 100 letech od jejího založení. Ukázali jsme si zde pouze některé, běžně užívané metody studia metamorfovaných hornin. Tektonické modely se ale opírají i o další přístupy. Zmínit bychom měli např. metody geofyzikální, schopné zobrazit stavbu celé kůry (např. studiem šíření seismických vln nebo podle charakteru gravitačního a magnetického signálu), nebo metody geochemické, které se studiem izotopového složení hornin dokážou vyjádřit nejen ke stáří hornin, ale i k vzájemným interakcím hornin a k prostředí jejich vzniku. I přesto se běžně stává, že nashromážděná datová sada má větší množství možných interpretací. Kombinací různých metod však můžeme výrazně zúžit počet obhajitelných řešení. V budoucnu se zajisté ukáže, v čem byly naše současné modely nedokonalé, a nové metody zkoumání nepochybně posunou současné poznání o mnoho kroků vpřed.

Seznam použité literatury uvádíme na webové stránce Živy.