

# Mezozoická vymírání s otazníky, světové anoxické události a změny biodiverzity

Historie života na naší planetě je poznamenána řadou krizí lokálních i globálních ekosystémů, z nichž mnohé vyústily v různě rozsáhlá vymírání. Během fanerozoika (asi 540 milionů let) jich lze napočítat desítky až stovky, ale pouze pět mělo to „štěstí“, že jim „nejvyšší“ forma recentního života, člověk, přisoudil přívlastek Velká pětka. V období před fanerozoikem (v prekambriu) tyto události určité probíhaly také (např. GOE – Great Oxygenation Event, doba výrazného zvýšení obsahu kyslíku v atmosféře před 2–2,4 miliardy let, musela být pro řadu tehdejších organismů kritická), ale relevantní paleontologické, geochemické nebo sedimentologické důkazy víceméně chybějí. Prvním z Velké pětky je extinkce v nejvyšším ordoviku, resp. na hranici ordoviku a siluru (O–S, před 435/443 miliony let), která výrazným způsobem ukončila růst biodiverzity – GOBE (Great Ordovician Biodiversification Event). Následuje druhé vymírání na hranici stupňů famen–frasn (374 milionů let) v nejvyšším devonu, nejrozsáhlejší proběhlo na hranici permu a triasu (P–T, 252 milionů let), na hranici triasu a jury (200 milionů let) a posledním je slavná událost na konci mezozoika, na hranici křídý a kenozoika (paleogénu, K–Pg, před 66 miliony let). Nové analytické metody, detailní biostratigrafie a geochemické analýzy upřesňují, a také mění některé tradiční pohledy na tato vymírání a odhalují i jiné mechanismy ovlivňující biodiverzitu – např. globální oceánské anoxické události.

Bezesporu nejdrastičtější vymírání v celém fanerozoiku se událo na hranici permu a triasu (paleozoika a mezozoika) a otevřelo novou a pro recentní biotu klíčovou etapu v dějinách Země. Gigantická vulkanická aktivita v oblasti centrální a západní Sibíře, na ploše asi 2–3 tisíce na 4 tisíce km, vrcholila právě na hranici P–T a měla téměř fatální dopad na globální ekosystém. Emise oxidů siřičitého a uhlíkatého ( $\text{SO}_2$  a  $\text{CO}_2$ ) způsobily řadu efektů, které se řetězily: kyselé deště, acidifikace oceánu, změna klimatu – výrazné oteplení, eroze a přírůstek materiálu z pevniny, eutrofizace a následně oceánské anoxie (pokles obsahu rozpuštěného kyslíku). Emise vulkanických plynů ještě umocnily emise tentokrát metanu uvolněného z uhelných ložisek, kterými procházely magmatické žíly. Dalším zdrojem byl šelf severní Sibíře, kde se po prohrátí sedimentu uvolnil opět metan, tentokrát z hydrátů metanu. Udává se, že kyslík v atmosféře poklesl na úroveň okolo 13 %. Znamenalo to konec poměrně komplexního, klimaxového permského ekosystému, jak mořského, tak kontinentálního. Mizí na 60–70 % terestrických faun (na úrovni rodů a téměř dvě třetiny čeledí, zejména obratlovců tetrapodů) a v mořích dosahuje extinkce přes 90 %. Mizejí kompletně paleozoické typy útesotvorných organismů a decimovány jsou i další složky permských společenstev, včetně planktonu a nektonu. Díky morfoloickým novinkám a výhodám (např.

způsobu dýchání) se na souších krátce po vymírání uplatňují zejména teromorfni plazi (terapsidi) a archosauři. Uvolněné niky počátku triasu představují laboratoř evolučních experimentů a již ve středním triasu vidíme nový ekosystém s rostoucí biodiverzitou.

Ale poměrně brzy i tento vzestup přerušila ekologická krize, na hranici triasu a jury. Otázkou je, zda skutečně šlo o vymírání *sensu stricto*, protože paleontologické záznamy ukazují spíše na postupný, etapovitý než katastrofický rychlý proces. Viníkem může být opět vulkanická aktivita, soustředěná do místa iniciálního rozpadu kontinentu Pangey v prostoru mezi Evropou, Afrikou a Severní Amerikou. V odborné literatuře se vulkanická oblast označuje CAMP (Central Atlantic Magmatic Province) a svými projevy a důsledky v menší míře kopíruje události na hranici P–T. Vymírání sice definitivně několik skupin (např. konodonti, pozorujeme úbytek útesotvorných organismů, na souších téměř všichni terapsidi, redukování jsou archosauři a řada dalších), ale vidíme určitou disproporci mezi vymíráním v oceánech a na kontinentech. Zatímco na pevnině o vymírání hovořit lze, dokazují to i sedimenty s vysokou koncentrací kostí obratlovců (bone-beds), v mořích jde spíše o výměny faun (možná způsobené nižší rychlostí vzniku druhů – speciací). To je dobře vidět na zřejmě nejpočetnější skupině mořských makrofosilií, hlavonožců

amonitech, kteří hned počátkem jury vytvářejí morfologicky velmi diverzifikovanou skupinu a celosvětově expandují.

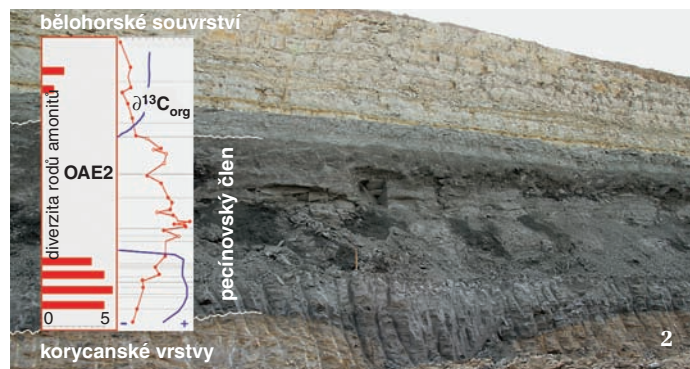
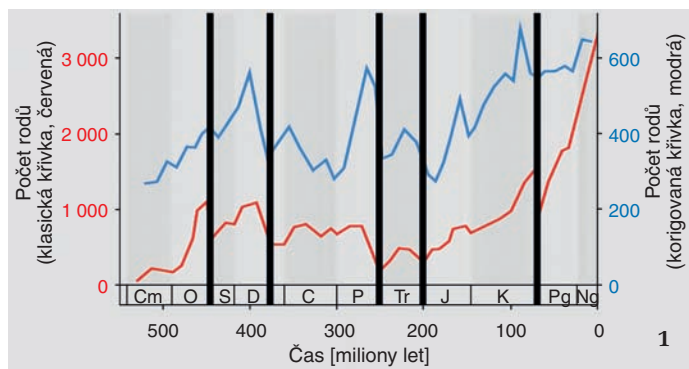
Pokud byl trias poznamenán hned několika událostmi, které ovlivnily biotu, o juře bychom mohli konstatovat, že je naopak jedním z nejklidnějších období (s výjimkou spodnojurské oceánské anoxie). Přesto konec jury znázorňuje tradiční Sepkoského křivka (Sepkoski 1989, obr. 1) jako interval s významným vymíráním. Ve skutečnosti v tomto intervalu nepozorujeme téměř žádné změny diverzity, ani výrazné oceánské, klimatické nebo geochemické události. Navíc nebyla hranice jury a křídý dosud přesně stanovena, mimo jiné i z výše uvedených důvodů, nicméně pracovní skupina stratigrafické subkomise již hranici navrhla a schválila (báze subzóny *Calpionella alpina* – druhu kalpionely typické pro oblast tropického oceánu Tethys). Představuje tedy jedinou hranici (dokonce mezi útvary), kde se nestalo vůbec nic. Pokud bychom v geologické historii hledali nejstabilnější podmínky a zřejmě i „nulovou“ speciaci, tak právě tady.

## Anoxické události, příčiny a důsledky

Výrazné poklesy obsahu kyslíku ve světových oceánech patří v posledních letech k intenzivně studovaným fenoménům geologické historie. Zejména proto, že představují klimatický model pro velmi teplá období, mají zjištělné počátky i konce a významně ovlivňují skladbu ekosystémů. Setkáváme se s nimi v paleozoiku (např. spodní silur, konec permu), ale převážně v mezozoiku. V období jury a hlavně křídý jsou spojovány s výraznými pulzy oteplení a mají značné dopady na biotu.

Rozpad především jižní části Pangey, tedy její gondwanské části a otevření severního Atlantského oceánu v kombinaci s abnormálně teplým klimatem (green house) bez polárního ledovcového pokryvu zapříčinily na počátku svrchní křídý nejvyšší zdvih hladiny světového oceánu v období fanerozoika (odhaduje se střízlivě na 200 m nad současným stavem). Zaplavení asi jedné třetiny kontinentů a vytvoření ploch absorbujících sluneční záření dále umocnilo nárůst průměrných globálních teplot na rekordní hodnoty. V podstatě bychom si mohli v polárních oblastech představit dnešní mírný klimatický pás s průměrnými ročními teplotami okolo 12 °C a diverzifikované lesní porosty opadavých i stálezelených rostlin. Oceánské hřbety (přímá úměra se zdvihem hladiny oceánu), tisíce km dlouhá pásemná pohoří podmořských sopek, produkovaly nejen dostatečné množství prvků, včetně kovů důležitých pro rozvoj mikroorganismů, ale zejména vulkanické plyny. Opět vydatný příspěvek k už tak teplému klimatu. A právě zvýšené množství  $\text{CO}_2$  v atmosféře v minulosti často doprovází globální anoxické události, podmínky v oceánech, kdy roste vodní sloupec výrazně nebo zcela ochuzený o kyslík. V mezozoiku tyto epizody označujeme jako OAE (Oceanic Anoxic Event) a trvají řádově první statisíce let. Samotný obsah  $\text{CO}_2$  v atmosféře ale OAE nezpůsobuje. Co je tedy příčinou? Příčin musíme hledat hned několik a během mezozoika se víceméně opakují. Vysoký stav hladiny oceánu implikuje vytvoření





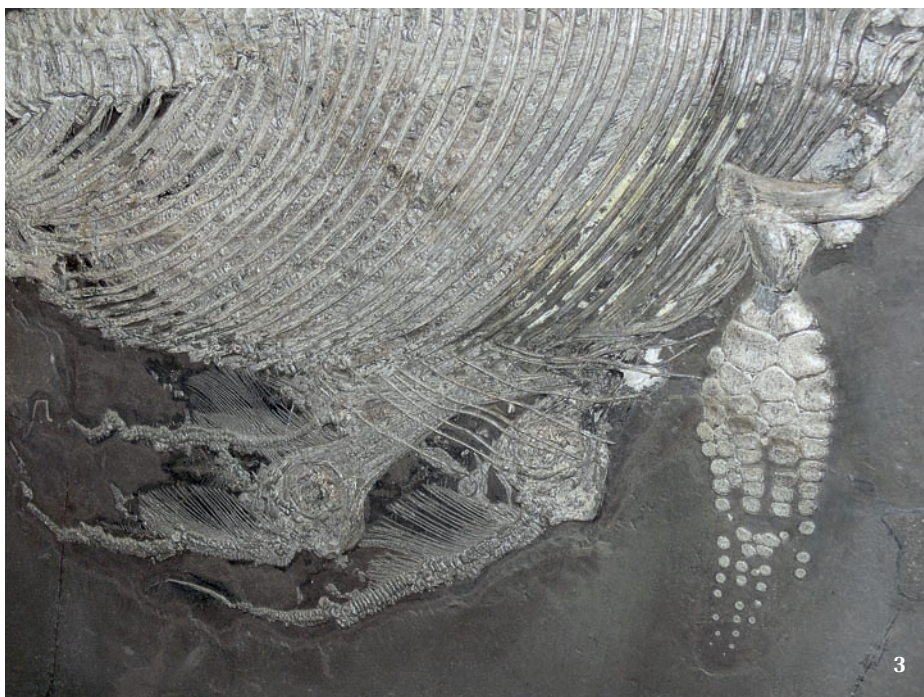
**1** Vymírání v geologické historii Země. Změny biologické rozmanitosti v oceánu za posledních 540 milionů let (během fanerozoika), kdy máme dostatečný fosilní záznam, zachycuje klasická křivka (červeně), která ukazuje vzestup rozmanitosti v kambriu a ordoviku, relativní stabilitu během prvohor až do konce permu (před čtvrt miliardou let) a poté pozvolný nárůst. Na křivce vidíme několik propadů (největší právě na konci permu) indikujících velká vymírání. Tradičně jich rozlišujeme pět (silné černé čáry), nicméně do značné míry jde o konvence – na konci každého tradičně vymezeného geologického období došlo k výměně fauny, tedy k vymírání a posléze nové radiaci, proto ostatně tato období vůbec rozlišujeme. Navíc u této klasické křivky je několik metodických problémů souvisejících s různou zachovalostí fosilního záznamu. Nejdůležitější je pull of the recent – tah přítomnosti, což zjednodušeně znamená, že zohledňujeme mladší fosilie a nadhodnocujeme biologickou rozmanitost tím víc, čím víc se blížíme přítomnosti. V první dekádě tohoto tisíciletí byla proto zkonstruována nová křivka (modře), očištěná od těchto problémů, na níž bychom měli ještě větší potíže najít právě pět masových vymírání – přestože největší, na konci permu, je také dobře vidět. Vymírání na hranici jury a křídla (J–K) – nové poznatky i stanovení hranice neukazují ve skutečnosti na žádnou extinkční událost. Orig. D. Storch, upraveno podle: J. J. Sepkoski (1989) a J. Alroy (2008, 2010)

**2** Anoxická událost OAE2 (Oceanic Anoxic Event 2) dokumentovaná na našem území – činný lom Pecínov. Anoxické podmínky kulminují přibližně uprostřed pecínovského členu (červeně – pozitivní posun hodnot  $\delta^{13}C_{org}$  – značí nárůst bioproduktivity a pohřbení množství organické hmoty v sedimentu); modrá křivka – změny diverzity organismů. Diverzita amonitů dosahuje nejvyšších hodnot při bázi pecínovského členu, následně zcela chybí a znovu se objevují až od spodní části bělohorského souvrství. Jde již ale o nové rody, žádný cenomanský taxon hranici nepřechází. Upraveno podle: M. Košťák a kol. (2018)

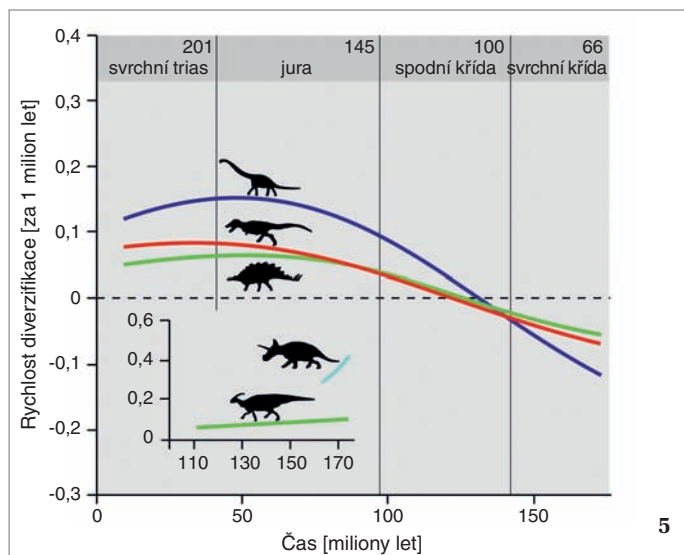
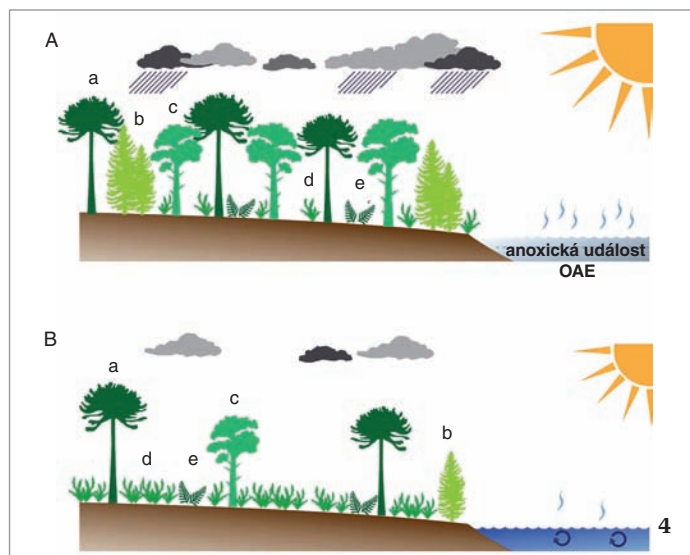
**3** Nenarození i právě narození ichtyosaurů zachované ve spodnojurských anoxických sedimentech (TOAE, Toarcian Oceanic Anoxic Event) lokality Holzmaden v Německu. Celé skelety, často s mineralizovanými měkkými částmi těl, také dokazují absenci dekompozitorů na mořském dně během vrcholící anoxie. Foto M. Košťák

mělkých, dobře prosvětlených a zpočátku i dobře prokysličených moří. Vulkanická aktivita a přínos živin z pevniny bohatě dotují primární producenty i konzumenty živinami. Nastává víceméně nekontrolovaná exploze bioproduktivity, kterou nejsou společenstva bakterií schopna rozkládat ve vyšších částech vodního sloupce. Organická hmota se hromadí v sedimentech mořského dna, kde podléhá rozkladu díky anaerobním bakteriím. Vznikají bakteriální maty (vrstevnaté povlaky) a jako metabolické produkty se uvolňují např. sirovodík a metan, čímž se vytváří prostředí vhodné pro další anaerobní organismy. Při omezených cirkulacích tak roste výška vodního sloupce výrazně ochuzeného o kyslík, který dosáhne až šelfových, litorálních úrovní. V sedimentárním záznamu se projevuje výskytem tmavých sedimentů a značným posunem hodnot stabilního izotopu  $^{13}C$  (obr. 2).

Celý proces lze velmi pěkně sledovat na změnách společenstev organismů. Epizoda OAE proběhla v mezozoiku hned několik a všechny se významnou měrou podílejí na změnách společenstev, biodiverzity i na vymírání. Mezi nejslavnější, tedy největší, patří spodnojurská TOAE (Toarcian Oceanic Anoxic Event), spodnokřídová OAE1 (v období aptu–albu) a svrchnokřídová OAE2 (na hranici cenomanu a turonu). TOAE proslavily nálezy artikulovaných koster mořských plazů (ichtyosaurů, plesiosauridů, krokodýlomorfů a dalších, obr. 3)







Rychlost jejich speciací a iterací (opakování forem v novém kontextu) rovněž patří k rekordním v rámci mnohobuněčných.

Interval OAE2, dobře dokumentovaný i na našem území (obr. 2), má podobné příčiny i průběh jako TOAE. Představuje ale, mimo vymírání bentosu (např. mlžů rudistů), zároveň výraznou etapu vymírání nektonu, např. amonitů a řady dalších. Po této události pozorujeme zvýšenou rychlost evoluce heteromorfních typů amonitů a jejich přechod k benthickému způsobu života. Změny u hlavonožců korelují s nástupem nových skupin obratlovců (viz níže). Vymírání spojené s OAE2 přineslo významné změny v následné diverzifikaci mělkovodních faun pozdní křídly. Nové výzkumy navíc ukazují i přímou souvislost oceánských OAE se změnami v kontinentálních ekosystémech, nově byly zjištěny především změny ve složení rostlinstva (Heimhofer a kol. 2018, obr. 4).

### Diverzita v křídových ekosystémech

Křídový útvar patří bezesporu k jednomu z nejvýznamnějších období historie Země z hlediska biotických a paleogeografických proměn světa. Dokončil se rozpad kdysi souvislé Pangey a vytvořily se moderní kontinenty, probíhala vulkanická (kontinentální i podmořská) aktivita, řada dílčích i globálních vymírání, výměny faun a flór, intenzivní speciace a vytvoření nových evolučních i koevolučních trendů. Obecně můžeme konstatovat, že recentní ekosystém má základ právě v křídě a současná biodiverzita je výsledkem přežití mnoha vývojových linií organismů na hranici K–Pg.

Mořské křídové ekosystémy prodělávají obecně výrazné proměny, mizejí některé typicky triasové a jurské skupiny (např. ichtyosauri), objevují se nové skupiny obratlovců, včetně vrcholných predátorů – mosasaurů a skupin moderních žraloků. Pozorujeme akceleraci ve fylogenezi amonitů, vytváření aberantních (projevujících se odchylným vinutím spirální schránky) nebo gigantických forem. Rovněž u belemnitů dochází ke klíčovým změnám v morfologii a výraznější ochraně hydrostatického aparátu (Živa 2005, 3: 125–128). Ve stejném období roste diverzita malakofágických paryb a objevují se adaptace chrupu u mosasauridů. Kromě hlavonožců k tomu

přispívá i diverzifikace a rozšíření křídových mlžů včetně útesotvorných rudistů. Na závěr pozorujeme jak konkurenční, tak přímý predáční souboj o potravu a prostor mezi vrcholnými predátory – žraloky a mořskými plazy. Je vysoce pravděpodobné, že za snížením diverzity mořských plazů během pozdní křídly stojí právě žraloci.

V rámci křídových kontinentálních ekosystémů dochází k zásadním změnám v rostlinstvu. Vznik krytosemenných, podle posledních výzkumů datovaný už do období pozdní jury, a jejich rychlá speciace během spodní křídly výrazně zrychlila radiaci hmyzu, včetně vzniku sociálně žijících skupin. Téměř invazní nástup kvetoucích rostlin a jejich dominance při hranici spodní a svrchní křídly mění floristické období mezofytika (s dominancí nahosemenných) na kenofytikum, které trvá do současnosti. Bezobratlí nejsou jedinou skupinou reagující na změnu rostlinného ekosystému. Přizpůsobit se musí i ikonická skupina druhohor – dinosauři. Na příkladu bizarních stegosauridů, herbivorů adaptovaných na spásání mezofytické vegetace (cykasů a benetitů – *Cycadales* a *Bennettitales*), lze pozorovat úbytek diverzity spojený právě s ústupem cykasovitých. Vyhynutí stegosauridů na začátku spodní křídly nápadně souvisí s pulzem nástupu krytosemenných rostlin a redukcí biotopů nahosemenných. Jiná zajímavá interakce rostlin a dinosaurů se možná projevuje na kosterních zbytcích dinosaurů, a to zvýšeným výskytem nádorů. Může mít souvislost s toxicitou nových rostlin, tedy obranným mechanismem vyvinutým zřejmě proti nadměrnému spásání. A do třetice, podrobná analýza taxonů křídových dinosaurů (Sakamoto a kol. 2016) ukazuje na zřetelný pokles diverzity. Fylogenetický přístup (Bayesovská fylogenetika) odhalil alarmující skutečnosti – ztrátu evoluční dynamiky a pokles rychlosti speciací hranicí s vymíráním, tedy neschopnost nahradit zhytnulé druhy novými v rámci fylogeneze u všech (sub)kladů dinosaurů (Ornithischia, Theropoda a Sauropodomorpha) již desítky milionů let před hranicí K–Pg. Ovšem u dvou specializovaných skupin ornithischidních herbivorních dinosaurů, hadrosauridů a ceratopsidů, nastává opačný trend, ukončený až v závěru

křídly (obr. 5). Radiace jiné a současně velmi úspěšné skupiny dinosaurů – ptáků začíná ve spodní křídě a nepochybně souvisí s rozvojem hmyzu. Výsledkem je vytvoření silné konkurence jiné skupině létajících obratlovců – pterosaurům.

### K–Pg hranice – mezozoický Armagedon?

Tento hraniční interval je snad nejprozkoumanější hranicí v geologické historii, milimetr po milimetru, stovky a tisíce studií, geochemických a mikropaleontologických analýz... a stále neznáme relevantní odpověď, co se skutečně odehrálo a s jakým dopadem na celkovou biotu. Ale začneme od začátku. Hranice křída–paleogén (mezozoika a kenozoika) je charakterizována výraznou anomálií výskytu jinak vzácného těžkého kovu iridia, které dokládá dopad meteorického tělesa. Není bez zajímavosti, že podobná vrstva obohacená iridiem byla zaznamenána i v blízkosti hranice J–K v Arktidě (obr. 6), zde jsou však zdrojem iridia sibiřské vulkanity (stáří hranice P–T). Dokladem dopadu vesmírného tělesa jsou i výskyt fullerenu (molekul s atomy uhlíku v uzavřeném tvaru míče), šokových křemenů a diamantů. Tato událost má jako jedna z mála i známého pachatele – důkazem je kráter Chicxulub v Mexiku (impakťová teorie a syntéza předpokládaných událostí souvisejících s dopadem meteoritu byla erudovaně zpracována v knize V. Sochy Poslední den druhohor, Vyšehrad 2018). Zdálo by se tedy, že je vše jasné a články v nejprestižnějších vědeckých časopisech, média, televizní dokumenty a rekonstrukce mohou naplno ukázat a ukazují „soudný den druhohor“ jako definitivní konec tehdejšího světa v té nejhrůznější podobě. Střídají se tsunami, požáry, nukleární zimy, přehřátí planety, kyselé oceány, anoxie a další doprovodné jevy, letální téměř pro vše živé. Tento scénář však neodpovídá ani fosilnímu záznamu, ani diverzitě dnešních organismů. Meteorit nepochybně dopadl a významně ovlivnil tehdejší ekosystém (fatální pro neptačí dinosaury a zejména pro ekosystémy Severní Ameriky). Bylo by ale naivní se domnívat, že šlo o jedinou příčinu.

V oceánech a mořích pozorujeme během svrchní křídly snižování diverzity (a významnou roli hrají mimo jiné zmiňované anoxické události) mnoha skupin mezo-

**4** Změny vegetace v oblastech mírného pásu v obdobích anoxických událostí. A – při převažujícím velmi teplém a vysoce humidním klimatu se dařilo jehličnatým lesům s menším podílem krytosemenných rostlin. B – pulzy ochlazení v rámci OAE podměnily vznik otevřenější krajiny s vegetací savanového typu a převahou krytosemenných (pyl typu *Normapoles*); *Araucariaceae* (a), ostatní jehličnany (b), *Cupressaceae* (c), krytosemenné včetně forem produkujících pyl typu *Normapoles* (d), kapradiny (e). Upraveno podle: U. Heimhofer a kol. (2018), s laskavým souhlasem

**5** Poměry speciací a extinkcí hlavních skupin dinosaurů během mezozoika. Kladné hodnoty diverzifikace pozorujeme přibližně do hranice spodní/svrchní křída, od této hranice klesá schopnost nahradit vyhynulé taxony novými (v rámci jednoho milionu let – hodnoty pod nulou, čárkovaně) a přechází do hodnot vymírání. Opačný trend ukazují v rámci řádu Ornithischia skupiny ceratopsidů a hadrosauridů, u kterých je výrazný, resp. mírný vzrůst speciace ke konci křídly. Orig. R. Bošková, upraveno podle: M. Sakamoto a kol. (2016)

**6** Iridiová anomálie, tentokrát při hranici jury a křídly (asi před 150 miliony let). Obohacení vrstvy tímto těžkým kovem v arktické oblasti (Barentsovo moře, severní Sibiř) je dáno snížením sedimentace v rámci otevřeného oceánu a přínosem materiálu z oblasti sibiřských bazaltů. Iridium je zde, na rozdíl od hranice K–Pg (křída–paleogén), vulkanogenního původu a není doprovázeno ostatními ukazateli typickými pro dopad meteoritu, jako jsou např. fullereny nebo šokové křemeny. Poloostrov Nordvik, moře Laptěvů. Blíže v textu. Foto M. Košťák a M. Mazuch

zoických živočichů – z nejznámějších např. mlžů rudistů a inoceramidů, amonitů, belemnitů, mořských plazů, ale jsme také svědky speciací skupin nových. Po několika pulzech menších vymírání a výměn mořských faun během svrchní křídly přichází výrazné snížení diverzity taxonů v období maastrichtu (poslední stupeň křídly). Vymírají inoceramidní mlži a zřejmě i rudisti (výrazně se redukuje jejich útesy), belemniti se dožívají K–Pg hranice pouze jediným druhem, amoniti (asi pět rodů) tuto hranici dokonce krátkodobě přežívají – jejich vyhynutí na počátku kenozoika může indikovat okyselení oceánu, ale i vyčerpání evoluční fitness skupiny. Z vrcholných predátorů vymírají již málo diverzifikovaní mořští plazi, naopak žraloci přežívají. Statistické zhodnocení míry vymírání mořských organismů na K–Pg je i přes relativně dobrý sedimentární záznam komplikované. Důležité je slovo „relativně“, protože mnoho publikovaných profilů s paleontologickými daty (přejímaných mnohými autory) prezentuje svrchní až nejvyšší maastricht jako K–Pg hranici. Ve skutečnosti ale samotnou hranici nezachycuje – většinou z důvodu hiátu (mezery) v sedimentaci hraničního intervalu. Ještě složitější a smutnější je situace v kontinentálních profilech, zde můžeme s mořskými profilem v podstatě přesně korelovat pouze iridiovou vrstvu.



Na diverzitu hlavně dinosaurů se tak nepřímo usuzuje z podložních sedimentů a jako důkazy, že zde mohli existovat, jsou předkládány analýzy ukazující, že prostředí nedoznalo změn a bylo pro jejich život optimální. Ale kde jsou dinosaurů? A kdy skutečně mizejí?

S velkou slávou prezentovaný úlomek rohu ceratopsida nalezený necelého půl metru pod iridiovou vrstvou je „jasným důkazem“, že žili na K–Pg hranici, zatímco stejné úlomky a rozptýlené (disartikulované) kosti nad K–Pg jsou označovány jako redeponované, druhotně uložené... V tuto chvíli jsou jediným relevantním důkazem stopy hadrosauridů asi 30 cm pod iridiovou anomálií (souvřství Hell Creek v Montaně). Do hranice K–Pg chybějí ale stále tisíce, možná první desítky tisíc let. Jen těžko si lze představit katastrofické vymření dinosaurů bez jejich masových hrobů, miliony dinosaurů po celém světě, kteří zahynuli v tak krátkém časovém okamžiku (třeba i roky nebo desítky let po dopadu meteoritu) a není po nich ani památky (ani ve faciích, které kosterní zbytky dinosaurů obvykle obsahují – např. delty řek), zejména když sedimenty s bone-beds doprovázejí vymírání na hraničních P–T a T–J. To, že dinosaurů záznamy končí ještě pod K–Pg hranicí, je znepokojující a nastoluje řadu otázek. Nakonec není zcela pravda, že kontinentální ekosystémy nejvyšší křídly neprošli žádnou změnou. Na příkladu slavného souvrství Hell Creek můžeme demonstrovat výrazný posun ve výzkumech – na jedné straně detailní vzorkování ukazuje větší diverzitu dinosaurů (ale i dalších živočichů, Stein 2019) v rámci ideálního biotopu meandrujících řek a bohaté vegetace pod K–Pg hranicí, než byla známa, na straně druhé podrobný sedimentologický výzkum odhalil skutečnou stratigrafickou polohu Hell Creeku – hranici K–Pg toto souvrství nepřechází. Nadložní formace Fort Union, typická sloje uhlí, totiž začíná sedimentovat již v nejvyšším maastrichtu, a to uhelnou slojí a nadložními jíly obsahujícími iridiovou vrstvu (Fastovsky a Bercovici 2016). V sedimentárním záznamu tak na souvrství Hell Creek ostře (erozivně) nasedá souvrství Fort Union, což znamená přerušení sedimentace. Tím se poslední prokazatelně

známé zbytky křídlových dinosaurů trochu vzdalují K–Pg hranici. Tato hranice představuje i významnou environmentální událost – zaplavení rozsáhlých biotopů Severní Ameriky v nejvyšším maastrichtu.

Klimatické a environmentální změny na konci křídly lze spojovat i s intenzivní vulkanickou činností. Podobně jako iridium z meteoritu můžeme dohledat celosvětově sopečné emise obsahující rtuť, a to z jednoho vulkanického centra – Dekkanu v Indii. Vulkanická činnost podobného rozsahu sehrála roli při dvou předcházejících vymíráních. Bylo tomu tak i nyní? Určitě přispěla k ekologickým změnám globálního charakteru, ale nejsme zatím schopni určit míru vlivu na tehdejší ekosystém. Probihala ve třech fázích, přičemž největší, druhá fáze, dosahuje maxima těsně před K–Pg hranicí. Je tedy možné, že dopad meteoritu sehrál roli na západní polokouli, zatímco vulkanismus na východní. Objevily se také studie ukazující další velký kráter meteorického původu stejného stáří v Bombajském zálivu (Šiva) a stále není uspokojivě dořešeno možné dvojí stáří (diachronicita) iridiové vrstvy nebo výplň chixulubského kráteru křídlovými sedimenty. Problém samotné hranice a vymírání K–Pg není vyřešen mimo jiné i kvůli tomu, že stále hledáme jednu příčinu. Ve skutečnosti se ale nabízí celý soubor událostí, abiotických i biologických.

Rozluštění příčin tohoto vymírání se nejspíše skrývá v jeho selektivitě. Téměř všechny fylogenetické linie současných živočichů a rostlin mají své zástupce nebo původ už v mezozoiku a zejména v křídě. Některé byly na K–Pg výrazněji redukovány, jiné nikoli. Přežily organismy obývající různá prostředí a niky, to nakonec umožnilo zachování a růst biodiverzity na počátku kenozoika. Tím se otevírá i jiná otázka – jaký byl skutečný rozsah vymírání? Stále se objevují skupiny, které přežily K–Pg, nověji např. kapradosemenné rostliny a benetity v australské oblasti až do oligocénu (McLoughlin a kol. 2008 a 2011). Nakonec i dinosaurů se dočkali renesance, dnes jich žije v podobě ptáků okolo 10 tisíc druhů oproti zhruba 5,5 tisícům druhů „vítězných“ savců.

Použitá literatura uvedena na webu Živý.