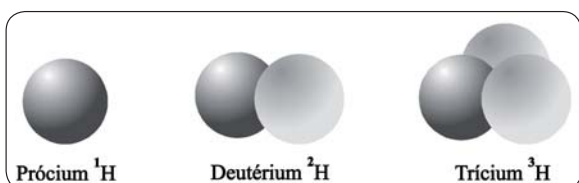


Izotopy v prírode

Predstavu o stavbe hmoty z ďalej nedeliteľných častí – atómov odvodili na základe filozofických úvah už pred 2500 rokmi starí Gréci (Démokritos), ale na základe vedeckých dôkazov sa postupom času zmenila do novej teórie. Atomisti, medzi nimi John Dalton, učiteľ, chemik a fyzik, je najznámejší svojimi postulátmi o atómovej stavbe prvkov, ktorá sa stala od roku 1803 základom modernej chémie. V našej diskusii sú dôležité dva z nich. Atómy sú najmenšie častice hmo-

tónov identický (atómové číslo), rozdiel v ich hmotnosti spôsobuje rozdielny počet neutrónov. V prírode existuje iba jediný prvok, ktorý nemá vo svojom jadre neutrón, a tým je najjednoduchší a najľahší atóm vodíka. Jeho hmotnosť sa teda približne rovná hmotnosti jedného protónu (obr. 1). Ale prírodný vodík je tiež zmesou izotopov o atómových hmotnostiach ^1H – prócium (bez neutrónu), ^2H – deutérium (1 neutrón navyše), ^3H – trícium (2 neutróny navyše).



Obr. 1: Prírodné izotopy vodíka: ^1H – prócium, jediný prvok v prírode, ktorý v jadre atómu nemá neutrón, iba jeden protón, ^2H – deutérium (jadro obsahuje jeden protón a jeden neutrón), ^3H – trícium má v jadre jeden protón a dva neutróny. Väčšina prvkov v prírode sú izotopové zmesi, t. j. konkrétne prvky sa skladajú z atómov rozdielnych hmotností, pretože majú rozdielny počet neutrónov v jadre. Prevzaté z: Král, J. 2007: *Vek slnečnej sústavy*, VEDA, Bratislava

ty, ktoré sa nemôžu meniť. Druhý postulát striktné definoval, že všetky atómy toho istého chemického prvku majú identické vlastnosti a majú tiež identickú hmotnosť. Táto teória vydržala celé storočie. Po objave prírodzenej rádioaktivity uránu H. Becquerelom v roku 1896 sa ukázalo, že niektoré prvky sa môžu samovoľne rozpadáť na iné, čím sa prvý postulát ukázal neplatným. Ďalším výskumom rádioaktivity uránu sa začali veci komplikovať a nové zistenia sa nedali vysvetliť ináč ako spochybnením starých pravd. Napríklad, keď sa na začiatku XX. storočia zistilo, že koncovým členom rádioaktívneho rozpadu uránu je olovo, bolo pre chemikov značne znervózňujúcim faktom zistenie, že hmotnosť olova z olovených rúd neobsahujúcich urán, bola iná ako hmotnosť olova, ktoré dokázateľne vzniklo rádioaktívnym rozpadom uránu. Ale ako môže mať jeden chemický prvok rozdielnu hmotnosť? Všetky tieto pozorovania viedli k jednoznačnému záveru: na jednom mieste v periodickej tabuľke chemických prvkov sa môžu nachádzať rôzne druhy atómov – sice toho istého prvku, ale s rozdielnou hmotnosťou. Také atómy dostali názov **izotopy**, čo v gréčtine znamená „to isté miesto“. Za tento objav, publikovaný v rokoch 1911 – 1913, dostal Frederick Soddy v roku 1921 Nobelovu cenu. Neskôr sa dokázalo, že väčšina prvkov vyskytujúcich sa na Zemi a v mimozemskej hmote sú vlastne izotopové zmesi a prvky skladajúce sa iba z atómov rovnakej hmotnosti sú v prírode zriedkavé. Napr. prírodný cín má až 10 izotopov. Zlato je jeden z mála monoizotopových prvkov zložených iba z atómov, ktoré majú rovnakú hmotnosť. Objav prírodzenej rádioaktivity (1896), elektrónu (elektricky záporne nabitá častica) v roku 1897, kladne nabitého protónu (1919) a nakoniec elektricky neutrálneho neutrónu (1932) ako prvých troch subatomárnych častíc, viedol k novým predstavám o stavbe atómu. O hmotnosti jednotlivého atómu rozhoduje počet protónov a neutrónov v jeho jadre. Keďže atómy jedného prvku majú počet pro-

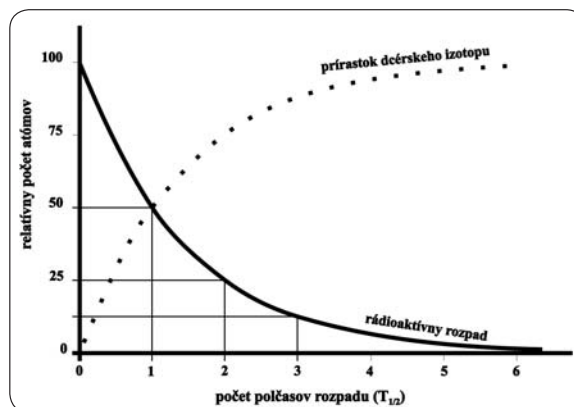
A najťažšie prvky ako urán a tórium mohli vzniknúť iba počas katastrofického konca veľmi hmotných hviezd – v supernovách. V súčasnosti sa v prírode nachádza okolo 300 izotopov rôznych prvkov, ktoré, ako sme spomenuli, pochádzajú z rôznych zdrojov a procesov.

Väčšina izotopov prvkov vyskytujúcich sa v prírode je stabilná. Ich vznik sa hlavne viaže na spomenuté hviezdotvorné procesy. Množstvo ich atómov sa v prírode prakticky nemení. Ako príklad môžeme uviesť tri izotopy kyslíka ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O . Menšia časť rádioaktívnych izotopov (materských) sa rádioaktívnym rozpadom mení na izotopy iného prvku, ktoré sa tiež nazývajú dcérske, pretože vznikli rádioaktívnym rozpadom materského izotopu. Dcérske izotopy sa často nazývajú aj rádioaktívnymi izotopmi, lebo ich vznik je viazaný na rádioaktívne premeny (obr. 2). Koncové členy rozpadu sú tiež stabilnými izotopmi. Rýchlosť rozpadu je pre daný rádioaktívny izotop špecifická a často sa vyjadruje polčasom rozpadu ($T_{1/2}$), ktorý definuje, za aký čas sa rozpadne polovica rádioaktívnych atómov.

Objav rozpadu rádioaktívnych prvkov, objav izotopov, dal v priebehu minulého storočia do rúk výskumníkov vynikajúci nástroj, základ pre vznik nových vedných disciplín, ktoré prinášajú nové a originálne údaje o fungovaní zložitých prírodných systémov a ich vzájomnom pôsobení. Tieto zásadné objavy umožnili využívať produkty rozpadu, t. j. rádioaktívne a stabilné izotopy ako významné izotopové

stopovače na štúdium širokého spektra geologických, geochemických, hydrologických, biologických a environmentálnych procesov. Tieto údaje majú v izotopovej geochémii i kozmochémii rovnakú cenu ako odťažky prstov alebo analýzy DNA v kriminalistike.

Rádioaktívne izotopy zohrali zásadnú úlohu pri snahách o určenie veku Zeme a slnečnej sústavy. Začiatkom XX. storočia E. Rutherford zistil, že rádioaktívny rozpad uránu a jeho premena na olovo poskytuje nezvyklý geochronometer, ktorý spoľahlivo tiká miliardy rokov. Rádioaktívnosť poskytla teoretický základ pre určovanie veku hornín a minerálov a začala vznikať nová vedná disciplína – izotopová geochronológia. Prírodovedcom, ktorí túžili nájsť spôsob ako merať čas a vek geologických procesov, teda objav rádioaktivity, umožnil prvýkrát určovať veky minerálov a hornín a vyjadriť ich v numerickej škále času. Bol to veľký pokrok, veď ľudia sa pokúšali odhadnúť vek Zeme už prinajmenej 2000 rokov. Už v XVIII. storočí geológovia, desaťročia trezivo pozorujúci zemský povrch a jeho zmeny a mapujúci rozšírenie a výskyt rôznych hornín, mali mnoho dôkazov, že vertikálne výzdvihy povrchu, jeho erózia a následné uloženie (sedimentácia) zvetraných častí sú veľmi pomalé procesy a zďaleka presahujú dimenzie ľuďmi meraného času. James Hutton (1726 – 1797), jeden zo zakladateľov modernej geológie, mal na vek Zeme vyhranený názor – Zem je veľmi stará, „bez stôp po svojom začiatku, bez výhľadu jej konca“. Ale ani jedno z týchto pozorovaní nebolo možné vyjadriť kvantitatívne, v používaných jednotkách času. Prvé datovania uránových minerálov urobil B. B. Boltwood v roku 1907, a to na základe U-Pb geochronometra. Dnes sa veky zemských a mimozemských minerálov a hornín datujú rôznymi radiačnými systémami s rôznym, ale dlhým polčasom rozpadu ($T_{1/2}$): ^{238}U - ^{206}Pb ($T_{1/2} = 4,468 \times 10^9$ rokov), ^{235}U - ^{207}Pb ($T_{1/2} = 704 \times 10^6$ rokov), ^{232}Th - ^{208}Pb ($T_{1/2} = 14,01 \times 10^9$ rokov),



Obr. 2: Schéma funkcie rozpadu rádioaktívnych prvkov. Zákon rádioaktívneho rozpadu experimentálne dokázali E. Rutherfordom a F. Soddy (1902). Rádioaktívnym rozpadom sa pôvodný (materský) prvok mení na iný (dcérske, rádioaktívny), teda je to záměna jedného atómu za atóm iného prvku. Polčas rozpadu ($T_{1/2}$) je charakteristickou konštantou pre daný rádioaktívny izotop a definuje čas za aký sa rozpadne polovica prítomných rádioaktívnych atómov. Ak zistíme množstvo nerozpadnutých rádioaktívnych atómov a počet vzniknutých dcérskeho, potom možno určiť ako dlho v danej vzorke rádioaktívny rozpad prebiehal, alebo inými slovami – možno určiť vek vzorky. Prevzaté z: Král, J. 2007: *Vek slnečnej sústavy*, VEDA, Bratislava.



Obr. 3: Planéty slnečnej sústavy sú staré 4,567 miliardy (10^9) rokov, čo zistil C. Patterson už v roku 1956 na základe U-Pb geochronometra. Zároveň dokázal, že hmota Zeme a meteoritov pochádza z jedného zdroja. Najstaršie pevné drobné častice (prvé kondenzáty zo slnečnej hmloviny) sú staré až 4. 567 miliardy (10^9) rokov.

^{147}Sm - ^{143}Nd ($T_{1/2} = 106 \times 10^9$ rokov), ^{87}Rb - ^{87}Sr ($T_{1/2} = 48,8 \times 10^9$ rokov), ^{40}K - ^{40}Ar ($T_{1/2} = 11,93 \times 10^9$ rokov). Už po prvých výsledkoch datovaní sa začalo chápať, že Zem je pravdepodobne omnoho staršia, než odhady založené na teologických predstavách, a to spôsobilo revolúciu v geológii. Tento objav znamenal začiatok našej schopnosti správne a presne kvantifikovať čas zaznamenaný v horninách. Poznanie a pochopenie rádioaktívneho rozpadu, zároveň s vývojom techník na merania izotopového zloženia prvkov, umožnilo výpočet veku Zeme, a tým zrod modernej geochronológie. Prelomovým okamihom bola práca C. Pattersona z roku 1956, v ktorej dokázal, že Zem je stará 4,55 miliardy (10^9) rokov (obr. 3) a že hmota Zeme a meteoritov pochádza z jedného zdroja.

Extrémny pokrok v tejto disciplíne v priebehu posledných 50 rokov zásadne zmenil naše chápanie histórie Zeme ako aj názor na naše miesto v slnečnej sústave. Geochronológovia sú schopní merať veky meteoritov a mesačných hornín a určiť vek Zeme. Dnes sa v pozemských laboratóriách datujú (aj keď sa to zdá absurdné) aj horniny z Marsu bez toho, aby na povrch planéty vstúpil človek. V budúcnosti bude vylepšená časová škála akrečných procesov planét, procesy diferenciácie a rýchlosť biologickej evolúcie, a zániku rôznych organizmov, orogénických a magmatických procesov, a klimatické zmeny. Geochronológia sa stala dôležitou súčasťou vied o Zemi a vesmíre.

U-Pb geochronológia zohrala dramatickú úlohu v našom pochopení veku planéty, ako aj rýchlosti geologických zmien. Od 50. rokov pretrvávajú značný záujem o veky meteoritov, mesačných hornín (od zberov z misí APOLLO, obr. 4) i o najstaršie horniny na Zemi. Veľmi rafinované technológie sa použili na datovanie zirkónov (4,37 – 3,88 miliárd rokov) vo výbrusoch mesačných hornín; najstarších zirkónov v slnečnej sústave (4563 $\pm$ 15 miliónov rokov) z meteoritov a špecifických minerálov z meteoritu Allende, Jefremovka (až 4567 $\pm$ 34 miliónov rokov). Hoci systematika datovania celých hornín, resp. separovaných minerálov Rb-Sr, Sm-Nd a U-Pb metódami bola použitá na odhad rozpätia vekov meteoritov, datovanie jednotlivých akcesorických minerálov s vysokým obsahom U ako

zirkón a perovskit je kľúčom k rozmotaniu detailnej histórie formovania planetezimál (prvé zárodoky planét o veľkosti asteroidov) a identifikácii akéhokoľvek materiálu staršieho ako slnečná sústava. Hoci doteraz takýto materiál zatiaľ nebol identifikovaný, vo výskumoch sa systematicky pokračuje.

Najstaršie známe pozemské zirkóny, detritické zrná pochádzajúce z kvarcitu v západnej Austrálii, boli tiež analyzované iónovou mikrosondou a získané údaje ležia medzi 4,1 – 4,4 miliardami rokov. Nenašli sa horniny, z ktorých tieto zrná pochádzajú, ale zirkóny indikujú, že kôra v tom čase bola pravdepodobne kremťavá. V 60. a 70. rokoch Rb-Sr geochronologické údaje naznačovali, že horniny v Grónsku sú staré až 3,8 miliardy rokov. Od tohto času, U-Pb geochronológia, hlavne využitím špeciálnej iónovej mikrosondy (SHRIMP) potvrdila ich vek – získané údaje sú staré až 3,9 miliardy rokov. Okrem toho boli identifikované oblasti, s horninami staršími než 3,8 miliárd rokov, ktorých vek bol určený až na 4,03 miliardy rokov.

Najranejšiu časť zemskej histórie je ťažko možné rozlíšiť, pretože z tohto obdobia sa zachovalo, resp. našlo veľmi málo hornín. Výskum pokračuje v hľadaní fragmentov hornín starších ako 4 miliardy rokov. Zirkóny zo starých archaických hornín sú často charakteristické svojou zložitou, dedením starších fáz, rekryštalizáciou a mladšími nárastami, čo vyžaduje vysokú citlivosť iónovej sondy na rozlíšenie rozdielnych komponentov minerálu.

Geochronológia tiež revolucionizovala naše pochopenie rastu a architektúru kontinentov. V 60. rokoch P. Hurlay a jeho skupina poukázali na možnosti mapovať kontinenty Rb-Sr a K-Ar metódou a odvtedy existujú tisíce Rb-Sr a ^{40}Ar / ^{39}Ar datovaní kontinentálnych hornín. Distribúcia vekovo rozdielnych hornín sa môže použiť na štúdium rastu kontinentálnej litosféry v dávnej minulosti a hranice medzi vekovo rozdielnymi provinciami môžu viesť ku rekonštrukcii starých plátní. Pretože najstaršia oceánická litosféra má približne 200 miliónov rokov, jediným vodítkom ako určiť konfiguráciu kontinentov v minulosti je zložiť ich z fragmentov, ktoré sa zachovali dodnes.

Integrácia geochronológie, stratigrafie a paleontológie revolucionizovala naše poznanie o distribúcii času v horninovom zázname, o rýchlosti udalostí vymierania a rýchlosti živočíšnej a ľudskej evolúcie. Ak nájdeme vulkanické horniny medzi sedimentami obsahujúcimi skameneliny, môžeme hodnotiť rýchlosť evolúcie. Napríklad, časový limit pre explóziu živočíšneho sveta s tvrdými (kalcifikovanými) časťami tela, ktorá sa odohrala v spodnom kambriu je dnes obmedzený na 10 miliónov rokov. Trilobitové zóny stredného a vrchného kambria (pred cca 510 – 490 mil. rokmi), ako sa dnes ukázalo, mali trvanie 1,5 milióna rokov.

Vymretie živočíchov a ich následné objavenie zohralo dôležitú úlohu v evolúcii života na tejto planéte. Poznáme najmenej 5 hlavných výhynov za posledných 500 mil. rokov, ale iba teraz začíname chápať načasovanie a trvanie týchto udalostí. Napríklad, po najväčšom výhyne v histórii života na Zemi na konci permu (približne pred 251 mil. rokmi), sa odohrala najväčšia reorganizácia života, po ktorej sa rozšírili cicavce a dinosauři. Navrhuje sa množstvo mechanizmov na vysvetlenie tejto udalosti, vrátane impaktov,

mobility oceánov, obrovských vulkanických erupcií. Paul Renne použil vysoko citlivú ^{40}Ar / ^{39}Ar metódu, aby dokázal, že erupcia sibírskeho čadičového výlevu a výhyn sa odohrali v tom istom čase, hoci kauzálnu súvislosť týchto dvoch udalostí nemožno potvrdiť. Nová štúdia autora a jeho kolegov na zirkónoch ukazuje, že vymretie sa odohralo v priebehu 1 mil. rokov. Podobne sa ukazuje, že vymretie na konci kriedy (pred 65 mil. rokmi), o ktorom sa všeobecne predpokladá, že je príčinou zániku dinosaurov koinciduje s vekom impaktných vyvrhnutí, vrátane impaktných skiel a zirkónov, v ktorých bol kompletne vymazaný predchádzajúci izotopový záznam šokovou metamorfózou. Vysoko citlivá ^{40}Ar / ^{39}Ar geochronológia spôsobila tiež zásadný prevrat v chápaní evolučnej rýchlosti vývoja človeka.

Za posledných 50 rokov geochronológia zašla ďaleko a jej potenciál na nové aplikácie a inovácie v budúcnosti je obrovský. Určenie rýchlosti geologických a biologických procesov je rozhodujúce pre pochopenie fungovania planéty v rozličných časových intervaloch a bude viesť výskum k novým, lepším a presnejším geochronologickým aplikáciám.

Doteraz sme sa prednostne venovali iba jednej časti izotopových metód, ktoré na datovanie využívajú nahromadenie (akumuláciu) dcérskych, t. j. rádioaktívnych izotopov po rádioaktívnom rozpade materských prvkov. Existuje značné množstvo izotopových metód, ktoré sú založené na opačnom princípe – na znižovaní intenzity rádioaktívneho žiarenia (t. j. na znižovaní množstva rádioaktívnych atómov) v priebehu času. Najznámejšou z týchto metód je metóda ^{14}C , aj v širokej verejnosti známa ako metóda rádiouhlíka, ktorá je dnes základnou metódou v archeológii. Aj keď je mimo záujmu geológov, pretože je schopná merať čas len do 50 – 70 tisíc rokov, použijeme ju ako príklad, lebo koncept je všeobecne platný na datovanie vekovo rozdielnych udalostí pomocou rôznych rádioaktívnych prvkov nielen v pozemských, ale aj mimozemských horninách a v súčasnosti sa začína uplatňovať aj na datovanie vekov najstarších hviezd



Obr. 4: Prvý geológ na Mesiaci H. Schmitt skúma veľký balvan vyvrhnutý impaktom z inej časti mesačného povrchu. Foto NASA.

v našej galaxii.

Pozemský uhlík je zložený z troch izotopov. Dva z nich ^{12}C , ^{13}C sú stabilné (vznikli v hviezdotočivých procesoch), ale ^{14}C vzniká v atmosfére pod vplyvom kozmického žiarenia z atómov dusíka (^{14}N). Je rádioaktívny a polčas jeho rozpadu je 5 730 rokov. Ako CO_2 vstupuje do organického cyklu a dostáva sa do každej živej hmoty. Aj z tohto dôvodu sú naše telá slabé rádioaktívne žiariče. Počas života organická



hmota udržuje prirodzenú rovnováhu s atmosférickým uhlíkom. Po odumretí organickej hmoty je cyklus uhlíka definitívne prerušený a aktivita rádioaktívneho uhlíka sa začína znižovať. Ak vieme, aká bola pôvodná aktivita ^{14}C počas života a zistíme skutočnú aktivitu v meranej vzorke, môžeme vypočítať čas, ktorý uplynul od odumretia rastliny či organizmu.

Rádioaktívny uhlík nie je jediný izotop v prírode, ktorý vzniká pôsobením kozmického žiarenia v atmosfére. Izotopy vodíka ^3H , hélia ^3He , berýlia ^{10}Be , sodíka ^{22}Na , chlóru ^{36}Cl a iných prvkov sa dnes používajú na určovanie vekov podzemných vôd, pevninských ľadovcov, pôd, rýchlosti zvetrávania povrchových hornín a i.

Zdanlivo by sa mohlo zdať, že veľké finančné prostriedky vynakladané na pokrok v technológiách na riešenie takýchto „akademických“ otázok nemôžu mať v podstate praktický význam. Aplikované možnosti izotopových technológií sú obrovské a mnohé z nich takýto význam majú. Spomenieme iba tri z nich, veľmi rozdielne svojimi princípmi i aplikačným dosahom.

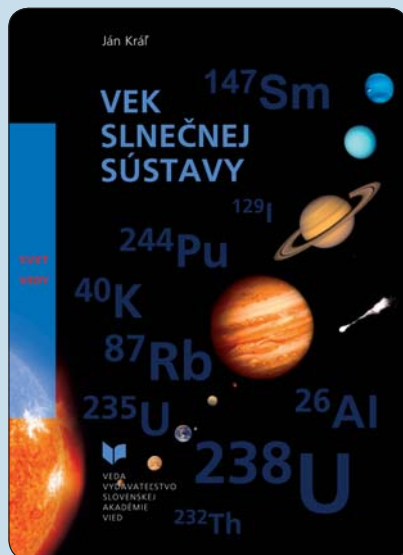
Po predchádzajúcom texte o veku Zeme a veku geologických procesov je teraz príležitosť na to, aby sme ukázali, ako riešenie výsostne odborných, síce veľmi zaujímavých, ale na prvý pohľad úplne nepraktických problémov, môže ovplyvniť bežný, každodenný život a v tomto konkrétnom prípade priamo zdravie ľudí.

Úspešnosť prelomovej práce C. Pattersona o veku Zeme závisela hlavne na zvládnutí meraní izotopových pomerov olova s potrebnou presnosťou. V tých časoch to bola značná technologická výzva, ktorá sa dotýkala nielen vlastných meraní, ale aj odberu a hlavne čistoty prípravy vzoriek na taký druh analýz. Bolo napr. potrebné zaručiť, že veľmi nízke obsahy olova vo vzorkách meteoritov nebudú kontaminované bežným pozemským olovom. Patterson urobil veľké množstvo práce, aby si bol istý, že olovo, ktoré meria, je skutočne olovom z meteoritov. Procedúry postupu, ktoré vypracoval a nakoniec výsledky jeho práce predstavujú milník, ktorý ovplyvnil budúce bádateľské smery geochemikov, geológov, planetológov, astronómov i kozmológov. A – úplne prakticky – aj zdravie budúcich ľudských pokolení.

C. Patterson sa ale po tomto vedeckom úspechu začal venovať úplne iným, pozemským problémom. Technologicky dokonale pripravený na chemické a izotopové analýzy olova začal skúmať obsahy a izotopové zloženie olova nielen v pozemských horninách, ale aj vo vodách, arktických snehoch i v archeologických vzorkách. Začal teda systematicky zhromažďovať informácie o distribúcii olova a o pozadových hodnotách koncentrácií aj o anomálnych výskytoch v rôznych prostrediach. Zistil pozoruhodné skutočnosti. V analyzovaných vzorkách z tiel moderných ľudí sú koncentrácie olova 1 000-krát vyššie, ako v prastarých mumifikovaných telách peruánskych Indiánov. Boli to prvé informácie, ktoré poukázali na nárast koncentrácie olova v životnom prostredí spôsobený rozvojom industrializácie. Olovo je pre živé organizmy toxický kov a také koncentrácie už môžu ohrozovať zdravie ľudskej populácie. Jeden z jeho názorov, vtedy považovaný za kontroverzný, bol, že dovtedy používané analytické metódy nie sú schopné rozlíšiť prírodné pozadové koncentrácie od antropogénneho

Vek slnečnej sústavy

Túžby ľudí o spoznanie veku Zeme a slnečnej sústavy sú doložené už v najstarších písomnostiach, vznikajúcich na úsvite modernej ľudskej civilizácie. Prírodovedci si po stáročia dávali mnoho otázok. Aké staré je Slnko? Aká stará je Zem? Aké staré sú kontinenty? Aké staré sú vyvreté a premenené horniny, ktoré ich budujú? Aké staré sú oceány? Aké staré sú sedimentárne horniny, obsahujúce fascinujúce skameneliny prvých trilobitov, rýb, vtákov a dinosaurov? Aký bol vek pozemských kaskád, po ktorých sa v globálnom meradle kompletne menil charakter fauny? Na tieto otázky nebolo odpovedí, aj napriek mnohým pokusom nájsť spôsob, ako merať čas. Až do konca XIX. storočia sa taký chronometer, ktorý by spoľahlivo tikal a presne odpočítaval čas do hlbkej minulosti Zeme, nenašiel. Objav rádioaktivity v roku 1896 takú možnosť poskytol. Na začiatku XX. storočia došlo k zásadným objavom, ktoré po mnohých rokoch dali pevné základy novej vednej disciplíny – izotopovej geochronológii, ktorá využíva rádioaktívny rozpad niektorých prvkov na určovanie veku pozemských i mimozemských hornín a minerálov. V priebehu vývoja táto novovznikajúca veda prežila svoje pády i víťazstvá, úplné zatracovanie i povyšovanie na neotrasiteľný piedestál. Vďaka veľkému spoločnému úsiliu chemikov, fyzikov, elektrotechnikov a, prirodzene, geológov a geochemikov izotopová geochronológia mimoriadne rýchlo dozrieva a postupne skladá čoraz presnejšiu časovú súsladnosť procesov odohrávajúcich sa nielen pri vzniku a následnom vývoji Zeme, ale aj iných telies slnečnej sústavy.



Kniha Jána Kráľa *Vek slnečnej sústavy* je venovaná najstaršej histórii Zeme a iných telies slnečnej sústavy. Svojou hlavnou témou je kniha sústredená na vznik a vývoj metód, ktoré umožňujú merať čas v obrovskej časovej škále miliónov a miliárd rokov, a na poznatky o veku sveta v ktorom žijeme, získané za posledné desaťročia.

nárastu. Ako nekompromisný človek a vysoko erudovaný odborník okamžite informoval o týchto skutočnostiach štátne i priemyselné organizácie a za svoje aktivity spočiatku zožal nekompromisnú kritiku.

Nepodľahol a neskorší vývoj mu dal za pravdu. Obmedzenie použitia olova v rôznych priemyselných technológiách, pri výrobe farieb, v konzervárskom priemysle, odstránenie olovených potrubí na rozvod vody a najmä výroba bezolovnatého benzínu je výsledkom, ktorý iniciovali jeho práce, pochopenie súvislostí a environmentálnych vízií. Za túto mimoriadnu prácu bol ocenený Tylerovou cenou (1995), ktorá je najvyššou svetovou vedeckou poctou za mimoriadny vklad v riešení environmentálnych problémov.

Druhý príklad je úplne z inej oblasti. Produkcia vína a jeho predaj má veľký a stále vzrastajúci ekonomický význam pre mnoho štátov. Tak, ako sa zvyšuje produkcia rastie i počet pokusov o zvyšovanie produkcie vín rôznymi nelegálnymi spôsobmi. Preto záruka, že importované, či exportované víno pochádza z deklarovanej oblasti a že napr. nie je zmesou menej kvalitných vín z rôznych oblastí, má veľký ekonomický význam. Doteraz používané analytické metódy na kontrolu pôvodu vína (napr. koncentrácie stopových prvkov) nie sú dostatočne citlivé a často nie sú schopné poskytnúť jednoznačné výsledky. Nevýhodou merania pomerov stabilných izotopov kyslíka, uhlíka a vodíka je hlavne ich hmotnostná frakcionácia v geologickom a biologickom cykle a ich sezónne výkyvy. Preto sa hľadali ďalšie metódy schopné určiť pôvod vína jednoznačnejšie. Od roku 1992 sa začali rozpracovávať metodiky založené na meraní izotopového zloženia stroncia, ktoré sa ako stopový prvok vo vínach nachádza. Ukazuje sa, že je to metóda veľmi citlivá, potenciálne zaručujúca jednoznačnú odpoveď. Prečo je to tak?

Prírodné stroncium (Sr) má 4 izotopy o atómových hmotnostiach 84, 86, 87, 88. Pokiaľ množstvo atómov izotopov 84, 86, 88 je v horninách konštantné, počet atómov izotopu 87 v priebehu času neustále rastie, pretože tento izotop v prírode vzniká rádioaktívnou premenou izotopu rubídia (Rb) o hmotnosti 87. Z toho teda vyplýva, že horniny rôzneho veku, s rozdielnymi koncentraciami rubídia a stroncia budú mať dnešné izotopové pomery $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ rozdielne. Vinohrady v rozdielnych oblastiach sú založené na rôznych druhoch pôd, ktoré vznikli zvetrávaním pôvodných hornín rôzneho veku: žúl, metamorfítov, vápencov, vulkanitov, sedimentov. Preto tieto horniny majú charakteristické geochemické rozdiely a veľké rozdiely i v spomínanom izotopovom zložení stroncia. Pritom prestup výživných látok z pôdy do koreňov vinnej révy a do plodov pôvodné izotopové zloženie Sr v pôdach nemení. Takto izotopové zloženie stroncia v konečnom produkte – víne, jednoznačne indikuje oblasť, z ktorej pochádza. Izotopové pomery stroncia vo vínach z rôznych oblastí môžu byť veľmi presne definované, pretože očakávané rozdiely sú omnoho väčšie než presnosť izotopových meraní. Na túto tému už bolo publikovaných veľa prác, ktoré potvrdzujú výrazný komerčný potenciál metódy.

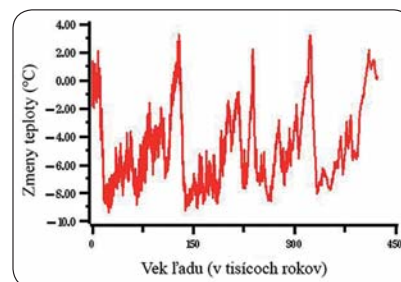
Izotopové pomery ľahkých stabilných izotopov (^1H , ^2H , ^{12}C , ^{13}C , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , ^{32}S , ^{34}S) majú variabilitu väčšiu. Je to spôsobené tým, že medzi týmito izotopmi sú veľké rozdiely v ich atómových hmotnostiach. Napríklad izotop vodíka ^2H (deutérium) je dvakrát ťažší ako ľahší vodík ^1H (próciem). Ak sa spoja do molekúl vody s tromi izotopmi kyslíka a tromi izotopmi vodíka, môžu vytvoriť až 12 kombinácií molekúl vody



o rôznej hmotnosti. Ťažšie izotopy vytvárajú silnejšie chemické väzby a ťažšie vstupujú do fyzikálno-chemických (i biologických) reakcií. Výsledkom je zmena pôvodného izotopového zloženia na iné. Efektivita tohto javu, (izotopovej) hmotnostnej frakcionácie je nepriamo úmerná teplote – vysoké teploty znižujú jej veľkosť. Aj keď si prítomnosť takýchto procesov v bežnom živote ani neuvedomujeme, odohrávajú sa denne mimo našej pozornosti. Vriaca voda, ktorou si zalievame raňajšiu kávu či čaj, má už iné izotopové zloženie ako pôvodná studená. Pri zohrievaní vody sa do pary dostáva viac ľahkých molekúl vody, ktoré sú tvorené ľahkým izotopom kyslíka (^{16}O), a tým sa zvyšok obohacuje o ťažšie molekuly tvorené izotopom ^{18}O . Pravdu povediac, tento proces je v uvedenom prípade málo účinný, ale ak sa viacnásobne opakuje, alebo dlho trvá, môže viesť k pozorovateľným zmenám (k takým, ktoré v súčasnosti možno analyticky odmerať). Príroda má času dosť a bežne takéto rozdiely vytvára. Žijúce organizmy spôsobujú frakcionáciu izotopov veľmi efektívne. Na svoj život z okolitého prostredia čerpajú kyslík, uhlík aj síru. V biologickom cykle uprednostňujú molekuly, zložené z ľahších izotopov – výsledkom tohto prednostného výberu je, že organizmy, resp. ich schránky majú iné izotopové zloženie ako prostredie, v ktorom žijú, resp. žili. Frakcionácia má veľa praktických i vedeckých aplikácií. Vďaka pochopeniu, ako tento proces funguje, sa napr. dala určiť teplota morí v dávnej minulosti, a to na základe zloženia izotopov kyslíka vo fosílnych schránkach morských organizmov, čo je dodnes jeden

z mimoriadnych úspechov izotopovej geológie.

Nakoniec tretí príklad: kľúčom k pravde o príčinách súčasného otepľovania je dôkladné poznanie klimatických zmien v minulosti. Geologický záznam je mimoriadne cenným historickým archívom o takýchto zmenách v minulosti. Vďaka týmto záznamom sa geológom podarilo dokumentovať klimatické zmeny do hlboké minulosti Zeme. Ako sme už spomenuli v predchádzajúcom texte, mnohé z nich mali katastrofické rozmery. V dnešnej búrlivej a často emotívnej debате o príčinách súčasného otepľovania sú údaje získané štúdiom izotopového zloženia vodíka a kyslíka z antarktických, resp. grónskych ľadovcov, základnou informáciou, umožňujúcou rekonštruovať vývoj počasia v minulosti. Na stanici Vostok v Antarktíde bol do kontinentálneho ľadovca vyvrátený vrt do hĺbky 3 623 m a výskumom izotopového zloženia vodíka, kyslíka, berylia a koncentrácie CO_2 vo vzorkách ľadu boli získané informácie o vývoji počasia a teplotných zmenách za posledných 420 000 rokov (obr. 5). Zmeny izotopového zloženia vodíka a kyslíka v čase, prepočítané na teplotu dokumentujú značnú variabilitu teploty na tomto mieste aj v čase, keď na Zemi ešte nebol človek ani industriálna spoločnosť. Pre geológov to nie je prekvapujúcim faktom, preto pri hľadaní príčin súčasného otepľovania je rozhodne potrebné brať takéto informácie do úvahy. Zem so svojou atmosférou, hydrosférou a biosférou (a litosférou) predstavuje veľmi zložitý systém, ktorý nemožno jednoducho vtesnať do zjednodušujúcich predstáv, podporovaných počítačovými modelmi. Problém je omnoho zložitejší, než sa na prvý



Obr. 5: Zmeny teploty v priebehu času 420 tisíc rokov na stanici Vostok, Antarktída ($78^\circ 28'$ j.š., $106^\circ 48'$ v. d.). Teploty boli vypočítané na základe zmien izotopového zloženia vodíka a kyslíka získaných zo vzoriek kontinentálneho ľadovca. Teplotné zmeny sú vyjadrené relatívne k súčasnej priemernej teplote na stanici $-55,5^\circ\text{C}$. Upravené podľa: Petit, J. R., Raynaud, D., Lorius, C., Jouzel, J., Delaygue, G., Barkov, N.I. and Kotlyakov, V.M. 2000: *Historical isotopic temperature record from the Vostok ice core*. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.*

pohľad zdá. Prv, než sa nájde vinník za súčasné globálne otepľovanie (mnoho optimistov si myslí, že sa už našiel), je potrebné pochopiť interakcie a kauzálne vzťahy v tomto zložitom systéme. A v týchto štúdiách izotopové výskumy už dnes zohrávajú a budú zohrávať dôležitú a nezastupiteľnú úlohu.

RNDr. Ján Král, CSc.

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra Bratislava

Ožili spomienky aj vzťahy



Senióri v Žiarskej chate (foto: Ing. Ivan Rybár)

Raz v roku, a to už pravidelne počas posledného septembrového štvrtka a piatku, sa na dohodnutom mieste stretávajú senióri ochrany prírody od 50 rokov. Sú to teda nielen zaslúžilí dôchodcovia, ale aj ešte aktívne pôsobiaci zamestnanci v rôznych odboroch a pracoviskách Štátnej ochrany prírody SR. Stretnutie sa aj v roku 2008 zorganizovalo a uskutočnilo v západnej časti TANAP-u, známej ako Roháčce, a to v Žiarskej doline, v obnovej, teraz už dvojpodlažnej, Žiarskej chate.

Z viac než 80 pozvaných seniorov sa stretnutia zúčastnilo 65 členov klubu, čo je v porovnaní s minulosťou pozoruhodný nárast a nateraz aj rekord. Tí niekedy, ktorí chceli prísť, ale pre pracovné či zdravotné príčiny sa osobne nezúčastnili, sa organizátorom ospravedlnili, dokonca niektorí aj prostredníctvom videozáznamu. Treba pripo-

meniť, že podstatná časť organizačných starostí bola na „pleciach“ Slovenského múzea ochrany prírody a jaskyniarstva.

Hneď po otvorení stretnutia si účastníci chvíľu ticho uctili pamiatku kolegov, ktorí ešte pred rokom boli medzi nami. Nasledovali príhovory tých najviac zapojených na tomto stretnutí – Ing. V. Stockmanna, Ing. J. Burkovského, Dr. D. Šubovej. K slovu sa dostal aj niekdajší vedúci projektového tímu CHKO Západné Tatry Dr. J. Blaško. Táto CHKO však bola neskôr priradená k TANAP-u ako jeho ochranné pásmo, neskôr ako jeho plnohodnotná súčasť.

Jeden zo zamestnancov Správy TANAP-u vo funkcii strážcu západnej časti územia oboznámil prítomných s osobitosťami Žiarskej doliny – raja kamzíkov, svišfov aj skialpinistov – na krásnej širokouhlej nástennej farebnej fotoreprodukcii veľkej zhruba 250×50 cm v interiéri chaty a prostredníctvom ďalších fotografií. Videli sme panorámy, polodetaily aj detaily letnej aj zimnej krajiny a prírody. Fotozábery, najmä panorámy, boli nasnímané za výberového snežného počasia pod krásnou modrou oblohou so znamenitou viditeľnosťou. Po takom oboznámení sa s jedinečnosťou Roháčov – od vrcholov, hrebeňov, stien, sediel, žľabov, úbočí, dolín – nastal čas pre voľný program. Popri občerstvení sme všetci využili pohodu pre debaty v krúžkoch, a to od spomienok na niekdajšiu spoluprácu, rôzne problémy a príhody a aj úspechy, až po súčasnú situáciu.

Väčšina účastníkov na druhý deň využila celkom príjemné počasie na pešiu túru hore Žiarskou dolinou cez Prostredný grúň do Smutného sedla. Tí zdatnejší pokračovali severnými chodníkmi až po Zverovku.

Nasledujúce stretnutie v roku 2009 sa uskutoční v oblasti Pieninského národného parku. Je teda dôvod tešiť sa na „do videnia“.

RNDr. Ján Kleinert, CSc.

OZ Ekotrend B. Bystrica



Šarafiový vodopád v Žiarskej doline (foto: Ing. Ivan Rybár)

