

Mladší paleozoikum: od močálů k polopouštím

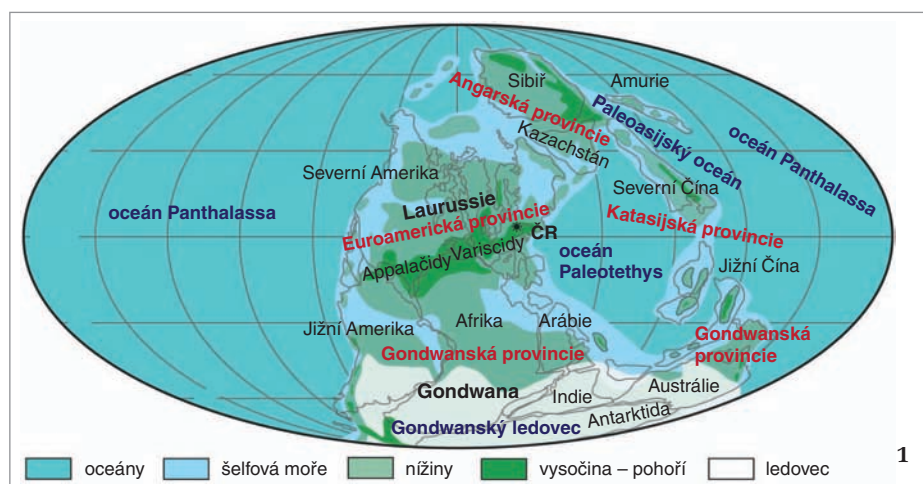
Mladší paleozoikum zahrnuje více než 100 milionů let geologické historie Země předcházející éře dinosaurů. Tvoří ho dva útvary – karbon a perm; období zahrnující oba útvary se často zkracuje na permokarbon. Starší karbon bývá spojován s představou pralesů bizarních přesliček a plavuní v mlžném oparu tropických močálů, jejichž pozůstatkem jsou dnes sloje černého uhlí. Vody řek a jezer se hemžily obojživelníky a sladkovodními žraloky, ve vzduchu kralovaly obří vážky decimetrových rozměrů. Perm si pak vybavujeme spíše jako polopouštní krajinu s pokryvem nahosemenných rostlin, především jehličnatých walchií. V permu se lépe dařilo živočichům přizpůsobeným suššímu podnebí, např. plazům. Nemalou zásluhu na tradiční představě mají obrazové rekonstrukce akademického malíře Zdeňka Buriana (1905–1981) pod taktovkou našeho významného paleontologa a popularizátora Josefa Augusty (1903–1968). Ačkoli v základních rysech tento pohled i po více než půl století stále platí, nové poznatky z uplynulých dvou desetiletí ukazují, že je výrazně zjednodušující.

Dnes tuto 359–252 milionů let vzdálenou kapitolu historie Země vidíme s podstatně komplexnější klimatickou dynamikou, zahrnující nejen pozvolnou aridizaci podnebí v horizontu několika desítek milionů let, ale i klimatické oscilace mnohem kratšího trvání. To vše na pozadí formujícího se superkontinentu Pangea. Permokarbon je tak po všech stránkách zajímavou částí historie a stojí za to se na něj podívat detailněji.

Paleogeografie: od menších kontinentů k obřím superkontinentu

Formování superkontinentu Pangea byl dlouhodobý proces, započatý již v devonu a vrcholící na přelomu paleozoika a mezozoika. Základem se stalo spojení dvou tehdy největších kontinentů, Laurussie (zahrnující jádra dnešní Severní Ameriky a Evropy) na severní polokouli a větší Gondwany na polokouli jižní. Kolize v rovníkovém pásmu vyvrcholila na přelomu devonu a karbonu. Dále k východu se v průběhu staršího karbonu (mississippi) k Laurussii

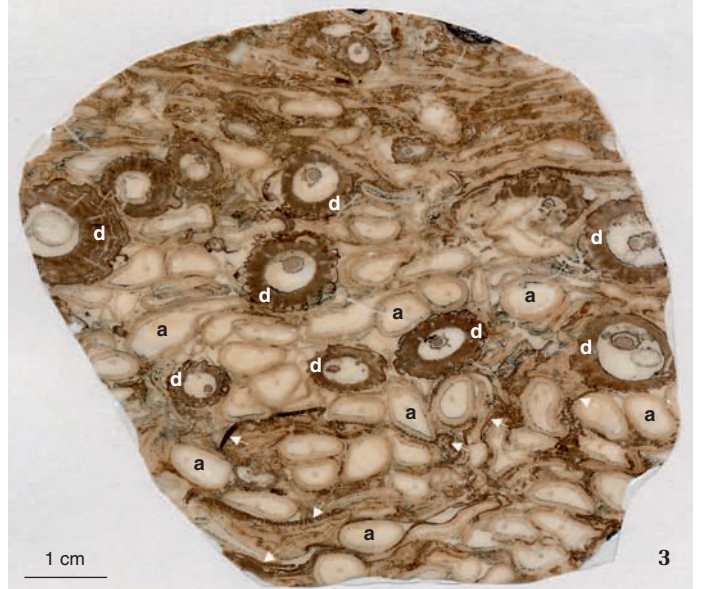
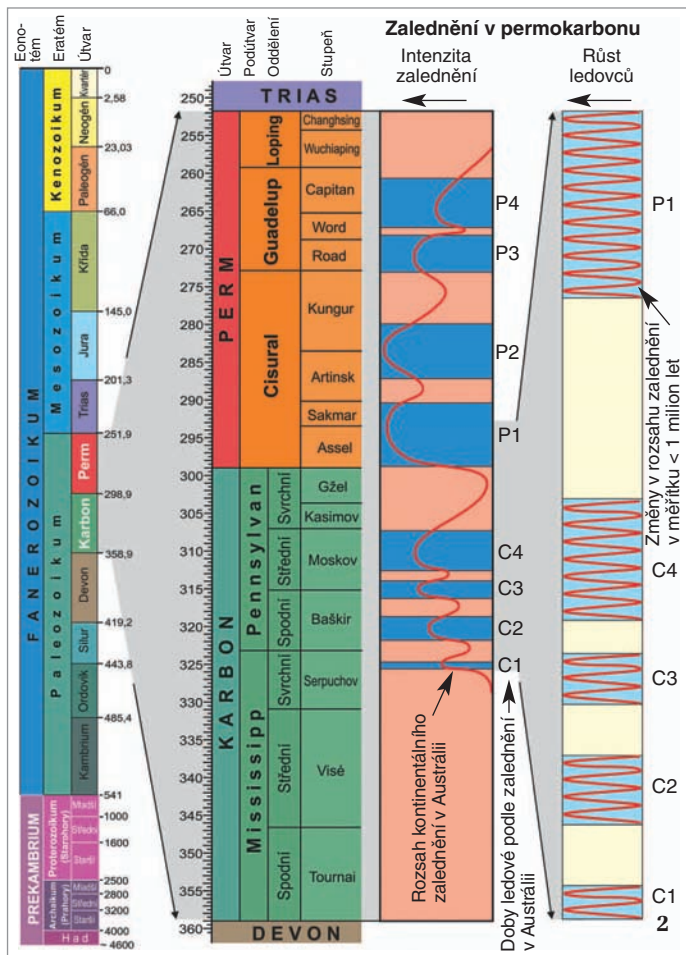
přičlenily drobné pevninské bloky, v geologické terminologii zvané terány, v geografickém pojetí ostrovy. Výsledkem všech těchto kolizí byl několik tisíc kilometrů dlouhý horský pás podrovníkového směru. Evropskou část tvořily Variscidy, americkou Appalačidy. Jeho součástí byl i Český masiv – geologický základ území dnešní České republiky (obr. 1). Vznikl stmelěním původně samostatných teránů moldanubika, bohemia, saxothuringika (dohromady tvořily lugodanubikum) a brunovistulika (základ dnešní Moravy a přilehlé části Slezska). Při jejich amalgamací (spojování) postupně zanikaly existující sedimentární pánve založené ve starším paleozoiku a po odeznění kolizních procesů se na povrchu Českého masivu vytvářely pánve nové, téměř výhradně s kontinentální výplní. Dnes jsou cenným archivem informací nejen o postupném formování Českého masivu, ale také o klimatických změnách v průběhu mladšího paleozoika i reakcích bioty na časté změny podnebí.



Klima: doba ledová není jen pleistocén
Střídání glaciálů a interglaciálů není pouze výsadou geologicky nedávného pleistocénu, ale docházelo k němu i v průběhu mladšího paleozoika. To je totiž obdobím jednoho z nejmohutnějších a nejdelších zalednění v celé historii fanerozoika dlouhé 540 milionů let. Mladopaleozoická doba ledová se začala ozývat již počátkem stupně serypuchov před 325 miliony let (obr. 2), kdy se poprvé setkáváme s pravidelnými oscilacemi mořské hladiny v rytmu měnícího se rozsahu kontinentálního zalednění. Hlavní vlna „chlada“ však přišla až o dva miliony let později a projevila se zdvihy a poklesy hladiny přesahujícími místy 100 m. Tyto oscilace vedly k pravidelným posunům březní linie o desítky až stovky kilometrů, ale vzácností není ani víc než tisíc kilometrů. Během doby meziledové, za vysokého stavu hladiny světového oceánu, lemovala okraje Pangey rozlehlá šelfová moře, zatímco v glaciálech se obnažené šelfy změnily v nížiny porostlé podivuhodnými mokřadními lesy. Zalednění pokračovalo až do permu. „Tečku“ za 70 miliony let doby ledové udělala až zechsteinská transgrese (zdvih mořské hladiny a zaplavení souše) před 258 miliony let. V Durynsku je s ní spojen vznik ložisek mědinových břidlic těžných od středověku.

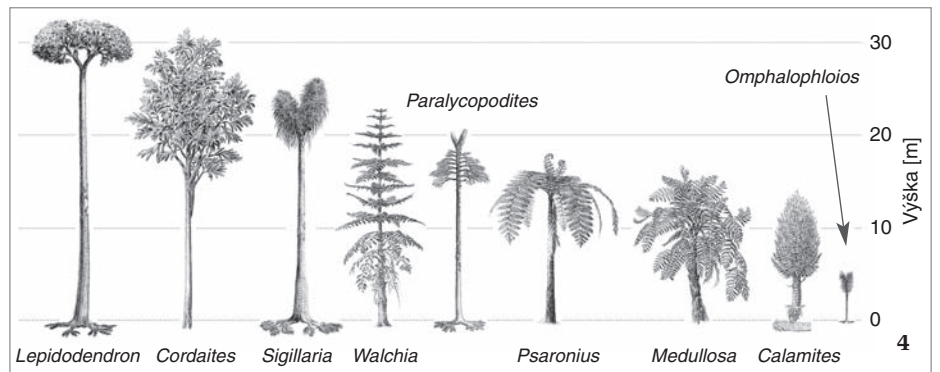
Dokladů o zalednění v mladším paleozoiku existuje celá řada, přímých i nepřímých. Přímé pocházejí z oblastí, které v permokarbonu ležely ve vyšších zeměpisných šířkách původního kontinentu Gondwana, a byly tudíž zaledněny. Svědectvím po ledovcích jsou zde nejen erozní tvary vymodelované do skalního podloží, ale především až několik set metrů mocné zrnitostně nevytřídněné ledovcové uloženiny zvané til, které původně tvořily geomorfologické útvary – morény. Jejich pozůstatky nacházíme např. v Indii, Austrálii, jižní Africe a na mnoha místech Jižní Ameriky včetně Peru a Brazílie. Dnešní výskyt v nízkých zeměpisných šířkách dělal geologům, v době před teorií litosférických desek, objasňující pohyb kontinentů, vrásky na čele. Jediným tehdy možným vysvětlením bylo zalednění sahající až do oblasti dnešních subtropů. Intenzivní datování v uplynulých dvou desetiletích ukázalo, že ledovcové uloženiny vznikaly v průběhu osmi menších, kolem 1,5 až 9 milionů let dlouhých intervalů, oddělených podobně dlouhými teplejšími obdobími se spornými projevy zalednění. Mladopaleozoická doba ledová je tedy spíše skupinou několika kratších dob ledových, z nichž každá je délkou srovnatelná s pleistocénem. Detailní sedimentologické studium rovněž odhalilo, že se v jejich profilu střídají morénové sedimenty s uloženinami glacioluvialními, vzniklými přeplavením tilu vodou z tajících ledovců. Jsou tak dokladem střídání glaciálů a interglaciálů v intervalu kratším než jeden milion let, tedy v podobném či stejném rytmu jako v pleistocénu. Za jejich vznikem stojí cyklické změny orbitálních parametrů zemského tělesa, především pak výstřednosti oběžné dráhy

1 Paleogeografie světa uprostřed pennsylvanu v mladší části karbonu, asi před 315 miliony let, s vyznačením hlavních kontinentů a floristických provincií



Země okolo Slunce, úklonu zemské osy a jejího pohybu, při němž rotující osa opisuje kuželovou plochu. Tyto zdánlivě malé změny ovlivňují v měřítku stovek, případně desítek tisíc let množství slunečního záření přijatého Zemí (insolaci) a jeho distribuci do různých zeměpisných šířek v řádu procent. Na jejich základě vysvětlil srbský matematik, astronom a klimatolog Milutin Milanković (1879–1958) střídání pleistocenních glaciálů a interglaciálů.

Za projev klimatických oscilací v oblastech mimo zalednění považujeme zmíněné glacieustatické zdvihy a poklesy mořské hladiny, vedoucí k plošně rozsáhlým a pravidelně se opakujícím transgresím a regresím. Sedimentární záznam těchto oscilací má podobu cyklotém – zákonitě vertikální posloupnosti sedimentů ukládaných v různých po sobě jdoucích terestrických a mělkomořských prostředích. Glacieustatický původ těchto cyklů byl poprvé zmíněn ve 30. letech při studiu uhelných pánví v Severní Americe. Trvalo však ještě více než půl století, než byla tato hypotéza akceptována. Existují totiž i další nezávislé a souběžně se uplatňující lokální mechanismy vzniku cyklického záznamu, které mohou identifikaci glacieustatických cyklů ztížit. Tyto cykly bývají několika řádů – podle různé intenzity mořské záplavy. Liší se tak délkou, kterou se v posledním desetiletí podařilo s rozvojem metod radioizotopové geochronologie výrazně zpřesnit. Hlavní cyklotémy odpovídají Milankovićovým astronomickým cyklům krátké a dlouhé excentricity s periodou přibližně 100 a 400 tisíc let. Menší cyklotémy nejspíše představují záznam kratších cyklů – změn v úklonu zemské osy, případně precesní pohyb (krou-



živý pohyb zemské osy po plášti dvojkružle) s periodami v desítkách tisíc let. Jejich datování je však již pod rozlišovací schopností radioizotopové geochronologie. Vzhledem k pravidelnosti orbitálních cyklů krátké a dlouhé excentricity (astronomové je považují za kvaziperiodické) lze jejich sedimentární záznam využít k vytvoření cyklostratigrafických modelů, kde každý z těchto cyklů představuje stejný úsek geologické historie. Pokud jsou součástí vrstevního sledu sedimentární pánve vrstvičky sopečného popela s magmatickými minerály vhodnými k datování (nejčastěji zirkon), pak lze takový model kalibrovat radioizotopovým stářím vulkanogenních materiálů a „ukotvit“ ho přesně na časovou osu historie Země. V takto kalibrovaném modelu se můžeme pohybovat v časovém rozlišení odpovídajícím délce cyklů.

Tento základní vzorec pravidelných glacieustatických oscilací je kombinován s oscilacemi vyššího řádu zaznamenanými v podobě nepravidelných transgresí trvajících několik milionů let, následovaných

podobně dlouhými regresemi. Původ dlouhodobých trendů, rekonstruovaných např. v doněcké pánvi, není zcela jasný. Zřejmě souvisí se střídáním zmíněných kratších dob ledových a teplejších intervalů mezi nimi. Výsledná křivka vzniklá kombinací obou typů klimatických výkyvů je tak jedním z dokladů komplexní klimatické dynamiky mladších prvohor. Jak pravidelné, insolaci řízené klimatické oscilace v měřítku desítek a stovek tisíc let, tak intenzivnější klimatické výkyvy zaznamenané v podobě transgresí a regresí dlouhých několik milionů let jsou dále spojeny s aridizačním trendem po několik desítek milionů let zmíněným v úvodu. Do konceptu doby ledové však moc dobře nezapadají. Názorů na jeho původ je hned několik. Nejpravděpodobnější se jeví uzavírání oceánů oddělujících pevniny a vznik superkontinentu Pangea, jehož rozsáhlé vnitrozemí trpělo nedostatkem srážek. Tato představa je v hrubých rysech v souladu s časovými parametry postupného spojování kontinentů v jediný celek. Co ale způsobilo náhlé, nej-

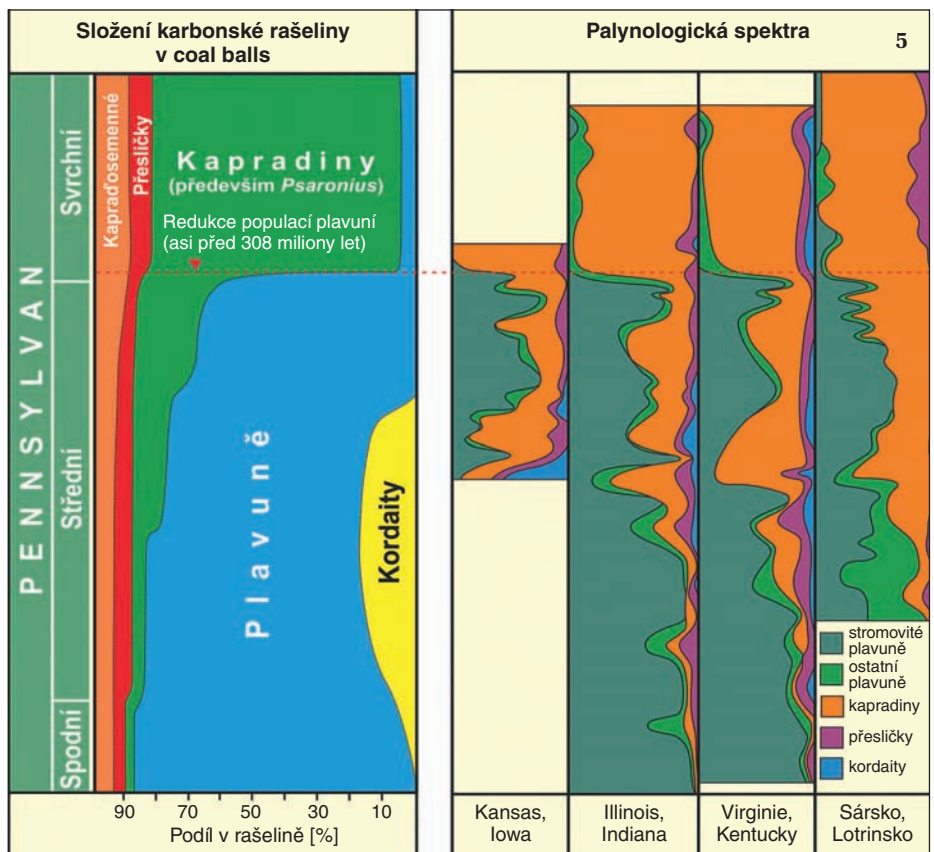
2 Chronostratigrafická škála geologické historie Země s detailním členěním karbonu a permu. Dva pravé sloupce zachycují klimatické oscilace v průběhu permokarbonu. Modré úseky odpovídají obdobím s intenzivním zaledněním, která se v detailu (pravý sloupec) skládají z většího počtu chladných a teplejších období, jež jsou svou délkou obdobím pleistocenních glaciálů a interglaciálů.

3 Coal balls představují karbonátové konkrce obsahující mineralizované rostlinné zbytky se zachovanou buněčnou stavbou. Nahoře velká konkrce v povrchovém uhelném dole ve státě Illinois, USA, dole naleštěná plocha s rostlinnými zbytky tvořenými především kořínky stromovitých plavuní *Appendices* (a) a větévkami plavuně rodu *Diaphorodendron* (d).

V dolní části konkrce jsou šipkami označeny tenké protáhlé útvary patřící listům kordaitů. Slój Murphysboro, illinoiská pánev. Z archivu S. Elricka, Geologická služba Illinois

4 Zástupci hlavních rostlinných skupin z období karbonu a staršího permu a jejich poměrná velikost

5 Změny ve složení mokřadní vegetace zachycené v mineralizované karbonické rašelině – coal balls (vlevo) a z palynologických spekter (vpravo)



výše několik milionů let trvající aridizační pulzy rovníkové Pangey? Projevují se červenou barvou sedimentů (red beds), nepřítomností uhelných slojí a chudým fosilním záznamem. Charakter půdních profilů ukazuje na nerovnoměrné rozložení srážek v roce, vedoucí ke střídání vlhkých a suchých sezon. V takových klimatických podmínkách rašelina nevznikala a prakticky veškerá rostlinná biomasa zetlela. Red beds se objevují poprvé koncem středního pennsylvanu, ale typické jsou až pro svrchní pennsylvan, kde se střídají s šedými uhlonosnými sedimenty. Ve starším permu dosáhl aridizační trend intenzity, která již nedovolovala vznik mocnějších vrstev rašeliny. Proto se dobytelné uhelné sloje v permských uloženinách rovníkové Pangey už téměř nevyskytují.

Biota

Karbon představuje první období v geologické historii Země, kdy povrch planety pokryly rozsáhlé lesy, jež byly plochou, strukturou a funkcí srovnatelné s dnešními. Jejich diverzita však byla nižší – neexistovaly krytosemenné rostliny. Rusko-německý vědec, mimo jiné klimatolog a botanik, Wladimir Köppen již v r. 1936 napsal, že vegetace je „zhmotněným odrazem podnebí“. Potvrzuje to i fosilní záznam z období mladšího paleozoika. Známa je jak klimatická zonálnost flóry podle zeměpisných šířek, tak její změny v reakci na klimatické výkyvy v průběhu permokarbonu. Podle klimatických pásů rozlišujeme v mladším paleozoiku čtyři hlavní floristické provincie. Mírný pás severní polokoule osídlila flóra provincie angarské, nezaledněná část jižní polokoule patřila provincii gondwanské. Obě charakterizuje menší druhová diverzita a převaha nahosemenných rostlin nad výtrusnými přesličkami, kapradinami a plavuněmi. Zbývající dvě provin-

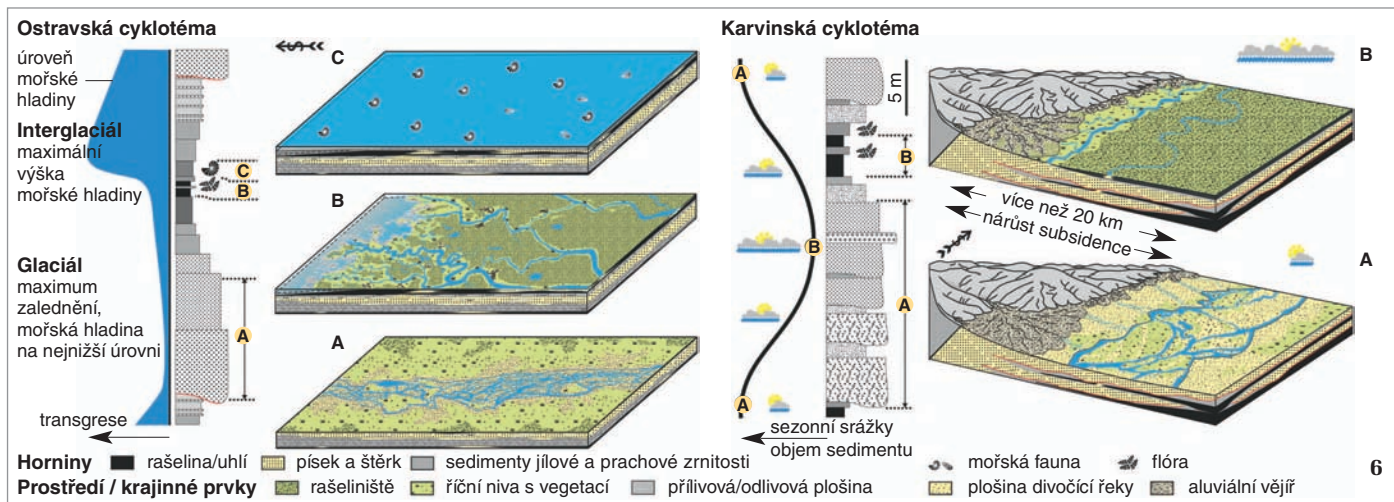
cie, euramerická a katasijská, jsou tropické a jejich existence je podmíněna geografickou separací. Katasijská provincie pokrývala většinu dnešní Číny, tehdy souostroví ve východní části oceánu Paleotethys, euramerická zaujímala rovníkovou Pangeu (obr. 1). Její součástí byl i Český masiv.

V obou tropických provinciích převládaly výtrusné typy rostlin, podíl nahosemenných postupně narůstal. Ikonou karbonických, a v katasijské provincii i permských, tropů byly bezesporu stromovité plavuně o výšce až přes 30 m. *Lepidodendron*, *Lepidophloios* a *Sigillaria* patří k nejznámějším euramerickým rodům těchto stromovitých plavuní popsaných již v první polovině 19. století (obr. 4). Detailní studium jejich pozůstatků v karbonické rašelině mineralizované dolomitem nebo kalcitem (coal balls) umožnilo poznat nejen jejich anatomickou stavbu, ale současně odlišit další nové rody (např. *Paralycopodites*, *Diaphorodendron*, *Synchysidendron*). V karbonu existovala dále řada menších forem patřících k řádů šidlatkotvarých (*Isoëtales*, např. rod *Omphalophloios*) anebo k vranečkotvarým (*Selaginellales*, recentním zástupcem je rod *Selaginella*) a plavuňotvarým (*Lycopodiales*, recentní rod *Lycopodium*). Současní karbonických plavuní byly stromovité přesličky *Calamites*, dorůstající výšky i přes 10 m, a drobné bylinné formy rodu *Sphenophyllum*. Velmi hojnou a druhově pestrou složku tvořily kapradiny, včetně vymřelých typů, kam patří v karbonu zygopteridní kapradiny (např. rod *Corynepteris*) s nadzemní osou s neomezeným růstem, zvanou fylofor, ze které vyrůstaly listové vějíře. Ve svrchním pennsylvanu tvořily dominantu vegetačního pokryvu tropů stromovité kapradiny rodu *Psaronius*.

Kromě výtrusných rostlin byly pro karbon a perm typické i rostliny nahosemenné, zastoupené vesměs vymřelými skupina-

mi. K nejznámějším patří pteridospermy neboli kapradosemenné. Tohoto označení se jim dostalo pro podobnost listů s vějíři kapradin. Na jejich vidličnatě větvených vějířích se však našla přirostlá semena nebo pylové orgány. Pteridospermy z řádů *Medullosales* (např. rod *Medullosa*), *Lyginopteridales* (např. rody *Lyginodendron* a *Eusphenopteris*) a *Callistophytales* (rod *Dicksonites*) byly stromy, keře nebo liány a některé druhy vedly epifytní způsob života. Ekologicky jsou kapradosemenné vázány obvykle na relativně sušší části karbonických mokřadů, nivy řek a břehy jezer. Zástupci řádu *Peltaspermales*, kam náleží třeba rod *Autunia* (dříve *Callipteris*), se objevují koncem karbonu, ale typičtí jsou až pro období spodního permu. Jejich silná kutikula je jednou z adaptací na zvýšenou ariditu v tomto období. Další skupinou nahosemenných karbonu a spodního permu jsou kordaity (obr. 4), pojmenované na počest českého botanika Augusta Carla Josepha Cordy (1809–1849). Šlo o keře a stromy, z nichž některé dorůstaly výšek až přes 40 m a průměru kmene více než 2 m. Většina druhů byla ale menších rozměrů. Ekologicky velmi adaptabilní skupina osídlila jak karbonické uhlotvorné močály, tak přílivové/odlivové pásma, kde byla obdobou dnešních mangrovů, ale i sušší, sezonně vysychající biotopy. Pro svrchní pennsylvan, a zejména pak spodní perm jsou typické jehličnany z čeledi *Utrechtiaceae*, známé jako walchie (např. rody *Lebachia*, *Ernestiodendron* a *Otovicia*). Druhově pestrost výrazně narůstá ve spodním permu, kdy zástupci této čeledi často dominují společenstvům rostlinných otisků. Doprovázejí je i hojně výskyt jejich pylových zrn řazených k rodu *Potonieisporites*.

Neméně zajímavé jsou reakce vegetace euramerické provincie na výše popsané klimatické změny. Překvapením je nedávné



zjištění ukazující na změny podnebí v průběhu ukládání cyklotém. Původně se předpokládalo, že po dobu jejich vzniku panovalo v karbonu velmi vlhké podnebí. Výzkumy však ukazují, že klima v tropech během sedimentace cyklotém oscillovalo mezi trvale vlhkým, podporujícím vznik mohutných rašelinišť (dnes uhelných slojí), a sezonním, v němž část roku byla sušší a rašelina nevznikala. Za doklad je považována nedávno popsaná sukcese rozdílných typů pedogenních procesů v půdním profilu v podloží slojí uhelných pánví v USA, která ukazuje na přechod od sezonního podnebí k trvale vlhkému. V Evropě podobné sukcese poprvé popsali čeští geologové v polské části hornoslezské pánve. Sloj samotná je považována za nejvlhčí „článek“ celého profilu – vyžadovala trvalé zamokření, bránící rychlému rozkladu nahromaděné biomasy a její přeměně v rašelinu. Tento závěr je v souladu s poznáním zcela odlišného rostlinného společenstva s převahou nahosemenných (kordaity, jehličnany a některé typy kapradin a pteridosperm) v uloženinách z nejsušších částí cyklů. Takové nálezy jsou však velmi vzácné, a donedávna proto unikaly pozornosti. Většina rostlinné hmoty z této „suché“ části cyklotémy zetlela a ve fosilním záznamu se až na výjimky nezachovala. Toto zjištění však naznačuje, že se v měřítku stovek tisíc let v karbonových tropech střídaly ekologicky odlišné biomy – mokřadní s ukládáním rašeliny a „suchomilné“, adaptované na sezonní deficit srážek a vysychající substrát. Oba typy biomů se lišily složením vegetace, potenciálem k fosilizaci a rolí v globálním uhlíkovém cyklu. Co se stalo s mokřadní vegetací během „suchých“ období, není zcela jasné. Jisté ale je, že s návratem ke klimatickému optimu, podporujícímu vznik mokřadů, došlo k obnově biomu v téměř nezměněném druhovém složení jako v předchozím cyklu. Klimatické oscilace v měřítku cyklotém tedy nevedly k vymírání, ale pouze ke změně rozlohy obou typů biomů a jejich migraci. Mokřadní biomy s převahou výtrusných rostlin měl díky trvale vlhkému podnebí (měřeno počtem měsíců, kdy srážky přesahují ztrátu vody evapotranspirací) vysoký potenciál k fosilizaci rostlinné biomasy a podporovaly jak vznik bohatého fosilního záznamu v sedimentech doprovázejících uhelné sloje (tafonomická okna), tak ukládání a přeměnu biomasy v rašelinu.

Oba biomy se tak zásadně lišily rolí v globálním uhlíkovém cyklu. Mokřadní vázál (sekvestroval) atmosférický uhlík procesem fotosyntézy do těl rostlin, která se po odumření v močálech měnila v rašelinu a následně v „konzervu“ atmosférického uhlíku uloženou v podobě uhlí po miliony let v zemské kůře. Naproti tomu biomasa v sušší fázi cyklu byla tlením záhy recyklována na složky, z nichž fotosyntézou původně vznikla. Globální cyklus proto ovlivňovala podstatně méně než mokřadní biomy.

Podobné biomické změny doprovázely také aridizační pulzy v délce vyšších set tisíc až nižších milionů let. Poprvé se objevují už koncem středního pennsylvanu, typické jsou až pro mladší pennsylvan a starší perm. Během nich nahradila mokřadní flóru pánevní nížiny dočasně suchomilná vegetace podobná té z nejušší části cyklotém. Délka a intenzita aridních období však přesahovala možnosti adaptace řady mokřadních druhů rostlin na sezonně vysychající půdní substrát. Většina se s touto změnou vyrovnat nedokázala, a proto se mezi sousedními klimatickými optimy mokřadní biomy výrazně obměnil. Změnu ve složení doprovázela i jeho restrukturalizace, spočívající ve změnách četnosti populací a dominantnosti různých skupin mokřadních rostlin. K nejznámější takové změně došlo na hranici středního a svrchního pennsylvanu (zhruba před 308 miliony let), kdy se úbytek mokřadů projevil v drastickém snížení populací i druhové pestrosti stromovitých plavuní, do té doby dominantní složky mokřadních ekosystémů. V Severní Americe většina mizí úplně. Dokládají to jak analýzy perminalizované rašeliny (coal balls, obr. 3), tak palynologická spektra z hraničního intervalu (obr. 5). Diagram sestavený z analýz coal balls ukazuje, že ve spodním a středním pennsylvanu se biomasa stromovitých plavuní podílela na složení rašeliny až kolem 85 %. Do konce středního pennsylvanu v průběhu 8 milionů let se její podíl zásadně nesnížil – klesl na 60 %. Během následujících několika set tisíc let však došlo k propadu až na 5 %. Roli dominantní skupiny převzaly stromovité kapradiny, jejich podíl stoupl na přelomu středního a svrchního pennsylvanu z 20 na 80 %. Počátkem permu ale aridizace dosáhla takové míry, že ani během vlhčích period mokřadů v krajině nepřevládaly. Přední místo zaujaly rostliny nahosemenné – kordaity,

6 Mechanismus vzniku ostravských a karvinských cyklotém se i přes podobný horninový záznam zásadně lišil. Ostravské jsou transgresně-regresní cykly vzniklé glacieustatickými zdvihy a poklesy mořské hladiny. Karvinské odrážejí změny srážkového režimu kolísajícího mezi sezonním (A) a trvale vlhkým podnebí s bohatými srážkami po celý rok (B). Perioda obou cyklů je však stejná. Blíže v textu. Subsidence – pozvolné poklesávání dna sedimentární pánve. Orig. S. Opluštil, není-li uvedeno jinak

7 Sloje ostravského souvrství – zuhelnatělé pozůstatky jedněch z nejstarších pralesů na našem území. Orig. J. Svoboda

Území našeho státu v permokarbonu

Informace o biotě a podnebí mladšího paleozoika z našeho území pocházejí ze sedimentárního a v něm obsaženého fosilního záznamu, jejichž výzkum sahá do první poloviny 19. století. Mohlo by se zdát, že po tak dlouhé době nelze nic převratného objevit. Opak je však pravdou. Současná úroveň znalostí v přírodních vědách v kombinaci s moderními analytickými metodami a přesnými přístroji umožňuje pochopit rytmus tohoto fascinujícího světa lépe než kdykoli předtím. Ze sedimentárního archivu našich pánví dnes získáváme poznatky o tehdejších organismech a ekosystémech, ale i klimatických změnách, kterým čelily. Tento výzkum je i důležitou součástí mezinárodního úsilí o co nejvěrnější porozumění příběhům z tohoto geologického období v globálním měřítku.

Terestrické cyklotémy – tektonický, nebo klimatický záznam?

Již od devonu zasahoval z Polska na jižní Moravu rozlehlý mořský záliv. Po jeho změlčení počátkem stupně serpuchove se v něm začaly projevovat glacieustatické oscilace mořské hladiny, vedoucí k rozsáhlým transgresím a regresím, zaznamenaným v podobě uhlonosných cyklotém ostravského souvrství hornoslezské pánve. Střídají se v nich kontinentální a deltové sedimenty včetně uhelných slojí s mělkomořskými uloženinami s brakickou až mořskou faunou, včetně trilobitů. Uhelné sloje

jsou pozůstatky našich nejstarších pralesů (obr. 7). Datování magmatogenních minerálů z vrstviček sopečného popela v několika úrovních tohoto 3 km mocného souvrství ukazuje, že průměrná délka ostravských cyklotém je asi 100 tisíc let, což odpovídá Milankovičovu cyklu krátké excentricity. Toto zjištění není ojedinělé. Cyklotémy stejné délky byly nedávno popsány z doněcké pánve a předpokládá se, že podobně dlouhé byly i některé cykly v appalačské pánvi v USA. Zde však vrstvy popela potřebné pro datování chybějí a odhad podle fosilního záznamu je tak méně přesný. Ve všech těchto případech, včetně ostravských cyklotém, je jejich vznik spojený se změnou prostředí v důsledku opakovaných glaciostatických zdvihů a poklesů mořské hladiny (obr. 6). Jak si ale vysvětlit vznik podobných sedimentárních cyklů v místech, kam mořské záplavy nezasahovaly? Na přelomu mississippu a pensylvanu moře z hornoslezské pánve definitivně ustoupilo a sedimentace mladšího karvinského souvrství pokračovala již v ryze kontinentálních podmínkách. V profilu spodní části souvrství se cyklicky střídají polohy splenců a písčinců s jemnozrnnými sedimenty s uhelnou slojí, ukazující na pravidelnou změnu prostředí v průběhu sedimentace. Mořské uložení v nich scházejí.

Vznik terestrických cyklotém býval obvykle vysvětlován pravidelnými tektonickými pulzy, které pohybem podél zlomů způsobovaly náhlé zvětšení výškových rozdílů mezi dnem pánve a okolím. Vodní toky tak získaly větší spád a rychlost a s ní i unášecí schopnost a pokryly ploché dno pánve štěrkem a pískem. Není však jasné, jak velké by musely být výškové rozdíly, aby vyvolaly tak náhlé zhrubnutí sedimentu po celé ploše pánve. Zjemnění sedimentace bylo vysvětlováno snížením reliéfu zdrojových oblastí v okolí pánve následkem eroze. První indicie ukazující, že uvedený model nemusí být správný, přinesla nejnovější radioizotopová datování zřilovatělych vrstviček sopečného popela v uhelných slojích – tonsteinů. Potvrdila, že se délka karvinských cyklotém shoduje s cyklotémami ostravského souvrství. Je to pouhá náhoda, nebo za vznikem terestrických cyklotém karvinského souvrství stojí rovněž orbi-

tální cykly? Pokud ano, tak jakým mechanismem se „přenesly“ změny v insolaci zemského povrchu do podoby sedimentárního záznamu? K vysvětlení pomohlo předchozí zjištění, že se klima v karbonských tropech při ukládání cyklotém měnilo ze sezonního v trvale vlhké, v němž srážky převažovaly nad výparem téměř po celý rok. Rozdíly v úhrnu srážek a jejich distribuci v průběhu roku bezpochyby ovlivnily složení a hustotu vegetačního pokryvu, doloženou ze studia cyklotém amerických uhelných pánví.

Během nejvlhčí části sedimentárního cyklu pokryla krajinu hustá vegetace a v pánevní nížině se tvořila rozsáhlá rašeliniště (obr. 6). Ve zdrojových oblastech, odkud pocházely sedimenty, bránila hustá vegetace intenzivní erozi. Do pánevní nížiny bylo proto přinášeno jen malé množství sedimentu s významným podílem jílu – koncovým členem převládajícího chemického zvětrávání. Část sedimentu se uložila v říčním korytě, zbytek odnesly řeky mimo hornoslezskou pánev. Sedimentace v říčním korytě tak byla v rovnováze s přírůstkem rašeliny. Vegetací stabilizované říční břehy a relativně stabilní průtok s malým množstvím sedimentu vytvářely ideální podmínky pro soužití řeky s rašeliništěm. Situace se změnila s přechodem na sezonní podnebí s nerovnoměrnou distribucí srážek. Sezonně vysychající půdní substrát již neumožňoval přeměnu biomasy v rašelinu. Změnila se i vegetace – převládaly rostliny lépe snášející po část roku sucho. Ve výše položených zdrojových oblastech v okolí pánve sezonní klima snížilo hustotu vegetačního pokryvu a zvýšilo tak náchylnost krajiny k erozi. Převládající mechanické zvětrávání přispělo vznikem hrubozrnných zvětralin, především štěrku a písku. Přívalovými dešti během vlhké sezony byl tento sediment ve velkém přinášeno do pánve. K jeho ukládání však již říční koryto nestačilo, a tak se řeka stěhovala po celé ploše pánevní nížiny a pokryla ji vrstvami štěrkopísku. Uvedené dva krajinné typy tvořily koncové členy klimatických cyklů, jejichž pravidelné střídání v měřítku kolem 100 tisíc let nejspíše vedlo ke vzniku cyklické stavby sedimentů spodní části karvinského souvrství.

Jak se měnil rostlinný pokryv?

Již v předchozím textu byly zmíněny reakce rostlinného pokryvu na měnící se podnebí v průběhu permokarbonu. Příkladem je česká část vnitrosudetské pánve, území mezi Náchodem, Žacléřem a Broumovským výběžkem. Dvě století paleobotanických výzkumů podporovaných těžbou uhlí a intenzivním vrtným průzkumem přinesla nebyvale bohatý fosilní materiál z intervalu asi před 320–297 miliony let. Stratigrafické rozlišení, tedy „časové řezy“, v nichž lze druhovou diverzitu sledovat, kolísají od desítek až set tisíc let v případě uhlonosných cyklů až po intervaly přesahující odhadem půl milionu let v úsecích tvořených převážně red beds. K dispozici máme bohatý záznam v podobě rostlinných otisků a silicifikovaných kmenů rostlin i palynologická spektra ve formě spor a pylů. Celkem bylo mezi rostlinnými otisky z tohoto intervalu dlouhého přes 20 milionů let identifikováno 187 druhů. Jejich počet v jednotlivých stratigrafických úrovních však kolísá nejčastěji jen mezi 30–50 druhy. Druhová pestrost nižší o jeden až dva řády oproti dnešním tropickým lesům má hned několik příčin. V permokarbonu neexistovaly krytosemenné rostliny, které jsou dominantou lesů dnešních tropů. Lze se rovněž domnívat, že ne všechny druhy se ve fosilním stavu zachovaly a s největší pravděpodobností nejsme schopni některé fenotypové podobné druhy podle morfologických znaků z úlomkovitého materiálu odlišit. Dokládá to i výrazně vyšší diverzita palynologického spektra, běžně v rozmezí 130–150 druhů v jednotlivých časových řezech. I přes naznačenou neúplnost dat z nich lze vyčíst zajímavé informace o složení a změnách vegetačního pokryvu v krajině, přehledně zachycených ve schématu na webu Živy. Je potřeba zdůraznit, že ve sledovaném intervalu se výrazně měnil potenciál rostlinné biomasy k fosilizaci.

Nejlepší podmínky panovaly během humidního podnebí, kdy časté srážky udržovaly hladinu podzemní vody při povrchu a podporovaly tak rozvoj mokřadů včetně rašelinišť. Omezený přístup vzduchu ve vodou nasyceném sedimentu bránil tlení a podporoval humifikaci, vedoucí k zuhelnatění rostlinných zbytků. V prachovcích a jílovcích doprovázejících uhelné sloje (fosilní rašeliniště) vznikal bohatý fosilní záznam. Tyto sedimenty proto můžeme bez nadsázky nazvat „okny“ do karbonu. Zachovaly se především rostliny pánevní nížiny rostoucí na říčních nivách, březích řek a jezer. Vegetace rašelinišť je dnes přeměněna v uhelnou hmotu, ze které již botanické složení nelze zjistit. To umožňují zmíněné coal balls, jež se ale ve slojích vnitrosudetské pánve nevyskytují. Částečně je nahradila vrstva sopečného popela zachovaná v jedné z uhelných slojí, se zuhelnatělými otisky flóry karbonického rašeliniště. Mezi druhy známými bylo určeno i několik dalších, které z jílovců neznáme. Patrně dávaly přednost rašelinnému substrátu. Většina druhů je však pro oba fosilní záznamy společná. Ve spodním permu převzaly roli „oken“ do tehdejší krajiny jezerní sedimenty, jejichž fosilizační potenciál byl rovněž vysoký. Obsahují flóru porůstající jezerní mělčiny a břehy řek, odkud byly její zbytky při povodních



naplaveny do jezera. Intervaly mezi „okny“ vyplňují sedimenty typu red beds, ukládané v sušším sezonním podnebí. Jejich fosilizační potenciál je však velmi nízký, neboť kolísání hladiny podzemní vody vede k intenzivnímu tlení. Fosilní záznam těchto převážně říčních sedimentů je proto nesmírně chudý a podstatně hůře zachovaný, bez uhelné hmoty. Obvykle se podaří určit jen několik málo druhů. Diverzita sedimentů je tedy založena především na interpolaci mezi sousedními „okny“. To ale předpokládá, že druhy objevující se v obou oknech patrně obývaly území i v dobách nepříznivých pro fosilizaci, i když měly zřejmě velmi redukované populace.

Z uvedeného obr. na webu je patrné, že interval spodního a středního pennsylvanu v délce asi čtyř milionů let počínající 10. slojí spodní slojové skupiny (starší interval ovlivněn způsobem vzorkování) a končící souslojím strážkovickým se vyznačuje nejvyšší průměrnou diverzitou, která zvolna narůstá ze 45 na 55 a následně až na hodnoty kolem 65 druhů. Změny v druhovém složení mezi sousedními cyklotémami jsou v tomto intervalu zanedbatelné, v některých případech jsou společenstva sousedních cyklů zcela totožná. Nad úbytkem druhů převažuje přírůstek

nových taxonů. To je v souladu s pozorováními z jiných uhelných pánví Evropy, kde tento interval odpovídá „zlatému věku“ uhlotvorných močálů s převahou stromovitých plavin. I když jejich druhová pestrost nemohla soutěžit s diverzitou kapradin a zejména pteridosperm, populace plavin byly velmi početné a vzhledem k mohutnosti těl se na složení rašeliny podílely hlavní měrou. Celkově tento interval představuje období ekologické stability a prosperity mokřadního biomu, pulzujícího v rytmu klimatických oscilací vedoucích ke vzniku terestrických cyklotém. K první výrazné změně dochází ještě uprostřed středního pennsylvanu s aridizační vlnou zaznamenanou nástupem red beds ve stropu žacléřského souvrství. Diverzita klesá na 20–15 druhů. Plavuně jsou však stále důležitou součástí společenstva. Následujících 3,5 milionu let zůstává ve vnitrosudetské pánvi bez sedimentárního a tím i fosilního záznamu. Sedimentace po hiátu na přelomu středního a svrchního pennsylvanu pokračuje ukládáním red beds a nízkou diverzitou kolem 15 druhů. Na srážky bohaté „klimatické optimum“ má dobu svatoňovického souslojí, kde se diverzita blíží 30 druhům. Složení mokřadní vegetace se však oproti předchozímu „oknu“

zásadně změnilo. Plavuně, i když druhově relativně pestré, tvořily jen malé populace, a nálezy jsou proto vzácnosti. Jejich druhové složení se výrazně lišilo od vegetace ve svrchní části žacléřského souvrství. Převládaly kapradiny, zejména stromovitý rod *Psaronius* a pteridospermy rodu *Medullosa*. Období svrchního pennsylvanu je již zcela ve znamení kolísající diverzity. Nízké hodnoty v červeně zbarvených neuhlonosných sedimentech přerušují vysoké či zvýšené hodnoty uhlonosných intervalů a ve spodním permu i sedimenty ruprechtického a otovického jezera. Druhové složení mezi jednotlivými okny se výrazně mění. V jezerních sedimentech již převládají nahosemenné s převahou konifer a pteridosperm z řádu *Peltaspermales*. Stromovité plavuně zastupuje jediný druh rodu *Sigillaria* a i ten je již vzácný. Svět nekonečných karbonských mokřadů tak v průběhu spodního permu mizí, aby uvolnil místo světu nahosemenných rostlin lépe přízřívobných narůstajících aridizaci prostředí.

Doporučená literatura uvedena na webu Živy. O mladšími paleozoiku pojednává kniha S. Opluštila, J. Zajíce a J. Svobody Pralesy a jezera mladších prvohor, která vyjde v Nakladatelství Academia.

Martin Mazuch, Jakub Sakala

Tenkrát, když začalo dnešní chladno...

Tento příspěvek bychom rádi věnovali našim učitelům, kteří se mimo jiné zabývali problematikou změny bioty na této hranici – Oldřichu Fejfarovi, který nedávno oslavil 90. narozeniny, a v minulém roce zesnulému Zlatko Kvačkovi.

Přibližně před 34 miliony let (na pomezí eocénu a oligocénu) dochází na Zemi k významným změnám, které se projevují ve fosilním záznamu výraznými změnami ve složení společenstev organismů. Jde o nasměrování ke stavu pokračujícímu až do současnosti. Tyto změny se samozřejmě projevují v marinním i terestrickém prostředí, ale poprvé byly sledovány na suchozemských savčích společenstvech švýcarským paleontologem Hansem Georgem Stehlinem začátkem 20. století. Jednou z hlavních změn je začátek současného období glaciace, kdy vznikem stálého kontinentálního zalednění v Antarktidě dochází k dlouhodobým klimatickým změnám, které mají obrovský dopad na diverzifikaci klimatických a vegetačních zón, a tím pádem i na adaptace organismů. Příčiny jsou hledány jak ve změnách paleogeografie, s tím souvisejících změnách proudění v oceánech, v poklesu úrovně oxidu uhličitého, ale ve hře jsou i možné vlivy dopadu mimozemských těles. Událostí, k nimž v tomto období dochází, je více a mnohé jsou spolu natolik provázané, že v odborné literatuře probíhá velmi často bouřlivá diskuze ohledně kauzality těchto událostí, která je nejčastěji spojena s omezenými možnostmi detailního datování některých sedimentů. Přestože se změny bioty ve fosilním záznamu projevují jako výrazné vymírání, mají přece jen poněkud odlišný charakter od ostatních velkých vymírání – u některých skupin se zdá, že mizejí pouze v určitých areálech a naopak migrují do jiných oblastí. Velké faunistické výměny jsou umožněny hlavně v oblastech Evropy, Asie a Afriky, které právě v tomto období vytvářejí základ současného největšího superkontinentu Eurafrie. Naopak u ostatních kontinentů dochází k izolovanosti a velmi specifickému vývoji, i když omezená komunikace (např. prostřednictvím ostrovních oblouků) přetrvává.

Co předcházelo

Abychom uvedené změny mohli posoudit, je nutno se podívat, jaký vývoj těmto událostem předcházelo. Od triasu do konce eocénu po dobu téměř 220 milionů let přetrvává dlouhé období výrazně teplejšího klimatu ve srovnání se současným stavem. Přestože dochází k určitým ochlazením, nikdy tyto hodnoty (odvozené od měření koncentrace izotopu kyslíku ¹⁸O) neklesají k hodnotám dnešního stavu a též z této doby nemáme žádné sedimenty prokazující stále kontinentální zalednění. To nevylučuje sezonní zamrzání oceánů v polárních oblastech. Na konci křídly (před 66 miliony let) proběhlo poslední známé hromadné vymírání. Ať již bylo důvodem cokoli, můžeme sledovat klimatický vývoj vedoucí od mezozoických (druhohorních) podmínek až do současnosti (obr. 1). Po krátkém ochlazení v nejranějším paleocénu se teploty zvyšují až nad úroveň větší části období mezozoika. Před 56 miliony let se krátkodobě prudce zvýšily na hranici paleocénu a eocénu (PETM) a pokračuje období raně eocenního teplotního optima (EETO), kterým zvyšování teplot dosahuje vrcholu. Od tohoto období (ca před 50 miliony let) až do konce pleistocénu následuje snižování globálních teplot (s mírným střednomiocenním zvýšením – MMCO).

Kromě změn klimatu se udály i významné paleogeografické změny následkem proměňující se pozice jednotlivých kontinentálních celků (obr. 2). Během eocénu se afro-arabský blok stále pohybuje směrem na sever. Souběžně s ním se posouvá severním směrem také Indická deska, která v tomto období dosahuje rekordní rychlosti pohybu až 16 cm/rok. Tím se uzavírá oceán Tethys, sloužící jako globální teplotní „dopravník“, který obtékal v rovníkové oblasti kolem světa a jednotlivými větvemi teplých proudů pak severním i jižním