

Fosilie – klíč k pochopení (nejen) minulosti Země

Historii života na Zemi, jeho proměny v čase a prostoru můžeme studovat jen díky zachování zkamenělin – fosilií. K tomu, aby se organismus stal zkamenělinou, vede celá řada procesů, více či méně závislých na prostředí a čase. Cestu od odumření po přeměnu ve zkamenělinu označujeme jako fosilizaci (původem z latinského *fossilis* – doslova vykopaný, vyhrabaný). V dnešním smyslu slova jako fosilie vnímáme pozůstatky organismů, které alespoň zčásti ukazují nebo odkazují na původní morfologii, splňují podmínku, že nejsou mladší než 10 tisíc let a nejde o artefakty. Snad každý se někdy s fosiliemi setkal (např. v muzeu) a nejspíše šlo o kamenná jádra (v případě rozpuštění původního materiálu dutin uvnitř organismů), zbytky rostlin (otisky listů, zkamenělá dřeva) nebo mineralizované kosti obratlovců či schránky měkkýšů. Tyto typy zkamenělin patří jistě k nejběžnějším, nejsou ale jedinými, a překvapivě ani nejpočetnějšími, ani nejrozsířenějšími. V článku bychom rádi upozornili na některé typy zkamenělin, způsoby jejich zachování a procesy, které to umožňují. Představíme si také přelomové moderní metody výzkumu fosilií i celých ekosystémů.



Co tedy považujeme za fosilie?

Mezi typické zkameněliny (body fossils) řadíme kamenná jádra, vzniklá po rozpuštění schránky, dále kutikuly a schránky, často přeměněné (obr. 1), kosti, otisky kůže a tělní pokrýv (dokonce i srst zmrzlých savců), mikrofosilie (včetně spor a pylu), listy, šištice, plody a jejich otisky (obr. 2–3) nebo mineralizovaná dřeva. Samostatnou kapitolu představují stopy po činnosti organismů – ichnofosilie (blíže v Živě 2024, 2: XXXIX–XLI, a také str. 238–240 tohoto čísla), mezi něž řadíme i vzácné, podivné a důležité fosilie, jako jsou mineralizované exkrementy – koprolity (obr. 4) – nebo gastrolity, tedy valouny kamenů zjištěné v žaludcích řady obratlovců, např. dinosaurů nebo mořských plazů. Mezi fosilie rozhodně patří také to, co okem ani

mikroskopem nevidíme – a co se nám objeví až pomocí moderních zobrazovacích technik, jako je mikro CT nebo synchrotron (viz níže).

Zajímavou kategorií jsou chemofosilie, u nichž bychom v některých případech jen těžko hledali naplnění uvedené definice zkameněliny, přesto je v určitém ohledu jako skutečné fosilie brát můžeme. Mohou jimi být např. lipidy v podobě fosilních molekul, n-alkany (u kterých se daří, díky moderním technologiím, i přiřadit např. určitá skupina rostlin), dále pigmenty nebo dokonce fosilní DNA – např. 6 milionů let stará DNA získaná ze zachovaných jader krunýře mořské želvy (Cadena a kol. 2023). Jako příklad běžnějších chemofosilií si můžeme uvést melanin. Tento přírodní pigment je až nečekaně rezistentní vůči



1 Pyritizovaná schránka amonoidního hlavonožce rodu *Agoniatites*.

Střední devon, Německo, stáří ca 390 milionů let. Měřítka odpovídá 1 cm.

2 Karbonizované listy kapradosemenných rostlin blízkých rodu *Sphenopteris*. Svrchní karbon (pennsylvan), Česká republika, stáří ca 310 milionů let.

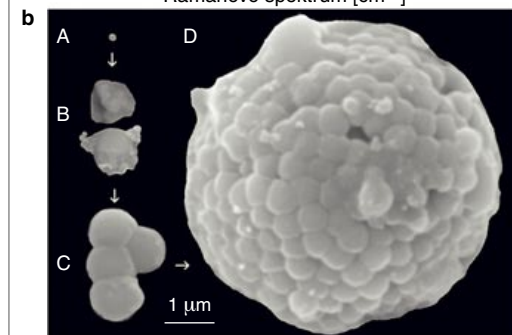
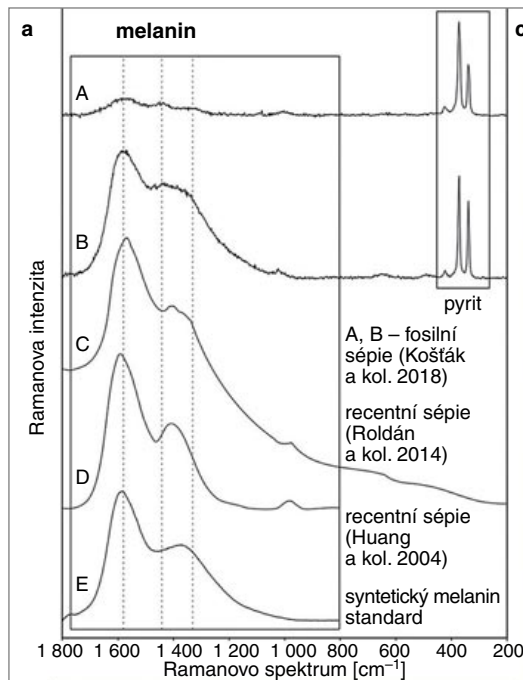
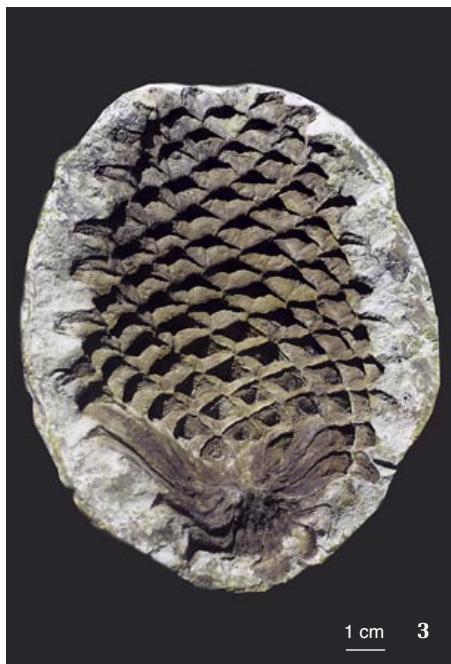
Foto M. Košťák (obr. 1 a 2)

chemickým procesům a času. Díky mimořádnému způsobu zachování v jemnozrnných a částečně dysoxických sedimentech lokality Děvínská Nová Ves (Slovensko, miocén) se zde zachovaly zbytky inkoustového vaku fosilní sépie. S využitím Ramanovy spektroskopie se podařilo prokázat identické spektrum melaninu (eumelaninu) u sépie staré zhruba 15 milionů let a sépie současné (obr. 5). U inkoustových vaků hlavonožců lze dohledat původní melanin do spodní jury (kolem 180 milionů let) a mineralizované zbytky inkoustových vaků dokonce až do období spodního karbonu (namur, zhruba 320 milionů let, Mapes a kol. 2010).

Fosilizace aneb Co je potřeba, aby fosilie vznikla

Základní podmínkou je odumření organismu, jeho způsob a prostředí, kde k tomu dojde. Musíme si uvědomit, že zkameněliny, které nacházíme, jsou vlastně velkou vzácností, protože se dochovaly jen díky shodě mnoha náhod. Obecně platí, že čím jdeme dále do minulosti, tím menší je pravděpodobnost nálezu fosilií. Velkou výhodou mají zkameněliny organismů s primární pevnými schránkami, např. tvořenými biominerály oxidu křemičitého (SiO_2), uhličitanu vápenatého (CaCO_3), fosforečnanu vápenatého ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) a jejich modifikacemi. Druhou důležitou podmínkou je typ prostředí, charakter (např. zrnitost, kdy větší potenciál zachování vidíme spíše v jemnozrnných sedimentech) a chemismus sedimentu. Prostředí, morfologie samotného organismu, schopnost minerálů prostupovat odumřelými zbytky a hromadit se v nich pak přímo určují míru zachování fosilií. Organismus by měl být také co nejrychleji pohřben, aby nedošlo k jeho rychlému rozložení (např. díky oxidaci) nebo konzumaci dekompozitory.

Mezi nejběžnější typy fosilizací patří kalifikace, kdy do organických zbytků vstupuje uhličitan vápenatý (v různých modifikacích), dále pak silifikace (odpovědnými činiteli jsou kyselina křemičitá a oxid křemičitý, včetně vodnaté formy – opálu)



a fosfatizace (mineralizace fosforečnanem vápenatým, obr. 4). U rostlin je běžným fosilizačním procesem karbonizace, při které dochází bez přístupu vzduchu k přeměně organických molekul na uhelnou hmotu bohatou na uhlík (obr. 2). Podobné procesy můžeme pozorovat i u živočišných zbytků, kdy chemické reakce vedou ke vzniku poměrně stabilních sloučenin, jako jsou bitumeny. Bez přístupu vzduchu probíhá také pyritizace (obr. 1) prostřednictvím minerálu pyritu (FeS_2) v prostředích bohatých na sirovodík (H_2S). Mezi typy fosilizací patří limonitizace (podle minerálu limonitu – sloučeniny oxidů a hydroxidů železa) a řada dalších. Vzácnější procesy vedoucí ke vzniku fosilií jsou např. uchování ve zmrzlé půdě nebo ledovci, vznik a zachování pseudomumií nebo obalení organismů pryskyřicí a její přeměna v jantar.

Ti nejmenší – mineralizace a schránky mikroorganismů v čase

U prvoků se již od konce prekambria aktivovala schopnost biomineralizace – např. opál (u mřížovců), později kalcit a aragonit (u heterotrofních prvoků dírkovců – foraminifer – v ordoviku, u fototrofních řas kokolitek v triasu). V prekambriu vznikl navíc u dírkovců speciální typ pevných schránek budovaných za pomoci cizorodých prachových částic – připomínají schránky chrostíků a nazývají se aglutinované. Podobnou strategií na stavbu pevných schránek začali využívat i sladkovodní prvoci – krytenky, a to od karbonu. Na konci druhohor začaly vytvářet pevné opálové schránky také rozsivky.

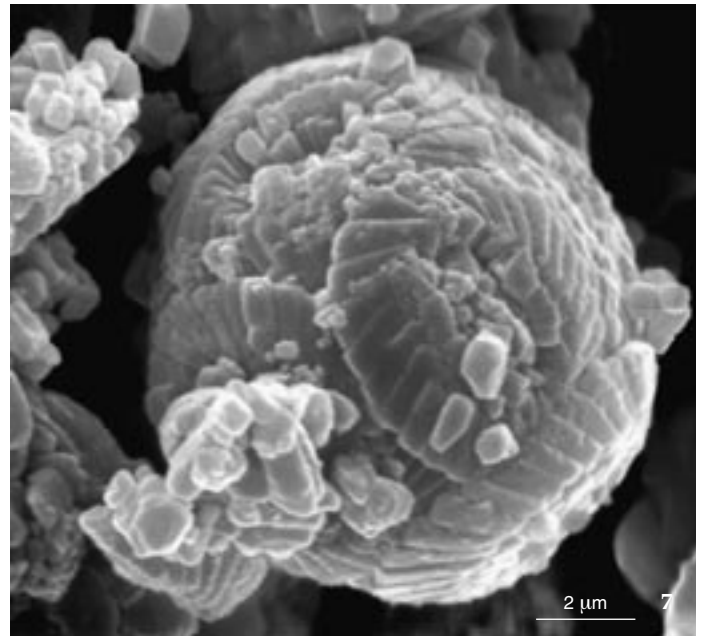
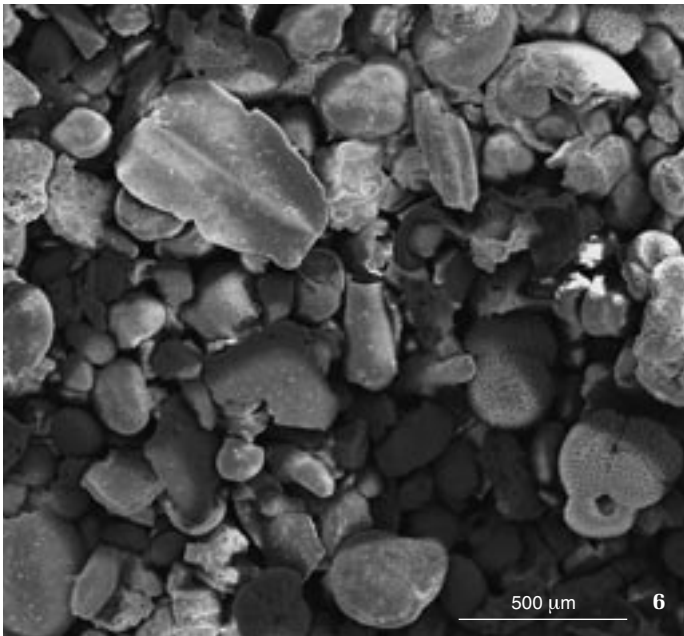
Proč místo formulace „kokolity vznikly v triasu“ je v předchozím odstavci uvedeno, že se u této skupiny vyvinula schopnost biomineralizovat kalcit v triasu? Molekulární hodiny nám totiž ukazují, že skupina vznikla zřejmě již v siluru. První fosilní nálezy kokolitek známe ale až z triasu. Je několik možností, jak tuto disproporci vysvětlit: buď nefungují molekulární hodiny (např. rovnoměrná rychlost evoluce), nebo jsme kokolity zatím v siluru až permu nenašli, což je málo pravděpodobné vzhledem k dobré prozkoumanosti sedimentů tohoto věku a předpokladu, že mořský fytoplankton by se po svém vzniku rychle a masově rozšířil po světových oceánech. Velice pravděpodobné je ale třetí vysvětlení, že kokolity od siluru do triasu neměly pevné schránky, a proto se nezachovaly ve fosilním záznamu. Pokud tuto hypotézu přijmeme, vyplývá z ní, že biomineralizace se může objevit u již evolučně úspěšných skupin v průběhu jejich vývoje.

Zatím přesně nevíme, proč se u prvoků biomineralizace vyvinula, a dokonce byla evolučně úspěšná, i když jde o velice energeticky náročný fyziologický proces. U tak malých organismů je ochrana před drobnými predátory sice také možná, ale ve hře jsou i další hypotézy jako vylučování toxických látek z buňky, nebo naopak ukládání anorganických živin. U fototrofních kokolitek se uvažuje, že ploténky s centrálním otvorem koncentrují světlo, u rozsivek byla vyslovena hypotéza, že schránky usnadňují vnos buňky.

Ať už je zvýhodnění prvoků s pevnou schránkou jakékoli, úspěšnost této strate-

gie byla tak vysoká, že se někteří prvoci s pevnou schránkou rozšířili ve velkých počtech a byli dokonce horninotvorní. I na dně dnešních oceánů se ukládají sedimenty, které po zpevnění vytvoří organodetritické horniny tvořené schránkami prvoků (obr. 6). Tyto tzv. globigerinové, radiolaritové a diatomové kaly se ukládají na dně oceánů tam, kam se již nedostanou erodované úlomky starších hornin z pevniny včetně těch nejmenších minerálních zrn o velikosti mikrometrů. Jejich ekvivalenty ve fosilním záznamu jsou např. radiolarity (křemité horniny tvořené schránkami mřížovců), diatomity (také křemité horniny ze schránek rozsivek, v oceánu jsou typické pro vyšší zeměpisné šířky a mohou se vyskytovat i v jezerech) nebo globigerinové jíly (vápnité horniny, jejichž významnou součástí jsou schránky planktonních dírkovců rodu *Globigerina*).

Zajímavým příběhem je i ukládání křídly na konci druhohor. Tato hornina je tvořena z velké části vápnitými ploténkami kokolitek, mikroskopických řas, které i v současnosti představují důležitou součást mořského fytoplanktonu (obr. 7). Proč se ale dnes netvoří mocné akumulace sedimentů, jako tomu bylo v křídě? Vysvětlení se skrývá v kolísavém podílu hořčíku a vápníku v mořské vodě. Mořská voda na konci druhohor měla nízký obsah hořčíku ve srovnání s dnešní dobou, což podpořilo intenzivní biomineralizaci zelených řas (*Chlorophyta sensu stricto*) a kokolitek (Haptophyta). Dnešní mořská voda má zvýšené obsahy hořčíku, dobře v ní mineralizují např. červené řasy, zatímco kokolity



3 Otisk šišky borovice (*Pinus*). Miocén, ČR, stáří ca 20 milionů let

4 Koprolit. Zkamenělý (fosfatizovaný) exkrement křídového žraloka. ČR, stáří ca 90 milionů let. Foto M. Košťák (obr. 3 a 4)

5 Chemofosilie a jejich zachování. Ramanovo spektrum melaninu (obr. a) fosilní (A, B) a recentní (C, D) sépie. Syntetický melanin (E) nevykazuje pík u hodnot okolo spektra $1\ 000\ \text{cm}^{-1}$, na rozdíl od přírodního melaninu sépie. Částice melaninu (b) – nanočástice melaninu (A), velikostní frakce odpovídající melanosomu (B) a agregace částic melaninu (C, D). Skenovací elektronová mikroskopie. Schránka fosilní sépie (c), miocén, ca 15 milionů let, se zbytky inkoustového vaku (černě). Převzato z publikace M. Košťák a kol. (2018)

6 Recentní sediment ze dna tropické části Atlantského oceánu s převahou schránek dírkovců – foraminifer

7 Detail složení psací křídly. Hornina je tvořena destičkami kokolitek nebo jejich úlomků. Uprostřed kompletně zachovaná celá schránka (kokosféra) složená z jednotlivých destiček. Foto K. Holcová (obr. 6 a 7)

8 Výkop v uhelném lomu u města Wuda v pouštní krajině Vnitřního Mongolska. Výkopy o rozloze až přes $2\ 000\ \text{m}^2$ (jako na snímku) umožňují odhalit i velké rostliny stromovitého vzrůstu. Plocha je rozdělena na čtverce o rozloze $1\ \text{m}^2$ a dá se tak zaznamenávat přesná pozice nalezených fosilií a postupně skládat věrný obraz vegetačního pokryvu, jeho hustoty a složení. Zadní část výkopu byla již zdokumentovaná. Černá plocha v popředí je uhelná sloj – původně subtropické rašeliniště, jehož vegetaci sopečný popel počátkem permu před 298 miliony let zasypal. Foto J. Pšenička



nách bentických dírkovců vyvinuly tzv. velké foraminifery. Je to označení pro několik vzájemně nepřibuzných rodů dírkovců, které tvoří schránky velikosti několika milimetrů až 15 cm s velice složitou stavbou (obr. na 3. str. obálky). A to všechno vytvoří pouze jedna buňka. Opět značně energeticky náročný „rozmar“. Studium této evoluční adaptace ukázalo, že nejde o přepychové „paláce“, ale o „farmy“. Schránky velkých foraminifer obývají autotrofní symbiotické řasy (zooxantely), např. rozsivky, s kterými si heterotrofní dírkovec vyměňuje plyny – kyslík a oxid uhličitý. Ve velkých schránkách je dostatek prostoru pro život a rozmnožování zooxantel. Když je dostatek zdrojů potravy, mutualistická (vzájemně prospěšná) symbióza funguje. Když ale nastane sezona s nedostatkem zdrojů živin, dírkovec zooxantely konzumuje, a tím dané oligotrofní období přežije na rozdíl od skupin, které tuto strategii nemají. Proto mohou být velké foraminifery evolučně úspěšné zvláště v obdobích s velkou rozlohou teplejších oligotrofních šelfových moří, jakým byl např. eocén, kdy se po světových šelfech masově rozšířily známé numulity. Momentálně je ve Středozezemním moři hodně

úspěšný rod *Amphistegina*, který před několika lety migroval přes Suezský průplav z Indického oceánu a velmi rychle vytlačuje diverzifikovaná společenstva mediteránních dírkovců a nahrazuje je monospecifickými akumulacemi, jež v budoucnosti pravděpodobně vytvoří na dně Středozezemního moře amphisteginové vápence. Tato evoluční úspěšnost velkých foraminifer, kterou můžeme sledovat v „přímém přenosu“, byla několikrát zaznamenána i v geologické minulosti, kdy vytvářely např. fusulinové (karbon, perm), orbitolinové (křída) nebo již zmiňované numulitové (paleogén) vápence. Navíc jejich morfotypová evoluce (změny v morfologii schránek) byla tak rychlá, že jsou vůdčími zkamenělinami, které umožňují velice přesně datovat vznik hornin.

Pohřbené ekosystémy – okna do minulosti

Mezi nejdůležitější zdroje informací o životě v geologických obdobích patří zachování celých ekosystémů nebo jejich podstatných částí. Lokality, na nichž nacházíme výjimečně zachované části organismů (včetně mineralizovaných měkkých

tkání), se označují jako lagerstätten (blíže v seriálu v Živě 2022, 2–4; a také 2025, 3: 98–100). Dnes jich existují desítky až stovky napříč geologickými obdobími. Jejich vznik je rozdílný, velmi často ale souvisí s intenzivní vulkanickou činností.

● Karbonské Pompeje aneb Přírodní katastrofy jako archivy života

Přírodní katastrofy byly a jsou poměrně častým jevem. Obvykle lokální události s tragickými následky souvisejí nejčastěji s extrémními výkyvy počasí či zemětřesením. Méně časté katastrofy má na svědomí také explozivní vulkanismus. Mezi příklady z nedávné i vzdálenější historie se vyjímá pohřbení starověkých Pompejí a Herculaneu sopečným popelem při výbuchu Vesuvu v r. 79 n. l. Pro obyvatele měst žhavé peklo, pro archeology dnes unikátní zdroj informací o životě v období antiky před dvěma tisíci let. Podobnými archivy jsou i vulkanické erupce s katastrfickými následky v geologické minulosti. Uchovávají detailní a věrný „snímek“ o složení a struktuře bioty v milionech let vzdálené historii Země (obr. 8–12).

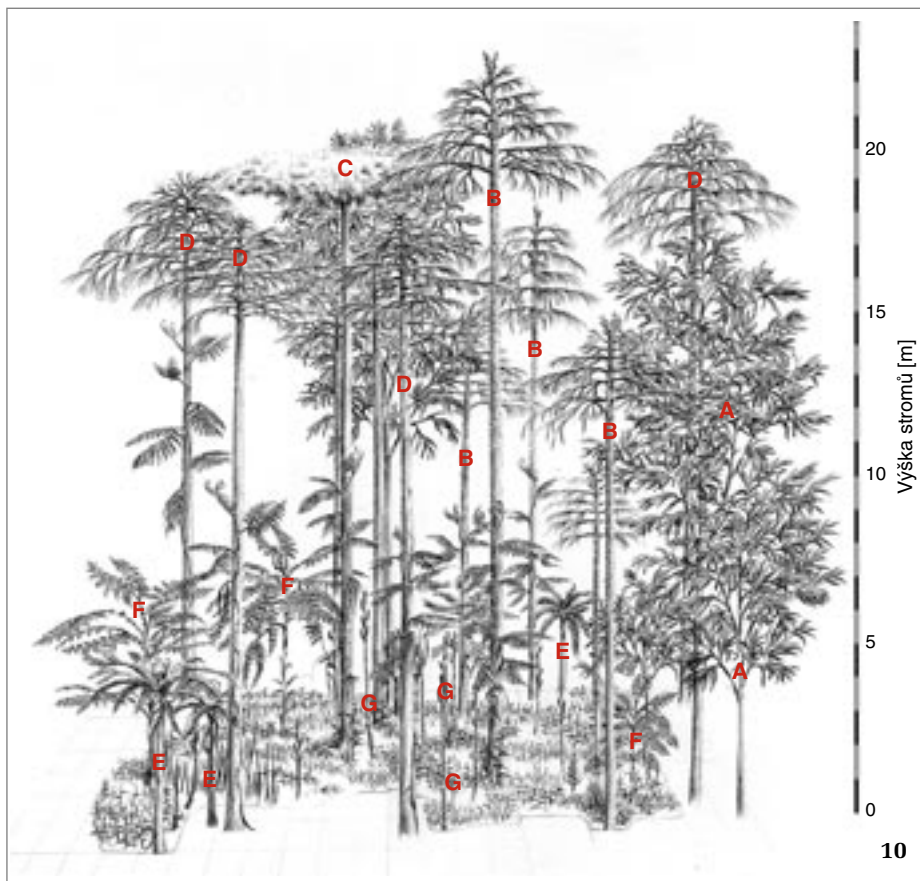
Pozůstatkem katastrfických erupcí v geologické minulosti jsou dnes vrstvy pyroklastik (tufů) nebo chemogenních sedimentů (nejčastěji travertin, tedy CaCO_3 , anebo silicit odpovídající složením oxidu křemičitému – SiO_2) vysrážených z horkých pramenů či roztoků doprovázejících vulkanickou činnost. Mnohé z nich obsahují fosilizované zbytky rostlin a živočichů a jsou důležitými paleontologickými lokalitami. K nejznámějším patří třeba Chemnitz (Saská Kamenice) nebo skotská Rhynia. V Chemnitzu popsal petrifikované kmeny permských rostlin poprvé již v r. 1546 německý přírodovědec Georgius Agricola. Systematický výzkum však začíná s urbanistickým rozvojem města koncem 19. století. Vědecký potenciál lokality odhalil a plně docenil až nejnovější systematický výzkum v uplynulých dvou dekádách. Ten ukázal, že erupce zeissigwaldského vulkánu pohřbila nedaleký ekosystém permského lesa. Po iniciálním spadu vulkanického popela, který zasypal drobné rostliny, ulámané větve a listy stromů a živočichy žijící v podrostu, přišla mohutná exploze doprovázená žhavým pyroklastickým proudem. Smetl vše, co mu stálo v cestě včetně stromů, ze kterých zůstaly ve vrstvě popela pouze pařezy se zbytky olistění. Roztoky kyseliny křemičité vznikající infiltrací srážkové vody skrze uložení pyroklastického proudu následně způsobily silicifikaci (petrifikaci) pletiv pohřbených rostlinných zbytků známých dnes jako zkamenělý les z Chemnitzu. Naproti tomu skotská Rhynia uchovává asi 409 milionů let starý spodnodevonský terestrický ekosystém z doby před vznikem nejstarších lesů, kdy suchozemské rostliny dorůstaly většinou jen decimetrových výšek. Ekosystém vznikl v oblasti podobné dnešnímu Yellowstoneu s četnými horkými prameny a gejízry souvisejícími s doznívající vulkanickou aktivitou. Výrony pramenů s obsahem kyseliny křemičité pak čas od času zaplavovaly stanoviště kolonizované rostlinami i jejich živočišnými obyvateli, v tomto období výlučně bezobratlími. Vzhledem k drobným rozměrům rostlin i živočichů je většina z nich ve vysráže-



ném silicitu zachována kompletně (blíže i v Živě 2022, 4: 156–159). Rostlinné osy zakořeněné v písčitém či bahnitěm substrátu jsou zachovány do buněčné úrovně, v různých stadiích ontogenetického vývoje včetně gametofytní generace a sporofytní generace se sporangii. Uvolněné a často naklíčené spory tvoří běžnou součást silicifikovaného půdního profilu. Studium silicitů z lokality Rhynia poskytlo rovněž doklady o symbióze mezi různými organismy včetně mykorhizy, dále parazitů v rostlinných buňkách, cyanobakterií a mnoha dalších detailů, které v běžném fosilním záznamu nemají šanci na uchování. Terestrický ekosystém v silicitech z okolí Rhynie tak představuje jeden z nejdokonaleji prostudovaných fosilních ekosystémů v geologické historii.

Také v České republice máme lokality, jejichž fosilní záznam vznikl v důsledku mohutných vulkanických erupcí a poskytuje cenné informace o složení, struktuře

a vzhledu fosilních ekosystémů. Nejznámější lokality vznikly pohřbením karbonických mokřadů sopečným popelem ve středních a zejména západních Čechách, kde se nacházejí blízko povrchu, dostupné detailnímu výzkumu. Příkladem jsou lokality Ovčín u Rokycan a Štílec u Žebráku, původně povrchové uhelné lomy. Ve vrstvě sopečného popela je zde zakonzervována vegetace rašeliníště spodní radnické sloje (obr. 10 a 11). Nedávné radioizotopové datování prokázalo stáří tufu 314 milionů let, které se tak shoduje s kulminací vulkanické aktivity obří altenbersko-teplické kaldery na česko-saském pomezí, s níž je vznik vrstvy tufu spojován. Erupce kaldery, která pohltila karbonickou vegetaci, je velikostí srovnatelná s explozí sopky Tambora v r. 1815. Pyroklastické proudy valící se jako lavina sežehly a pohřbily území až do okolí Lito- měřic, sopečný popel pak zasypal velkou část Čech a patrně i přilehlou část Bavorska a Rakouska. V území mezi Kladnem





11



12

9 Kmeny stromovitých plavuní rodu *Sigillaria* nalezené v jednom z výkopů na lokalitě Wuda, Vnitřní Mongolsko. Kmen uprostřed představuje vrcholovou partii stromu s dlouhými úzkými listy. Životnost listů byla omezena a po čase opadávaly. Proto je větší část kmene zdánlivě „bezlistá“. Průměr kmenů 20–25 cm. Foto J. Pšenička

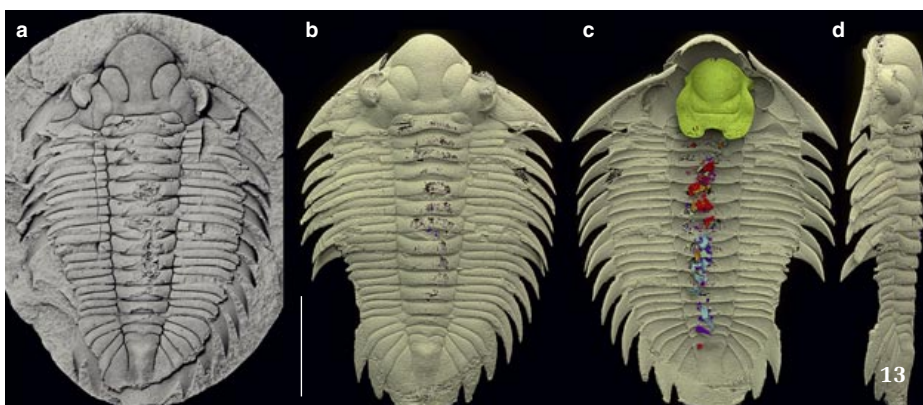
10 Rekonstrukce mokřadního lesa na lokalitě Ovčín u Rokycan. Dominantu tvoří nahosemenné stromy rodu *Cordaites* (A) a plavuně *Paralycopodites* (B), *Lepidophloios* (C) a *Lepidodendron* (D). Keřové patro tvořily kapradiny *Psaronius* (E), kapradinám podobné nahosemenné rostliny (pteridospermy) rodu *Medullosa* (F) a přesličky rodu *Calamites* (G). Vyznačen je obrys výkopu se čtvercovou metrovou sítí. Výška stromů dopočítána z průměru kmenů. Orig. J. Svoboda

11 Kamenný výlitek pařezu stromovité plavuně rodu *Lepidodendron* z období karbonu zachovaný v 314 milionů let staré vrstvě sopečného popela (rezavá hornina) v bývalém povrchovém lomu Ovčín u Radnic na Rokycansku

12 Uhelná sloj odkrytá v opuštěném uhelném lomu na lokalitě Wuda. Světlá, přibližně 45 cm mocná vrstva sopečného popela uprostřed sloje uchovává pozůstatky raně permského mokřadního lesa. Foto S. Opluštil (obr. 11 a 12)

13 Snímek fosilie trilobita *Bohemolichas incola* zachované v rokycanské kuličce (blíže v textu; obr. a). Měřítko 1 cm. Trojrozměrná vizualizace při pohledu shora (b, dorzální pohled), zespodu (c, ventrální pohled) a z levého boku (d, laterální pohled); krunýř je v béžové barvě, hypostom (tvrdý kryt ústního otvoru) žluté, obsah trávicího traktu barevně rozlišený podle různých fosilních skupin. Foto a orig. P. Kraft (obr. a) a V. Vaškaninová (b–d)

a Plzní dosahuje dnes vrstva tufu mocnosti 40–60 cm, vrstva čerstvě napadaného popela byla přibližně dvojnásobná. I když ani tato mocnost nestačila k pohřbení lesní vegetace, její poškození bylo fatální a na prostá většina stromů dřívě nebo později uhynula. Dokládají to větve stromů v popelu okolo mateřského kmene, z kterého se dochovaly pouze pařezy zakořeněné ve stropě uhelné sloje (obr. 11). Větve s olistěním umožňují přesně určit botanickou



13

příslušnost pařezů, jejich vzdálenost pak strukturu a hustotu lesa. Kromě úlomků větví se okolo mateřských kmenů nalézají zbytky olistění karbonských lián, některé dosud ovinuté okolo pařezů. Naproti tomu drobné rostliny převážně bylinného vzrůstu v podrostu lesa byly pohřbeny prakticky celé. Lze tak studovat hustotu a složení „bylinného“ patra karbonského lesního rašelinště. Také vertikální distribuce rostlinných zbytků má svou zákonitost (obr. 10). Na kontaktu uhelné sloje s vrstvou tufu je zachován lesní opad, několik milimetrů až centimetrů nad bází pak rostliny bylinného patra. Rostliny většího vzrůstu a úlomky silných větví nejčastěji najdeme ve střední a svrchní části vrstvy popela, často společně se zbytky karbonských lián. Některé stromy byly vahou popela vyvráceny. Jejich kompletní odkrytí se však zatím podařilo jen na podobné lokalitě Wuda v severní Číně, kde uhlotvorný močál z období nejstaršího permu překryla vrstva sopečného popela mocná 45 cm (obr. 8, 9 a 12). Výkopových prací v uhelných lomech na ploše stovek až tisíců čtverečních metrů se zde účastnili i čeští paleobotanici. Z tak rozsáhlé plochy lze již spolehlivě určit strukturu a složení lesa i jeho laterální proměnlivost a druhovou pestrost. Ta se pohybuje kolem 30–40 druhů. Podobná diverzita dosahující kolem 35 druhů je známa i z lokality Ovčín, kde byla dosud odkryta a detailně prostudována plocha o rozloze kolem 200 m². Dokládá, že i tak malá plocha je reprezentativním vzorkem karbonského tropického lesa. Zcela unikátní společenstvo tvořené drobnými kapradinami a „trpasličími“ přesličkami a plavuněmi bylo odkryto na lokalitě Štílec u Žebráku a je považováno za pionýrské

společenstvo kolonizující změlčené jezírko vzniklé zaplavením uhlotvorného močálu. K charakteristice druhového složení a struktury tohoto společenstva zde stačí odkrýt jen několik metrů čtverečních.

Moderní metody nedestruktivního zobrazování a studia fosilií

Pronikat pod slupku, a to bez ohledu na způsob a míru zachování, nám v současné době výrazně napomáhají moderní nedestruktivní technologie využívané ve výzkumu fosilií. Zatímco technologie mikro CT (Computed Tomography; více také v Živě 2017, 6: 294–296) je dobře známá a poměrně hojně využívaná i v české paleontologii (mnohá pracoviště mají dokonce vlastní CT přístroj), přelomová zobrazovací technika synchrotronové mikrotomografie teprve v posledních desetiletích našla využití v paleontologických aplikacích, v nedávné době i u zkamenělin z našeho území. Tato zobrazovací technika s ultravysokým rozlišením umožňuje vědcům nahlédnout dovnitř fosilií v bezprecedentních detailech a rekonstruovat vnitřní strukturu zkamenělin ve třech rozměrech, aniž by je poškodila. Nejvýznamnějším zařízením a v současnosti nejjasnějším zdrojem rentgenového záření na světě je Evropský synchrotron ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) ve francouzském Grenoble. Jde o cyklický urychlovač elektronů téměř na rychlost světla, které vytvářejí elektromagnetické, tzv. synchrotronové záření. Tato metoda umožňuje prozáření materiálů velké hustoty (např. hornin). Není ale snadné získat projekt a mít možnost studovat exempláře na tomto unikátním zařízení. Vědcům z Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy s kolegy se to

povedlo hned třikrát a studované vzorky se staly prvními českými zkamenělinami, které byly na synchrotronu zkoumány. Ohromné množství cenných dat (v řádu terabajtů) získaných popsanou metodou postupně rekonstruuji ve speciálním softwaru sloužícím k vytváření trojrozměrných vizualizací zkamenělin a jejich vnitřních struktur. Následné interpretace pomohly odhalit nejen nečekanou anatomii, ale i různé aspekty životních strategií pravěkých tvorů.

Tak bylo možné nejen rekonstruovat lebky a detailní anatomii mozku zhruba 410 milionů let starých bazálních rybovitých obratlovců z devonu pražské pánve. Díky synchrotronu byly naprosto nečekaně objeveny zuby a zubní destičky u těchto čelistnatců, považovaných za vývojově nejstarší zástupce vývojové linie vedoucí až k člověku. Překvapivě jejich chrup nevypadal tak, jak bychom očekávali. Naopak, v zásadních znacích připomínal zuby a čelisti u dnes žijících paryb, ryb i jejich potomků čtvernožců. Objev má tudíž potenciál změnit náš ustálený pohled na příbuzenské vztahy na bázi vývojového stromu obratlovců. Následně skenování

v submikronovém rozlišení umožnilo vizualizovat způsob růstu, a dokonce i dokonale zachované buněčné prostory uvnitř dentinu těchto starodávných zubů (Vaškaninová a kol. 2020).

Pomocí synchrotronu jsme mohli nahlédnout dovnitř 465 milionů let starého trilobita z ordoviku pražské pánve se zachovaným obsahem střev (obr. 13). U této výjimečné zkameněliny, trojrozměrně zachovalé v tzv. rokycanské kuličce (křemité konkreci), se podařilo zrekonstruovat obsah žaludků a střeva, a až na úroveň druhů určit živočichy, které trilobit pozřel. Trávicí trakt tohoto členovce byl zcela naplněný vápenatými schránkami a jejich úlomky, které patřily mořským bezobratlým, jako jsou lasturnatky, mlži a ostnokožci. Díky příznivým okolnostem zachování zkoumaného trilobita se podařilo odvodit i dříve nepředstavitelné detaily o způsobu života, výživě a trávení těchto pravěkých tvorů, připomínající některé dnešní mořské koryše a klepítkatce. Paleofyziologie není úplně novým oborem (vzpomeňme třeba studie o teplokrevnosti dinosaurů), ovšem až rozmach používání nedestruktivních metod v paleontologii umožní rozší-

ření tohoto výzkumného směru a usnadní chápání vymřelých tvorů jakožto živých organismů.

Závěrem

Období romantické deskriptivní paleontologie je nenávratně minulostí. Informace, které bylo možné z fosilií získat během 19. a 20. století, narazily na své limity. Dnes na scénu vstupují nové metody, integrované a mezioborový výzkum. Dříve netušené možnosti významně přispívají k pochopení minulosti, ta je východiskem a často i mementem pro současnost i budoucnost. Fosilní ekosystémy a jejich proměny v čase poskytují, jako jediné, relevantní odpovědi na otázky rychlosti, intenzity a dopadů klimatických změn a přírodních katastrof, dávají možnost posoudit míru a selektivitu různých vymírání, stejně jako obnovu světových biotopů.

Spoluautoři: Martin Košťák, Stanislav Opluštil a Valéria Vaškaninová

Seznam použité literatury uvádíme na webové stránce Živy.

Lucie Juříčková, Adam Petrušek

Do skály bez vrtáku – ryjící mořští živočichové

Ryjící živočichové obývají půdu i různé sedimenty, pokrývající většinu povrchu Země. Tyto organismy jsou různých velikostí i tvarů a můžeme je zařadit do mnoha živočišných kmenů. Že je výhodné umět rýt v substrátu, zjistili živočichové už v prekambriu, což mělo za následek jejich rozmach, a naopak úbytek různých forem žijících přisedle. Míchání sedimentu v důsledku této činnosti, nazývané bioturbace, pak klíčovým způsobem změnilo látkové toky v sedimentech. Existují ale i živočichové, kteří dovedou rýt v substrátech mnohem tvrdších, než je půda nebo mořské sedimenty. Ryjí, nebo spíš vrtají v kameni, ve dřevě, v korálech, ve schránkách měkkýšů i v kostech obratlovců, čímž vrací různé prvky, především vápník, dlouhodobě uvězněný v těchto materiálech, do koloběhu látek. Zároveň tak přispívají k destrukci pevných struktur – bioerozi. Důvody k této činnosti mají jednotlivé druhy různé – úkryt, konzumace vrtaného materiálu, překonání schránky kořisti apod. Zde se zaměříme na mořské živočichy, které můžeme běžně potkat kolem evropských břehů a kteří se s touto výzvou úspěšně popasovali.

Není dno jako dno, není skála jako skála. Vlastnosti materiálů ovlivňují způsoby, jakými se do nich dá vrtat. Lépe se vrtá do měkkých substrátů, jako je bahno nebo písek, kdy ryjící organismus v zásadě „pouze“ deformuje své okolí. Tvrdý substrát je pro zarývání mnohem obtížnějším materiálem, ale zato poskytuje tvůrci nory pevnější a bezpečnější úkryt. Není tedy divu, že tato nika nezůstala v přírodě

volná. Do pevných substrátů se dá dostat mechanicky pomocí abraze nebo chemicky – rozleptáváním. Oba způsoby živočichové využívají, ale úspěšně dokázali zdotat jen některé materiály. Dřevo neodolává dlouho a ani vápencové skály nejsou pro některé živočichy nepřekonatelnou překážkou, naopak do vyvěřelin nebo odolných přeměněných hornin se obvykle nepouštějí. Nejvýznamnější původce děr či nor

různých velikostí a tvarů ve skalách a dalších pevných strukturách na pobřeží evropských moří najdeme mezi houbovci, kroužkovci a měkkýši. V místech, kde je pobřeží tvořeno převážně vápencovými skalami, třeba na chorvatském pobřeží Jadranu, nám důsledky jejich činnosti nemohou uniknout. Oblázkové pláže bývají poseté lehkými „pórovitými“ kameny, často navíc prodrávěnými hladkými rovnými tunely jako od vrtáku. Ne každý si však uvědomuje, že obojí způsobili mořští bezobratlí. Jejich činnosti jsou si ale velmi dobře vědomi podmořští archeologové a inženýři – pro tyto živočichy není velký rozdíl mezi přirozenou skálou, zatopenými zbytky chrámu a mramorovou antickou sochou, nebo mezi potopeným kmenem stromu a vrakem lodi. Mohou se pustit ale i do betonu a dřevěných přístavních struktur. Bioeroze tedy také přispívá k zániku ponořeného kulturního dědictví a může způsobovat ekonomické škody.

● **Houbovci (Porifera)** pronikající do skal jsou měkké organismy bez jakýchkoli struktur umožňujících abrazi. Je tedy jasné, že k narušování pevného substrátu využívají především chemické rozpouštění. A je třeba vyzdvihnout, že se stali ve výrobě nejrůznějších chemikálií skutečnými mistry. Vzhledem k jejich přisedlému způsobu života jsou chemické interakce s prostředím a predátory ty jediné možné. Houbovci prorůstají nejen vápencové skály, daří se jim i v kostrách korálů, zvápenatělých řasách, v ulitách plžů i lasturách mlžů, čímž mohou působit také škody např. v akvakulturách ústřic. Houbovci jsou, jak známo, velice jednoduchí živočichové, kteří většinou nemají buňky organizované ve tkáních. Specializované buňky v jejich tělech nicméně mají různé funkce. V případě vrtání se uplatňují buňky s prstovitými výběžky, které vylučují kyseliny sloužící k rozleptávání vápencových skal. Jiné typy buněk jsou schopné odstraňovat