

Unikátní naleziště zkamenělin na jihu Francie odkrývá historii polárních ekosystémů

V polárních ordovických mořích se skrýval překvapivě bohatý život. Nedávno objevené naleziště zkamenělin v jižní Francii odhaluje rozmanitý polární ekosystém z doby před 470 milionů let, kterému dominovali houbovci (Porifera) a řasy. Z organismů zdejšího společenstva, nazvaného Cabrières Biota, se zachovaly nejen pevné části těl, ale i mnohem měkčí a méně odolné části nebo přímo měkkotělé organismy. Díky této nově objevené lokalitě s výjimečným zachováním se tak můžeme podívat do minulosti na dávné polární organismy – od řas přes trilobity až po podivné lobopody.

Fosilie jsou pro nás klíčem k pochopení dávného života na Zemi a pomáhají skládat mozaiku tehdejšího světa. Během milionů let se však z fosilního záznamu vytrácejí cenné detaily o tehdejších organismech. Většina paleontologických nalezišť poskytne pouhé zbytky pevných částí těl – schránky, kostry a zuby. Naštěstí existují i místa, kde během fosilizace panovaly velmi příznivé podmínky a podařilo se zachovat měkčí, méně odolné organismy, tkáně nebo třeba pozůstatky trávicí či nervové soustavy. Tyto výjimečné lokality, známé

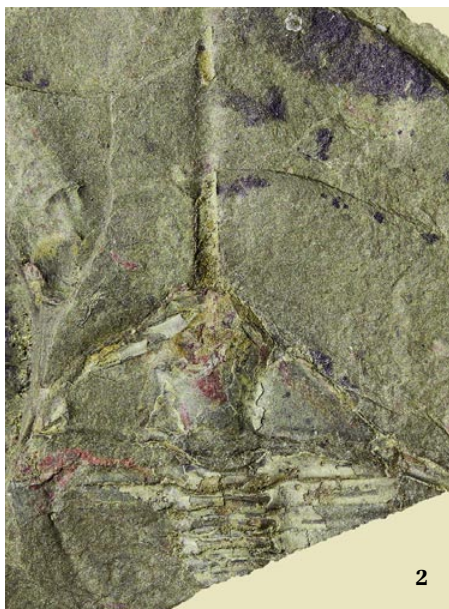
jako lagerstätten (blíže o nich v seriálu Unikátní okna do prvohor, Živa 2022, 2–4), poskytují mnohem přesnější představu o životě v geologické minulosti a komplexnější informace o tehdejší biodiverzitě. Pro poznávání podoby dávného světa mají nevyčísitelnou hodnotu. Dalo by se říct, že doslova zachycují fotografie tehdejšího života, bez filtrů a šumu. Objev každé takové unikátní lokality je proto pro paleontology vždy velkou událostí. Pro pochopení celkového obrazu života na Zemi a průběhu evoluce představují jednotlivá lagerstätten

však stále části celkové skládačky. Ačkoli v současné době známe už desítky takových „oken do minulosti“, každé z nich ve skutečnosti pokrývá jen krátký časový úsek z omezené oblasti. Navíc, ordovická lagerstätten, která by zachycovala ekosystémy otevřeného moře, jsou stále poměrně vzácná, alespoň ve srovnání s kambrickými. Právě z toho důvodu je nově objevené naleziště z jihu Francie unikátní.

Francouzský díl skládačky

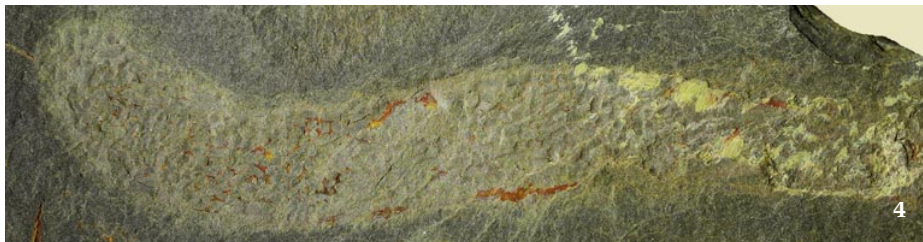
V r. 2018 objevila dvojice nadšených amatérských paleontologů Eric Monceret a Sylvie Monceret-Goujon v proslulém vinařském departmentu Hérault na jihu Francie novou lokalitu, která na první pohled nevypadala až tak výjimečně. Koneckonců, v Montagne Noire jsou nálezy zkamenělin podobně běžné jako v českém Barrandienu. Po týdnech trpělivého sbírání zkamenělin a tvrdé práce při roztloukání stovek kameňů začaly na překvapení sběratele vyplouvat daleko podivnější věci. Kromě běžných trilobitů a ramenonožců se zde totiž nacházely i zbytky organismů bez pevných částí těl, včetně řas nebo různých červovitých organismů. Společenstvo dostalo název Cabrières Biota podle nedaleké vinařské vesnice. Lokalita odkrývá horniny souvrství Landeyran stáří spodního ordoviku. Trilobitová biozóna s indexovým druhem *Apatokephalus incisus*, široce rozšířeným trilobitem s planktonními larvami, spadá do spodnoordovického stupně floian. Zdejší horniny se tak usazovaly v moři asi před 470 milionů let. Jsou tedy podobného stáří jako známé fezuatské břidlice v Maroku nebo klabavské souvrství pražské pánve v Barrandienu. Co je na tomto nálezu ale na-prosto výjimečné, je fakt, že se oblast ve spodním ordoviku nacházela velmi blízko jižního pólu. Poskytuje jedinečnou příle-





1 Cabrières Biota, umělecká rekonstrukce. V popředí se nachází řada trilobitů rodu *Ampyx* a rozmanité organismy s pevnou schránkou, včetně ramenonožců a hyolita (v levém dolním rohu). Za trilobity je zobrazen lobopod, klepítkatec, konulárie (žahavec, modře), houbovci (zeleně), tenké větvené řasy (červeně a zeleně) a kolonie graptolitů (polostrunatců, fialově), doplněné o několik měkkýšů. Vodní sloupec obývají členovci s dvoumiskovým krunýřem spolu s graptolity. Orig. Ch. McCall (Prehistorica Art, s laskavým svolením)

2 Běžný spodnoordovický trilobit rodu *Ampyx* s výrazným glabelárním trnem (glabela je osní část hlavového štítu). Délka jedince asi 2 cm
3 Drobní plži přichycení na úzké kónické schránce žahavce rodu *Sphenothallus*. Průměr plže je asi 1 cm.
4 Zkamenělina velkého houbovce patřícího pravděpodobně mezi rohovité (Demospongiae). Délka jedince je přibližně 8 cm.
5 Zbytek rozvětvené řasy. Délka asi 4,8 cm. Snímky: P. Gueriau



Doposud bylo na tomto nalezišti nasbíráno více než 400 kusů unikátních zkamenělin a jejich počet s pokračujícím výzkumem dále roste. Zkameněliny jsou uloženy v jílovcích až prachovcích a často zaujmou hnědým, červeným nebo oranžovým nádechem, což zvyšuje jejich vizuální atraktivitu. Celkově se Cabrières Biota svým zachováním velmi podobá již zmiňovaným

fezouatským břidlicím (více v Živě 2022, 3: 102–106). Zdejší nálezy zahrnují jak živočichy s biomineralizovanými schránkami (plže, trilobity, ramenonožce a další), tak i měkkotělé organismy (červovité živočichy, lobopody, řasy) nebo jen lehce sklerotizované organismy (klepítkatce). K detailnímu studiu chemického složení fosilií a podmínek fosilizace byly využity pokročilé analytické metody – např. energeticky disperzní rentgenová spektroskopie (EDX) a rentgenová absorpční spektroskopie v oblasti absorpční hrany (XANES). Zatímco EDX umožnila identifikovat přítomné prvky ve zkoumaných fosiliích (především železo), metoda XANES poskytla hlubší vhled do chemického stavu a okolního atomového uspořádání krystalů železa (železo je přítomno ve formě oxidů a hydroxidů), čímž přispěla k pochopení mechanismů zachování měkkých tkání v Cabrières Biota. Podařilo se potvrdit, že extrémně rychlý proces fosilizace vedl k mineralizaci i některých měkkých tkání. Kromě toho lze na některých fosiliích pozorovat černé vrstvy, které pravděpodobně představují uhlíkatý materiál.



žitost nahlédnout do ekosystémů, které existovaly v polárních oblastech v tak vzdálené minulosti a u nichž se nám zachovalo mnohem kompletnější společenstvo než na lokalitách s běžným způsobem fosilizace. Cabrières Biota zachycuje dávné společenstvo obývajících otevřené moře v polárních šířkách jižní polokoule, zhruba mezi 80° a 90° jižní šířky, na okraji superkontinentu Gondwana. Tento objev odstartoval několikaletý výzkum, na kterém jsme měli a stále máme čest se aktivně účastnit. Během postdoktorandské stáže na univerzitě v Lyonu ve Francii u Bertranda Lefebvra, který se intenzivně podílí na výzkumu této oblasti, byla první autorka tohoto článku v r. 2018 mezi prvními, kdo lokalitu navštívili. Druhý autor článku, tehdy působící v partnerském týmu na univerzitě v Lausanne, byl přizván díky své specializaci na trilobity a zkušenostem z míst s podobným způsobem zachování. Výsledky výzkumu mezinárodního týmu paleontologů publikoval časopis Nature Ecology a Evolution (Saleh a kol. 2024).

Život v polárním ordovickém moři

Jak tedy vypadalo společenstvo ordovického moře nedaleko jižního pólu? Na mořském dně dominovali řasy a houbovci – tvoří 26 % ze všech identifikovaných fosilií (obr. 1, 4 a 5). Tuto situaci známe z moderních polárních oblastí, kde obě skupiny hrají klíčovou roli v místních ekosystémech. Další velmi početnou skupinou byli členovci, přičemž trilobiti představují 12 % identifikovaných organismů. Z trilobitů jsou zde nejhojnější rody *Ampyx* (obr. 2), *Asaphellus* a *Colpocoryphe*, které potvrzují, že jde o společenstvo otevřeného šelfového moře. Mezi další členovce z této lokality patří např. vzácní klepítkatci. Rovněž

zde nacházíme měkkýše, především plže (obr. 3, 14 % identifikovaných organismů), ramenonožce (9 %), hyolity (7 %), z nichž někteří mají zachovalé zbytky trávicí soustavy, žahavce (6 %), především úzké kónické schránky patřící rodu *Sphenothallus* (obr. 3), a také jehlancovité schránky konulárií, graptolity (4 %), červovité živočichy (4 %), velmi vzácné ostnokožce (1 %) a lobopody (méně než 1 %). Taxonomickým složením Cabrières Biota kombinuje zástupce kambrické evoluční fauny (např. lobopody) s modernějšími ordovickými formami (např. klepátkatci), čímž ilustruje propojenost dvou významných biodiverzifikačních událostí – kambrické exploze a velké ordovické biodiverzifikační události (GOBE). Vědecká komunita se stále více přiklání k názoru, že jde spíše o jednu pozvolnou událost než o dvě časově oddělené epizody (Harper a kol. 2020).

Útočiště v polárních mořích?

Cabrières Biota představuje klíčovou část do paleontologické skládačky, která dává

možnost více porozumět životu v ordovických mořích. Při pohledu na ordovická lagerstätten zjistíme, že naprostá většina těchto lokalit se nachází v oblastech tehdejšího tropického až mírného pásu. Lagerstätten z polárních oblastí počátku ordoviku jsou vzácné a před objevem Cabrières Biota byly známy pouze dvě další. Nejznámější z nich jsou marocké fezouatské břidlice (blíže v již citované Živě 2022, 3). Druhá polární oblast, ve které můžeme občas narazit na výjimečně zachovalé zkameněliny, leží na našem území, v klabavském souvrství Barrandienu. Cabrières Biota je unikátní i tím, že jí dominují řasy a houbovci, hojně zastoupení mají také členovci a žahavci, což je podobné některým současným polárním ekosystémům.

Velká rozmanitost druhů na této francouzské lokalitě a jejich srovnání s dalšími oblastmi podporuje hypotézu o ordovické migraci organismů z tropů do vysokých zeměpisných šířek na jižní polokouli. Předpokládá se, že zde druhy hledaly útočiště před vysokými teplotami, které panovaly

v tehdejších tropických zónách. Na počátku ordoviku, v období intenzivního globálního oteplování, pravděpodobně někteří živočichové přežívali v refugiích ve vysokých zeměpisných šířkách, aby unikli extrémním teplotám rovníkových oblastí. Tato situace z dávné minulosti poskytuje cenný náhled do možné budoucnosti, kdy bude příroda čelit podobným klimatickým výzvám. Paleontologický záznam je unikátní knihou, která umožňuje studovat reakce organismů na globální oteplování i ochlazování.

Práce na článku byla podpořena programem Dynamická planeta Země (Strategie AV21/30) a institucionální podporou Geologického ústavu AV ČR (RVO 67985831). Výzkum M. Nohejlové byl podpořen interním grantem České geologické služby (číslo 311410), který je součástí Strategického plánu výzkumu České geologické služby (DKRVO/CGS 2023–2027).

Použitá literatura uvedena na webu Živy.

Vít Latzel

Epigenetická paměť je jedním z klíčů k přežití rostlin v proměnlivém světě

Před více než 10 lety, kdy jsem na stránkách tohoto časopisu poprvé psal o novinkách ze světa ekologické epigenetiky (Živa 2014, 6: 269–270), byla tato oblast, na rozdíl od již etablovaného epigenetického bádání na molekulární úrovni, na začátku svého poznání. Zjištění, že ne všechna dědičná variabilita je zapsána pouze v sekvenci DNA, bylo sice revoluční, ale stále jsme teprve mapovali, jak hluboce a rozsáhle mohou epigenetické mechanismy ovlivňovat biologické procesy a mezigenerační plasticitu. Rád bych proto seznámil čtenáře s pokrokem, který jsme na Botanickém ústavu AV ČR v daném oboru udělali.

Nejprve však ve zkratce připomeňme, že epigenetika je vědní obor, který zkoumá, jak se organismy přizpůsobují svému prostředí beze změny ve sledu bází DNA. Jde o studium řady procesů, kterými je modulována struktura chromatinu a zahrnují např. kovalentní modifikace DNA a s ní asociovaných histonů, výměnu histonů za jejich variantní formy, činnost proteinových komplexů zajišťujících sestavování chromatinu a jeho umlčování nebo aktivaci, a další strukturní změny chromatinu. Významným pokrokem posledních dvou desetiletí je poznání role RNA v těchto procesech, např. RNA interference jako iniciačního mechanismu pro transkripční i posttranskripční umlčování genů. Proces reguluje aktivitu genů v závislosti na vnějších podmínkách, jako je teplota, světlo

nebo stres. To je obzvlášť významné u rostlin, které jsou vázány na své stanoviště a na úspěšné adaptaci závisí jejich přežití. Je-li rostlina vystavena např. suchu, epigenetické mechanismy aktivují geny zodpovědné za hospodaření s vodou. Navíc tato epigenetická nastavení mohou být dědičná, potomci tedy mohou lépe čelit podmínkám, jež zažili jejich rodiče. Epigenetické procesy tak umožňují rostlinám, a nejen jim, interagovat s okolím a být odolnější vůči stresu.

Velký pokrok v oboru přinesla širší dostupnost přesných molekulárních metod, jako je celogenomové sekvenování umožňující přečíst kompletní sled nukleotidů v DNA. Navíc se dá zjistit, který cytozin, jeden ze čtyř nukleotidů DNA, je metylován. Metylace cytozinu patří asi k nejlépe

prostudovaným epigenetickým mechanismům, kdy se pomocí enzymatického navázání metylové skupiny na cytozin v oblasti promotoru patřičného genu zajistí, že daný gen v okolí takto upravených cytozinů bude většinou deaktivovaný (vypnutý), nebo přinejmenším jeho aktivita bude snížena. Aktivním navázáním nebo naopak odstraněním metylových skupin z cytozinů DNA lze tedy vypínat či zapínat geny a pomocí celogenomového screeningu jsme schopni tuto informaci získat.

V Botanickém ústavu se zaměřuji především na klonální rostliny, které tvoří podstatnou část mnoha ekosystémů – např. v lučních společenstvech mohou představovat až 70 % všech rostlin. Přestože hrají klíčovou roli v ekologii, jejich výzkum zůstává stále poněkud na okraji zájmu. Druhý, čistě pragmatický důvod je, že klonální druhy značně ulehčují studium epigenetických procesů. Klonální růst umožňuje vytvoření skupin nebo populací geneticky identických jedinců, kteří se však mohou lišit epigenetickou variabilitou. Pokud tedy mezi nimi pozorujeme fenotypové rozdíly, s vysokou pravděpodobností jsou způsobeny epigenetickými procesy, např. metylací cytozinu, nikoli genetickou odlišností. Dalším praktickým důvodem, proč se zaměřit na klonální rostliny, je fakt, že v průběhu klonálního rozmnožování se neuplatňuje meióza. K meióze dochází při buněčném dělení během pohlavního rozmnožování, slouží k vytváření pohlavních buněk, přičemž každá z nich obsahuje jen polovinu genetického materiálu jednoho rodiče. Při meióze se vymaže většina epigenetické variability získané rodiči během života, a tak se tato informace přenáší do další generace v omezenější míře než u potomků klonálních.

Nyní ale již k slíbenému výzkumu. Vše bych mohl shrnout tak, že jsme zjistili, že si rostliny pamatují překvapivě mnoho a „vzpomínky“ předávají potomkům, a to jak klonálním, tak i vzniklým pohlavním rozmnožováním. Tato paměť jim pomáhá lépe zvládat stres, který již jednou zažily,