

Stabilní izotopy a bioarcheologie – výživa a sledování migrací v populacích minulosti (1)

Archeologové často diskutují o pohybu obyvatel na určitém území, spolu s antropology uvažují také o výživě lidí v minulosti a ve spolupráci s archeozoology a archeobotaniky sledují spektrum biologických druhů, které daná společnost využívala především ke své obživě. Avšak základní argumenty těchto oborů se opírají o nepřímé svědectví kulturních předmětů, jako jsou kamenné a kovové nástroje, keramika, v nejlepší případě pak jde o morfologii kostí a zubů. V posledních desetiletích proniká do archeologických disciplín nová technika založená na studiu přímých svědků aktivit člověka i zvířat z období bez písemných svědectví. Touto technikou je studium kvantitativních poměrů obsahu přirozených izotopů obsažených v jejich tkáních. Většina prvků se totiž v přírodě vyskytuje v různých formách, kterým říkáme izotopy.

Studium izotopů

Přirozené izotopy se využívají už řadu let v různých odvětvích od biologie a lékařství přes studium životního prostředí a kontrolu kvality potravin a léků až k ryze technickým aplikacím. Jejich primární výhodou je naprostá neškodnost člověku i prostředí, protože nejsou radioaktivní a jak jejich název napovídá, vyskytují se přirozeně v přírodě. Uvedme namátkou několik příkladů jejich využití.

V lékařské diagnostice se pacientům podávají sloučeniny stabilních izotopů a sleduje se jejich distribuce či metabolity ve vydýchaném vzduchu nebo v tělesných tekutinách. Nejznámější technikou při studiu lidské patologie jsou dechové testy, při kterých se podává produkt označený stabilním izotopem uhlíku. Využívá se také při diagnostice infekce bakterií

Helicobacter pylori v gastroenterologii. Široké použití mají přirozené izotopy lehkých prvků při poznání a sledování pohybu divokých zvířat, zejména migrací ptáků. Nejde o mediálně přitažlivé až romanticky vypadající sledování tahů a individuálních osudů ptačích jednotlivců pomocí radiové a satelitní techniky na principu telemetrie, nýbrž o metody biogeochemické analýzy izotopů, které jsou vhodnější pro sledování migrací na velké vzdálenosti, u druhů s malou tělesnou hmotností a především použitelné u velkého počtu jedinců či celých populací. V biologických vědách existuje nepřeberné množství prací zaměřených na stabilní izotopy a ekologii potravního řetězce u jednotlivých skupin organismů či druhů (Thompson a kol. 2005). Poznání složení potravy pomocí stabilních izotopů se týká

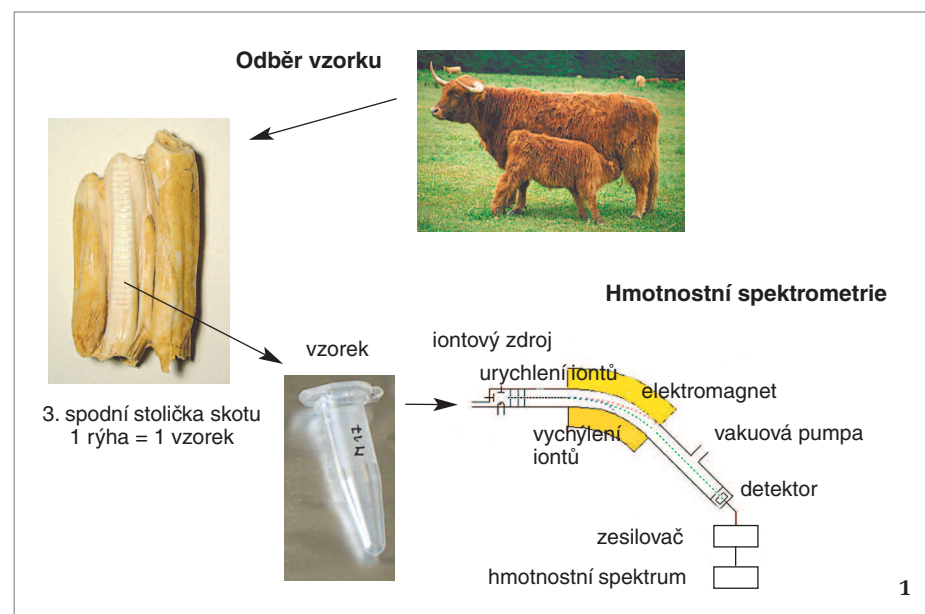
jak jednotlivých etap ontogeneze různých žijících živočišných druhů, tak i potravního chování druhů vymřelých.

Celá řada aplikací má ryze praktické uplatnění. Pomocí stabilních izotopů můžeme poznat, zda jde o zvíře odchycené v přírodě, či odchované v zajetí. Potvrzení falzifikace původu potravin je rovněž společensky závažnou problematikou a stabilní izotopy jsou průkazným svědectvím takových praktik, které se s globalizací trhů a snadností přepravy komodit vyskytují stále častěji. Značná pozornost se věnuje např. původu vína. Pro autory detektivních příběhů se nabízí inspirace ze sledování pohybu lidí na větší geografické vzdálenosti pomocí stabilních izotopů kyslíku a vodíku ve vlasech, vousech a v moči. Rozdílný izotopický profil pitné vody se projeví v poměru stabilních izotopů vodíku a kyslíku a vykázané změny mohou mít uplatnění v soudním lékařství a kriminalistice. Neznámou oběť úspěšně identifikovali němečtí specialisté pomocí rozdílného poměru stabilních izotopů stroncia mezi střední a východní Evropou (Rauch a kol. 2007). Jiná forenzní aplikace umožňuje určit původ slonoviny, endo- či exogenní původ testosteronu při doping sportovců nebo původ fosilních paliv (Benson a kol. 2006). Všechny uvedené příklady se týkají současnosti. Existuje ale i řada jiných aplikací v oborech, kde analýza stabilních izotopů pomáhá upřesnit či dokonce nalézt vhodnou odpověď na otázky, které by zřejmě jinak zůstaly nezodpovězeny. Mezi ně patří i bioarcheologie.

Co jsou stabilní a nestabilní izotopy

Souborům atomů, které mají stejné protonové, nukleonové a neutronové číslo, říkáme nuklidy (např. $^{16}_8\text{O}$). Většina chemických prvků se shoduje v počtu protonů (protonové číslo), ale navzájem se liší v počtu neutronů (nukleonové číslo) obsažených v atomovém jádře. Takovéto nuklidy příslušející témuž prvku označujeme jako izotopické nuklidy, jednodušeji izotopy. U jednoho prvku tedy může jít o směsici několika izotopů, nejčastěji v počtu 1–4. Např. prvek síra je tvořen třemi izotopy: $^{32}_{16}\text{S}$ (95 %), $^{33}_{16}\text{S}$ (0,75 %) a $^{34}_{16}\text{S}$ (4,2 %), kdy údaje v závorkách vyjadřují relativní procentuální zastoupení příslušného izotopického nuklidu v prostředí. Izotopy téhož prvku se vzájemně liší relativní atomovou hmotností a samozřejmě výsledně ovlivňují konečnou relativní hmotnost celého prvku.

V přírodě se přirozeně vyskytuje 329 nuklidů, z toho 273 je stabilních a 56 radioaktivních. Řada izotopických nuklidů se vyrábí také uměle. Jeden prvek může obsahovat jak izotopy stabilní, tak i ty nestabilní, u nichž známe poločas rozpadu. Jedním z příkladů takovéto kombinace je uhlík, kdy $^{14}_6\text{C}$ je nestabilním izotopem s poločasem rozpadu 5 730 let a hojně se uplatňuje v archeologii při radiokarbonovém datování, naopak $^{12}_6\text{C}$ (98,9 %) a $^{13}_6\text{C}$ (1,1 %) rozpadu nepodléhají a jejich relativní zastoupení se jeví víceméně jako konstantní. Drobné rozdíly v obsahu izo-



1 Odběr vzorků z bioapatitu zubní skloviny a jejich měření. Orig. L. Kovačiková

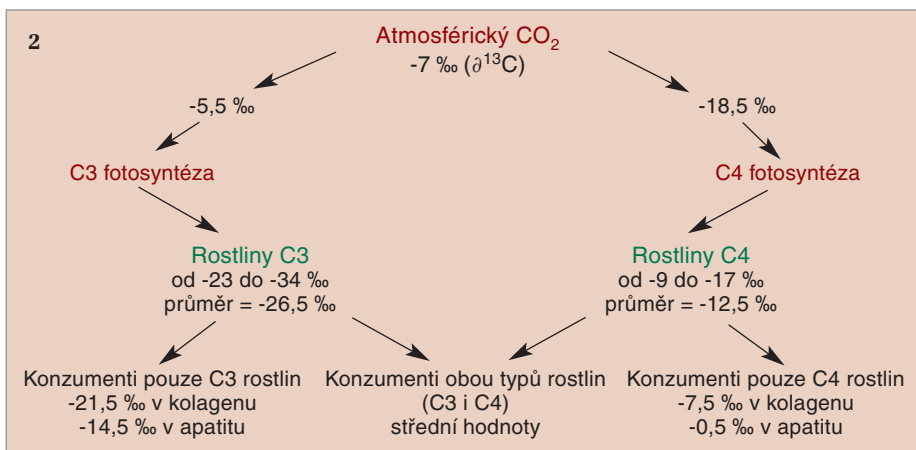
topů (v jejich vzájemném poměru), které se vyskytují v přírodním prostředí (v organismech i v produktech zemědělské nebo průmyslové produkce) jsme schopni odhalit a měřit. Tyto rozdíly totiž závisí na původu látky, jejímž prostřednictvím izotopy vstoupily nebo vstupují do chemických reakcí. Rozdílné vnější podmínky (např. změny tlaku či teploty) v průběhu těchto reakcí mohou způsobit měřitelné změny v izotopovém složení stabilních izotopů prvků. Studium změn v izotopovém signálu nám dovoluje získávat jasnější informace o řadě procesů provázejících život organismů.

Cyklus izotopů v přírodě

Rozdíly v izotopovém složení prvků jsou odrazem platného tvrzení, že všechny organismy jsou částí komplexu, za který lze považovat globální geochemický cyklus (koloběh dusíku, vody, uhlíku aj.) s jejich zákonitostmi, mechanismy a posloupností dílčích procesů. Koncentrace izotopů ukládaných během života v zubech a kostech lidí a zvířat nás informují o klimatu i o postavení organismů v potravních řetězcích, a to prostřednictvím obsahu izotopů, který se zvyšuje na každé trofické úrovni o 2 až 3 promile (např. konzumenti 1. řádu – býložravci – mají jiné hodnoty než konzumenti 2. řádu – masožravci či hmyzožravci). Získáme tak přímé údaje o jejich výživě.

Základní informace o biologické části uhlíkového cyklu přináší poměr stabilních nuklidů uhlíku ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, viz obr. 2). Výše spotřeby ^{13}C přijímaného rostlinami ve formě CO_2 podléhá typu fotosyntetické reakce, která se liší stupněm jeho využití. V jednom případě je při fotosyntéze prvním stabilním produktem kyselina 3-fosfoglycerová se třemi atomy uhlíku, proto rostliny s tímto typem reakce nazýváme C3 rostliny. V druhém případě je prvním produktem fotosyntézy kyselina oxaloctová se čtyřmi atomy uhlíku, odtud C4 rostliny. Výhodou C4 rostlin je, že dokáží CO_2 vznikající při metabolismu vícenásobně zapojit do fotosyntetické reakce. Při stejném množství CO_2 , které by přijaly C3 rostliny na jednu reakci, dokáží vyprodukovat více sušiny, jsou lépe adaptované suššímu prostředí. Mezi C3 rostliny patří většina stromů a keřů, některé obilniny, traviny aj., tedy většina rostlin mírného klimatického pásu. Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ (množství sledovaného izotopu, viz dále) dosahují podle M. H. O'Learyho (1988) rozpětí od -23 do -34 promile. Pro C4 rostliny (např. kukuřice, proso, čirok nebo cukrová třtina, ananas aj.), resp. rostliny dlouhodobě suššího prostředí stanovil O'Leary interval hodnot $\delta^{13}\text{C}$ od -9 do -17 promile.

Kromě jídelníčku hledají bioarcheologové odpovědi na otázky týkající se migrace lidí a stád, kde jsou získané informace výsledkem rozdílu izotopového profilu zubů a kostí jedince a daného místa, v němž se v různých dobách svého života nalézal. Každé geografické oblasti je totiž vlastní určitá geochemická charakteristika, která odpovídá obsahu stabilních izotopů různých prvků obsažených v horninách, z nichž se zvětváváním dostávají do půdy a do vody a poté do rostlinné potravy v poměru typickém pro dané území.



Zuby mineralizují v raných etapách ontogeneze, u člověka v prvních letech života, a obsah stabilních izotopů získaný během růstu a utváření dentice zůstává v zubních tkáních zachován po celý život. Naproti tomu kostra uchovává izotopový profil, který odpovídá posledním několika rokům života. Existuje-li např. rozdíl v poměru stabilních izotopů území, kde se jedinec narodil, a území, kde zemřel, můžeme uvažovat o jeho migraci. Určit však místo, odkud přišel, či vzdálenost, která dělí místo prožitého dětství od místa, kde byl pohřben, je velmi obtížné, až nemožné.

Měření obsahu stabilních izotopů v biologickém materiálu

Až na výjimky v podobě zmrzlých, vysušených či mumifikovaných měkkých tkání má archeologie a jí podobné retrospektivní vědy k dispozici pouze kosti či zuby zvířat a lidí, kteří žili v dávné či nedávné minulosti. Kost obsahuje dvě frakce či komponenty – minerální (70 %) a organickou (30 %). Sklovina zubu je naproti tomu tvořena z 97 % minerální frakci, organickou složku z ní nezískáme. V dentinu převažuje minerální složka (75 %) nad organickou (25 %). Organickou složku kostí i zubů představuje kolagen (bílkovinná jednotka mnoha forem), minerální frakci tvoří především hydroxyapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). Jeho OH^- skupinu mohou nahrazovat jiné prvky, které jsou základem kostí a zubního minerálu. Na vláknech kolagenu krystalizuje hydroxyapatit (bioapatit). Obě struktury jsou dohromady velice pevné.

Izotopová analýza je metodou destruktivní, protože odebraný vzorek z kolagenu nebo hydroxyapatitu kosti či zubu na konci analytické procedury nenávratně ztrácíme (obr. 1). Přesto lze tvrdit, že množství odebrané látky je takřka stopové. Pro stanovení izotopu kyslíku v hydroxyapatitu ve sklovině zubu stačí pouhých 50 mg vzorku, kolagenu se většinou odebírá dvojnásobek (100 mg).

V laboratoři se nejprve stáváme svědky přípravné fáze. Během ní je vzorek z kostní tkáně čištěn pomocí brusné jehly s diamantovým povrchem a posléze upravován v navazující několikadenní chemické fázi. Ta se odlišuje podle toho, zda pracujeme s kolagenem nebo hydroxyapatitem, podléhá také druhu izotopu, který stanovujeme. Po chemické úpravě je příslušný poměr nuklidů určen hmotnostní spektrometrií

2 Množství izotopu ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) v potravním řetězci v závislosti na způsobu fixace atmosférického CO_2 při fotosyntetické reakci. Upraveno podle R. H. Tykota (2004)

(díky této metodě byla existence izotopů objevena). Princip této techniky spočívá v tom, že jakákoli látka obsažená ve vzorku se nejdříve ve vaku ionizuje, ionizované částice se oddělují a podle svých rozdílných hmotností se detekují při průchodu elektrickým/magnetickým polem. Množství sledovaného izotopu (δ) se vyjadřuje v promile a kromě podílu dvojice izotopů zjištěných ve vzorku spektrometricky potřebujeme znát ještě podíl těchto izotopů ve standardu. To je důležité proto, že změny poměru izotopů jsou minimální a vyjadřuje se jejich relativní změna. Standardy pro různé izotopy se liší, např. pro nuklidy kyslíku $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ je to průměrná hodnota oceánské vody (tzv. SMOW standard – Standard Mean Ocean Water), pro izotopy dusíku $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ se jako standard používá atmosférický dusík, pro izotopy uhlíku $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ i kyslíku fosilní mořský vápenc z Pee Dee formace v Jižní Karolině (tzv. PDB standard – Pee Dee Belemnite), pro síru trolit (FeS) z meteoritu Canyon Diablo atd.

Množství izotopu využívaného při srovnávání výsledků vychází z jednotného matematického vztahu (zde aplikováno na kyslík): $\delta^{18}\text{O}$ (promile) = $\left(\frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ vzorku}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ standardu}} - 1\right) \times 1000$. Jde tedy o podíl množství izotopů ^{18}O a ^{16}O stanovených ve vzorku ve vztahu k množství izotopů ^{18}O a ^{16}O obsažených ve standardu.

Použití stabilních izotopů v bioarcheologii

Stabilní izotopy se do organismu dostávají prostřednictvím výživy – pevné potravy a tekutin (voda, mateřské mléko) – a jsou postupně zabudovávány do tkáně kostí a zubů.

Mezi nuklidy (izotopy), které bioarcheology zajímají nejvíce, patří $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ a $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$. Jejich přirozenými zdroji jsou atmosféra, voda a geologický podklad, odkud vstupují do těl rostlin a živočichů a podílejí se na stavbě jejich tkání.

Uhlík

Obsah izotopu ^{13}C můžeme stanovit jak z kolagenu, tak z bioapatitu. Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$

jsou nejčastěji negativní čísla v rozmezí od -30 do -10 promile. V extrémních případech konzumentů tropických trav nabývají až kladných hodnot (obr. 2).

Variace hodnot závisí nejen na pozici organismu v potravním řetězci, ale i na ekologických faktorech. Autotrofní organismy získávají uhlík z atmosféry ve formě CO₂, heterotrofní organismy z živé nebo mrtvé biomasy. Organicky vázaný uhlík je přítomen v půdách (např. humus), v pevninských i mořských sedimentech je uložen v karbonátech, v hydrosféře tvoří uhličitanové a hydrogenuhličitanové rozpustné ionty. Rozdíly v izotopovém signálu lze hledat u rostlin rostoucích ve vyšších nadmořských výškách (nad 1 000 m), které adaptací na nižší parciální tlak obohacují svá pletiva o několik promile $\delta^{13}\text{C}$ (Körner a kol. 1991). Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ jsou vyšší, jestliže se zvyšuje teplota prostředí, naopak nárůst srážek a vlhkosti stanoviště způsobují snížení záporných hodnot $\delta^{13}\text{C}$ (Van Klinken a kol. 1994). V hustých lesích byliny pod klenbou z větví stromů méně fotosyntetizují a zabývají se recyklací CO₂, proto hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ klesají směrem od bylin po stromové patro (Heaton 1999). V bioarcheologii poměr stabilních izotopů uhlíku informuje o konzumaci rostlinné potravy, o místě, které zaujímá jedinec (druh) v trofickém řetězci, o domestikaci či importu nových rostlin.

Dusík

U rostlin závisí relativní poměr $\delta^{15}\text{N}$ primárně na jeho původu. Jiné hodnoty jsou při příjmu dusíku z půdních nitrátů, jež vznikají oxidací amonického dusíku (produktu mikrobiálního rozkladu bílkovin), jiné zapojuje se symbiotické bakterie, fixátoři atmosférického dusíku se schopností redukovat ho na aminoskupinu aminokyselin. Zde jsou hodnoty $\delta^{15}\text{N}$ srovnatelné s obecně užívaným výpočtovým standardem. Svou úlohu hraje také klima, kdy např. v oblastech s velmi teplým podnebím (Sahara) jsou hodnoty $\delta^{15}\text{N}$ prokazatelně vyšší než v mírnějších pásech (Schwarcz, Dupras a Fairgrieve 1999). Podle hodnot $\delta^{15}\text{N}$ dokážeme dobře rozpoznat trofickou úroveň organismu, protože v těle každého živého organismu je dusík vázán v bílkovinách a aminokyselinách (98 %), v nukleových kyselinách a močovině. Stanovíme tak jeho pozici v potravním řetězci, kdy obecně platí, že se hodnoty $\delta^{15}\text{N}$ zvyšují o 2–3 promile na každém stupni potravní pyramidy (obr. 3). Zjednodušeně řečeno, jestliže rostliny obsahují kolem tří promile ^{15}N , pak byložravci, jejichž obživu tyto rostliny zajišťují, se dostávají na 6 promile a šelmy na rozpětí 9–10 promile. Tyto hodnoty jsou opravdu blízké číslům pro evropskou faunu, publikovaným např. M. P. Richardsem (2000). Vyšší hodnoty $\delta^{15}\text{N}$ mohou usvědčit konzumenty, jejichž zdrojem proteinů se staly sladkovodní či mořské ryby, kdy nalézáme hodnoty $\delta^{15}\text{N}$ mezi 15–20 promile. Vyšší obsah ^{15}N má mateřské mléko, proto můžeme určit věk (období) odstavení dítěte (mláďete) a přechodu na jinou stravu, což se projeví náhlým poklesem hodnot $\delta^{15}\text{N}$. Tak se lze dozvědět, zda vůbec, či jak dlouho bylo lidské nebo zvířecí mládě živeno mateřským mlékem.

Poměr $\delta^{13}\text{C}/\delta^{15}\text{N}$ rozšiřuje informaci o postavení jedince v trofickém řetězci a jeho potravě. Obr. 4 ilustruje jednotlivé skupiny konzumentů. V bioarcheologii čerpáme z poměru izotopů C a N poznatky, které by jinak zůstaly naprosto nedostupné. Týkají se nejen zmiňovaného věku odstavení dětí nebo mládat domestikovaného skotu, ale i podílu na proteiny bohaté (masité) nebo naopak rostlinné stravy prvních zemědělců, a přinášejí informace o míře jejich pěstitelské a chovatelské produkce, soběstačnosti zajistit si potravní zdroje atd.

Stroncium

Inspirací pro archeologii při sledování migrací a pohybu lidí i zvířat byly ekologické studie sledující pohyb jistých skupin volně žijících zvířat. Nejvhodnějším prvkem pro tyto účely se jeví stroncium. To se vyskytuje ve čtyřech stabilních izotopech – ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr a ^{84}Sr . Nuklid stroncia ^{87}Sr se vytváří v průběhu času rozpadem radioaktivního rubidia ^{87}Rb . V každé hornině je obsaženo tolik ^{87}Sr , kolik v ní bylo původně ^{87}Rb a jak stará je hornina. Variace obsahu izotopů stroncia v přirozených materiálech jsou konvenčně vyjadřovány poměrem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, který odpovídá přibližně geologickému stáří substrátu. Geologicky staré horniny mají poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ poměrně vyšší (kolem 0,710) než geologické jednotky velmi mladé, které ho obsahují kolem 0,704. Stroncium přechází ze substrátu do vodních zdrojů a následně je začleňováno v daném poměru, který odpovídá substrátu, do živých organismů, rostlin a živočichů. Existuje-li rozdíl v obsahu izotopů stroncia mezi oblastí, kde jedinec, zvíře či člověk žil v době mineralizace chrupu, a oblastí, kde žil v posledním období svého života, lze konstatovat změnu prostředí, migraci, pohyb či přesídlení v geografickém slova smyslu.

V některých oblastech jsou geologické podmínky obzvláště příznivé pro sledování rezidenční a jiné mobility. Jednou z nich je údolí dolního toku Rýna. Je to území široké asi 40 km a dlouhé 300 km, ve kterém byl velmi detailně studován obsah izotopů stroncia v podzemní a říční vodě. Existuje zde jistý gradient koncentrace izotopů stroncia, odpovídající na jedné straně velmi starým pohořím, jako jsou francouzské Vogézy či německý Černý les, a na druhé straně velmi mladé Alpy, coby zdroj vody Rýna. Jinými oblastmi vhodnými pro sledování mobility jsou americký Yucatán či některá místa v jižní Africe. Zvláště zajímavým regionem z hlediska obsahu stroncia, a tedy i sledování migrací, je Bavorsko. Jeho jižní část pod úrovní toku Dunaje je tvořena kvartérním substrátem spráší s obsahem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v rozsahu 0,708–0,710. Severovýchodní část směřující k Česku má žulový podklad a vykazuje poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,710–0,750. Zbytek území na sever není uniformní a obsah stroncia se pohybuje v hodnotách mezi extrémními ostatními oblastmi. Sledování poměru $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ komplikují kontaminace recentními antropogenními zásahy do prostředí a neznalost lokálního izotopového signálu. Ten je nejlépe zjištěl analyzou kosterních vzorků místní fauny stejného stáří. Nejvhodnější jsou malá domácí zvířata s krátkou

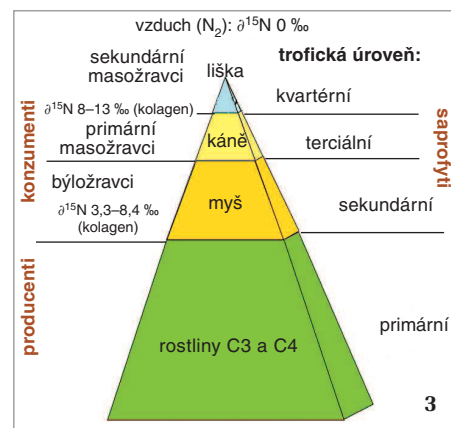
generační dobou nebo s obdobnou stravou a velikostí odpovídající člověku. Pokud však na některém území gradient poměru $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ chybí, nelze mobilitu sledovat. Změny pohybu lze vypátrat pouze mezi oblastmi s rozdílným izotopovým signálem.

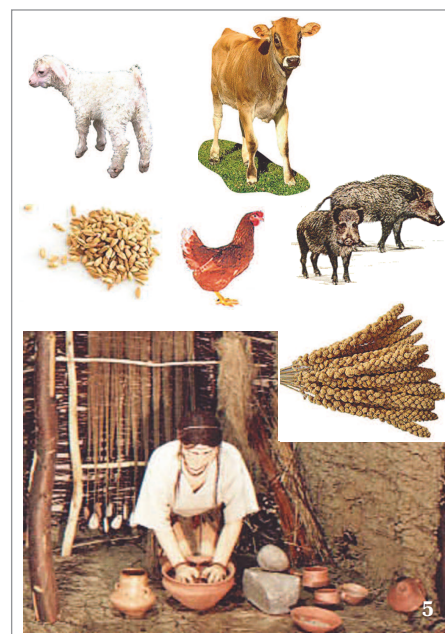
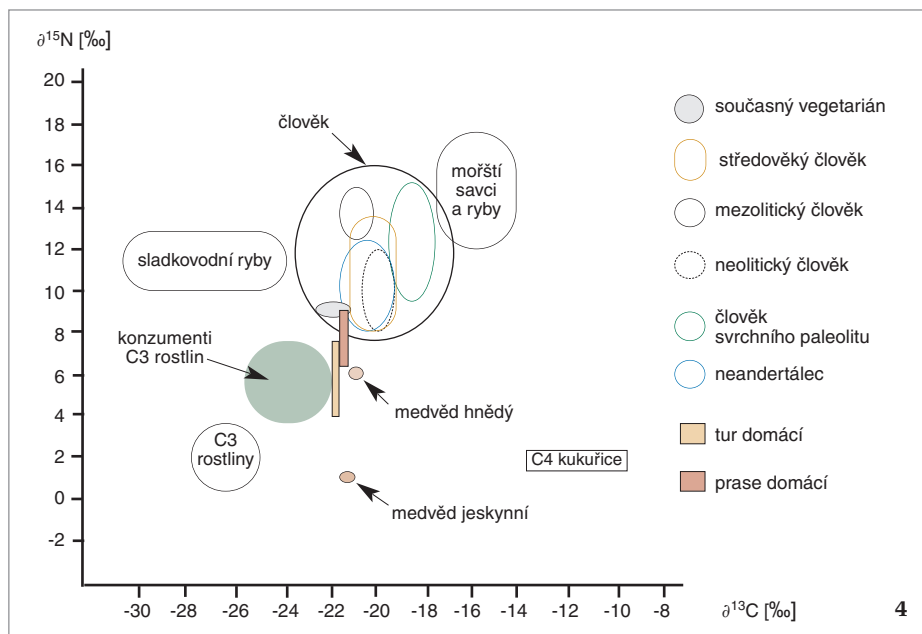
Kyslík

Vyskytuje se ve třech izotopech: ^{16}O (99,759 %), ^{17}O (0,037 %), ^{18}O (0,204 %). Při monitorování fyziologických změn živých organismů má uplatnění poslední z nich. Izotop kyslíku přítomný ve vodě, v atmosféře (O₂) a v potravě je zabudován prostřednictvím vody v těle do kostního (zubního) minerálu na bázi uhličitanových (CO₃⁻²) a fosforečnanových (PO₄⁻³) iontů během jejich utváření. Atmosférický kyslík ^{18}O je relativně konstantní. Izotopové složení vody i stravy, kterou organismy přijímají, je podmíněno obsahem ^{18}O ve vodě v prostředí (meteorologická voda – sníh, srážky), kde organismy žijí, a koloběhem vody. Jiný signál najdeme ve studních, jezerech, tekoucích řekách nebo vodě z tajících ledovců. Klimatické a geografické rozdíly s sebou přinášejí variabilitu hodnot $\delta^{18}\text{O}$, ovlivněnou především množstvím lokálních srážek a kolísáním ročních teplot.

Studium paleoklimatických jevů přineslo poznatek, že rozdíl $\delta^{18}\text{O}$ o 1 promile odpovídá změně teploty prostředí zhruba o 2,6 °C (Yurtsever a Gat 1981). Množství ^{18}O ve srážkové vodě klesá v závislosti na teplotě, zvyšující se nadmořské výšce a vzdálenosti od moře, protože mraky postupující směrem do vnitrozemí postupně ztrácejí $\delta^{18}\text{O}$ srážkami, ale též při nižší intenzitě výparu. Proto i podle $\delta^{18}\text{O}$ dokážeme rekonstruovat migrační cesty ryb a savců. Teplota těla některých živočichů je výsledkem příjmu (ze vzduchu, z vody a potravy) a výdaje kyslíku (např. dýcháním a vyměšováním). Izotop kyslíku ^{18}O vstupuje a vystupuje z těla a je komplexní funkcí potravy, fyziologie a také klimatu, v němž se organismus vyskytuje. Takovéto hospodaření s kyslíkem podléhá odlišné druhové závislosti na vodě, schopnosti ji uchovávat a na rychlosti metabolismu, neboť některá zvířata přijímají většinu vody v pevné formě, některá bez vody

3 Schéma trofických vztahů mezi organismy na úrovni množství izotopu ^{15}N . Hodnoty jsou převzaty z prací H. Bocherense a kol. (1995), M. H. O'Learyho (1988) a J. Lee-Thorpové a M. Sponheimer (2006). Blíže viz text





vydrží delší dobu, jiná nikoli. Zvířata lépe uzpůsobená suchému prostředí, která čerpají více vody z rostlin, odrážejí ve svých kostních tkáních míru vlhkosti prostředí. Obsah ^{18}O se mění také v závislosti na typu fotosyntetické reakce rostlin, a to ve smyslu vyšších hodnot v celulóze rostlin C4 typu fotosyntézy než C3. V aridních oblastech dosahují rozdíly mezi C4 a C3 rostlinami až 10 promile (Sternberg a kol. 1984). Voda v kořenech rostlin je izotopicky blízká srážkové vodě, voda v listech se již výrazněji liší, protože celulóza listů obsahuje více ^{18}O než celulóza tvořící kořeny. Obecně, voda v otevřených vodních zdrojích je méně bohatá na ^{18}O než voda v listech rostlin. Šelmy mohou mít hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ obsažené ve svých kostech blízké své dominantní kořisti, neboť část vody v jejich organismu z této kořisti pochází.

Síra

Tento prvek se vyskytuje v přírodě v podobě čtyř nuklidů: ^{32}S (95 %), ^{33}S (0,76 %), ^{34}S (4,22 %) a ^{36}S (0,014 %). Síra je součástí především aminokyseliny methioninu. Její obsah nás informuje zejména o výživě a je komplementární analýzou ke stanovení poměru uhlíku a dusíku z kolagenu. Stanovení množství ^{34}S je důležité především pro odhad porcí potravy z pozemních, sladkovodních a mořských zdrojů. Síra spolu s izotopy jiných prvků také informuje o mobilitě jedince.

Nejčastěji užívanými stabilními izotopy v bioarcheologii jsou uhlík, kyslík, dusík a stroncium. Informace o jejich obsahu v kostech a zubech jsou často doplňkové, takže čím větší počet stabilních prvků se zjišťuje, tím přesnější je odpověď, kterou přináší. Vzhledem k pracnosti a finanční i časové náročnosti analýz je každý výzkum stopových prvků v bioarcheologii kompromisem.

Historie a současnost využití přirozených izotopů v archeologii ČR

Ačkoli první použití stabilních izotopů v archeologických vědách pro stanovení výživy sahá do 70. a 80. let 20. stol. a jejich využití pro určení migrací a rezidenční

mobility je zhruba o 10 let mladší, v českých zemích se objevily první publikace zcela nedávno. Průkopníkem studia chemického složení kosterních pozůstatků v antropologii a archeologii u nás je Václav Smrčka z 1. Lékařské fakulty UK v Praze. Věnuje se již několik desetiletí vedle své primární profese chirurga i vztahu obsahu stopových prvků v kosterním materiálu a výživě minulých populací.

Tradiční užití stopových prvků ke studiu výživy v minulosti se provádí z minerální komponenty skeletu. V posledních letech však poklesl zájem o stopové prvky i jejich počet, vhodný k rekonstrukci nutričního chování člověka. Při diagenézi (transformační zánikové procesy) kostní tkáň totiž podléhá její minerální složka vlivům prostředí, ve kterém jsou kosti uloženy. Dochází ke kontaminaci kostí stopovými prvky z prostředí a výsledky analýz tak nejsou spolehlivé. Tím trpí i jejich výpovědní hodnota. Minerální složka zubů se zdá být podstatně odolnější vůči těmto změnám, nicméně nedávné výsledky analýzy zubů z archeologických souborů synchrotronní RTG fluorescenční technikou (Carvalho a kol. 2004, 2007) zcela zpochybnily význam analýzy stopových prvků z archeologického materiálu. Zdá se být evidentní, že i posmrtné změny zubů minulých populací jsou odmlněny zevním prostředím. Analýza kostí z místa, které sloužilo desítky let jako parkoviště, jsou toho jasným důkazem (Rebocho a kol. 2006). Přirozené izotopy studované v organické složce kostí (kolagenu) jsou odolnější vůči postdepozicičním změnám, a proto se jim zcela zákonitě dává přednost.

Na první publikaci analyzující přirozené izotopy kosterního materiálu z našeho území se podílel spolu se zahraničními specialisty opět V. Smrčka (Price a kol. 2004). Jde o studii, která pomocí stabilních izotopů stroncia ukázala vysoký stupeň změny rezidenční mobility populace kultury zvoncovitých pohárů v pozdním neolitu před zhruba 5 500 lety ve střední Evropě. V. Smrčka inicioval i týmovou spolupráci českých odborníků při studiu výživy a mobility neolitických lidí, nosi-

4 Poměr stabilních izotopů uhlíku a dusíku pro jednotlivé skupiny rostlin a živočichů včetně člověka. Údaje podle pramenů H. Bocherens a kol. (2001, 2005), M. P. Richards a kol. (2000), M. Sponheimer a J. A. Lee-Thorpová (2007), R. H. Tykot (2006), C. Kendall (2003), C. Dürrwächter a kol. (2005), M. Lillie a kol. (2005) a C. A. Stott (2006)

5 U některých laténských populací (před cca 2 500 lety) mohlo docházet k sociální diferenciaci ve výživě. Jídelníček složený z C3 rostlin (např. pšenice), hovězího, skopového, vepřového a drůbežího masa mohl být rozšířen o proso (*Panicum miliaceum*) s výrazně škrobnatými semeny ze skupiny C4 rostlin. Orig. L. Kovačiková a J. Brůžka

telů kultury s lineární keramikou, kteří žili před 7 500 lety ve Vedrovicích na Moravě. Výsledky ukázaly, že ze šesti jedinců tři děti a jeden dospělý změnil prostředí, ve kterém vyrůstali v raném dětství. Neolitické lidi z Vedrovic se živili rostlinnou stravou a proteiny rostlinného i živočišného původu v proporcích odpovídajících neolitickým obyvatelům Dánska (Smrčka a kol. 2005). Výživa i dostupnost některých potravinových zdrojů svědčí i o sociální diferenciaci společnosti. Období přechodu od halštatské kultury doby bronzové ke kultuře laténské doby železné spojené s keltským etnikem je vhodným předmětem studia. Sociální diferenciacie laténských pohřebišť z Radovesic a Kutné Hory–Karlova přinesla zajímavé výsledky rozdílů ve výživě. Ukázalo se, že statut bojovníků provázela vyšší konzumace živočišných proteinů. U žen se rozdíl ve výživě neobjevují. Jistým přepychem byla zřejmě i konzumace prosa, rostliny s C4 typem fotosyntézy, zcela odlišným od C3 typu, charakteristického pro rostliny mírného pásu. Tato konzumace se projevuje zvýšeným obsahem izotopu ^{13}C . Znalost rozšíření konzumace prosa v prehistorii střední Evropy může být užita ke sledování kulturních vlivů obdobným způsobem, jako slouží konzumace kukuřice na americkém kontinentě (Le Huray a Schutkowski 2005).