



5 Pohled na čerstvě vyhořelou plochu nad řekou Kamenice v Českém Švýcarsku, kde si můžeme povšimnout diferencovaného účinku požáru na velice jemné prostorové škále. Snímky P. Pokorného

že lesní požáry jsou v našich krajích odvěkým a přitom nikoli řídkým jevem. Možná není od věci nazvat ho dokonce „přírodním“, nakolik je vzájemná provázanost lidských a přírodních dějů v holocénu střední Evropy „přirozená“. Z velkoplošných chráněných území bychom požáry nemuseli a snad ani neměli absolutně vylučovat, i když v případě lesů to legislativa zatím neumožňuje. V Českém Švýcarsku vidíme, jak nás oheň zbavil lesů rozvrácených kůrovcem a suchem a vytvořil úžasné heterogenní prostředí (obr. 5), které je skvěle připraveno na spontánní obnovu. Přišli jsme tím k velice cennému přirozenému experimentu a nejspíš i k chráněnému území prvotřídní kvality do budoucna.

Článek vznikl za podpory projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum QK21010335 (LARIXUTOR).

Použitá literatura uvedena na webu Živý.

Oheň totiž uvolňuje (mobilizuje) živiny v biomase a v půdách, takže přispívá k jejich ztrátě do podzemních i povrchových vod. Výsledkem mohl být urychlený retrogresivní vývoj půdních substrátů, při kterém z hnědých, na živiny bohatých lesních půd postupně vznikají chudé podzoly.

Dobře tak, že je smrt na světě

Pokusme se na věc podívat optimisticky. Oheň je poslem smrti, ale smrt je nedílnou součástí koloběhu života, jak praví titul pohádky od Karla Jaromíra Erbena, převzatý do mezititulku. S nejnovějšími paleoekologickými poznatky jsme navíc nahlédli,

Stanislav Opluštil

Požáry v geologické historii aneb O čem nám vypráví dřevěné uhlí

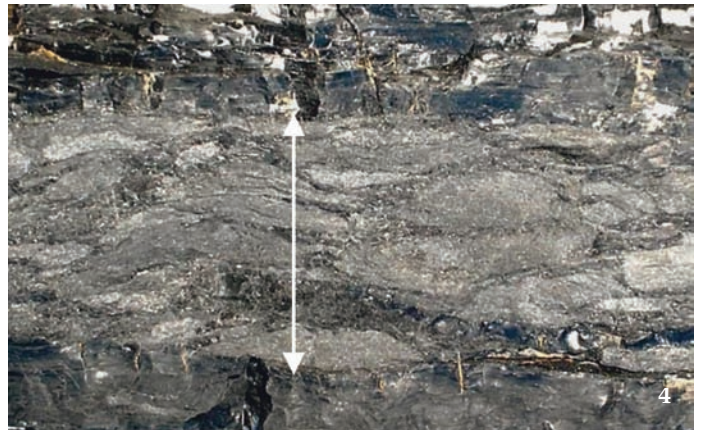
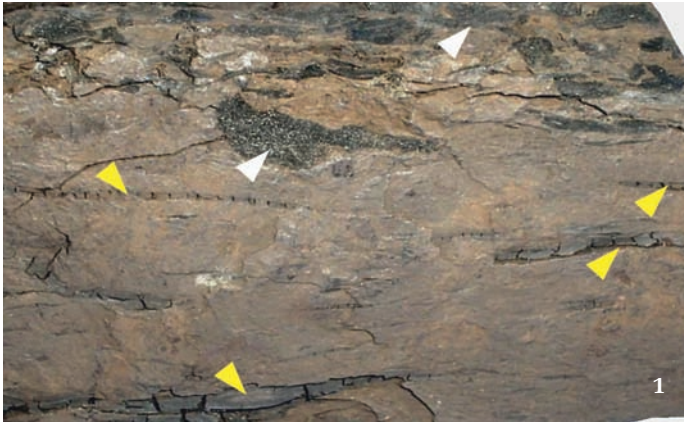
Říká se, že oheň je dobrý sluha, ale zlý pán. Druhá část přísloví se bezesporu týká požárů, které doprovázejí lidskou civilizaci od nepaměti. Požáry však existovaly dávno před člověkem a jsou i dnes přirozenou součástí ekosystémů napříč klimatickými pásy. Na rozdíl od globálních změn, o nichž se nyní hovoří v souvislosti s klimatem, jsou však jednotlivé požáry přece jen malého rozsahu a krátkého trvání, tedy alespoň z perspektivy geologického času. Je tedy vůbec možné zjistit přítomnost a třeba i frekvenci požárů v geologické minulosti vzdálené desítky až stovky milionů let? Odpověď zní ano, pokud ovšem víme, co máme hledat.

Podívejme se proto nejprve na proces hoření a jeho produkty. Hlavním palivem požárů je biomasa suchozemských rostlin, zejména dřeva. Ta se dokonalým spálením rozloží na oxid uhličitý (CO_2) a vodu (H_2O), komponenty, ze kterých procesem fotosyntézy vznikla. Trocha popela (1–2 %) jsou původem minerální látky, jež rostliny získaly z půdy. Po takových indiciích fosilních požárů bychom však v geologickém záznamu jen těžko pátrali. Mnohem „hmatatelnější“ jsou pozůstatky nedokonalého spálení dřeva, ke kterému dochází všude tam, kde k hoření chybí dostatek vzduchu. V takovém případě z biomasy postupně unikne vodní pára a směs hořlavých plynů, někdy zvaná dřevoplyn, který

byl dříve používán např. k pohonu aut. Nejčastěji je složený z vodíku, oxidu uhelnatého, metanu a nejrůznějších polycyklických aromatických uhlovodíků. Zbyde uhlikaté reziduum se zachovanou buněčnou strukturou, známé pod názvem dřevěné uhlí. Dnes si kupujeme průmyslově vyrobené dřevěné uhlí nejspíše jen na grilování, ale již od dob starověkých civilizací bylo hlavním palivem sloužícím k tavení kovů, neboť při hoření vyvíjí teplotu přesahující 1 100 °C. Ještě v počátcích průmyslové revoluce v první polovině 19. století bylo dřevěné uhlí vyráběno ve velkém objemu v milířích (blíže na str. 224–228 této Živý) nebo speciálních pecích a využíváno k tavení železa, při výrobě oceli

i v další energeticky náročné výrobě. To však nezadržitelně vedlo k nadměrnému odlesňování krajiny v řadě míst Evropy, včetně Skandinávie. V průběhu 19. století bylo proto postupně nahrazováno levnějším a dostupnějším koksem, vyráběným vysokoteplotní karbonizací černého uhlí.

Dřevěné uhlí se vyznačuje řadou zajímavých vlastností, z nichž má pro naše vyprávění význam vysoká porozita daná trojrozměrným zachováním buněčné struktury karbonizovaných (zuhlňatých) rostlinných pletí. Díky tomu je možné studovat anatomickou stavbu původního dřeva a v řadě případů jej botanicky zařadit. Fosilní dřevěné uhlí je tak skvělým paleobotanickým materiálem ke studiu vegetace v dávné geologické minulosti. Vzhledem k vysoké porozitě je lehké a snadno plave na vodní hladině. Nasáknutí úlomků centimetrových rozměrů trvá měsíce. Za tu dobu mohou být kousky dřevěného uhlí z místa původního požáru spláchnuty deštěm do vodních toků nebo do moře a transportovány desítky i stovky kilometrů daleko. Velká část však zůstane uložena v místě či nejbližším okolí požářiště. Jemná buněčná struktura uhlikatého rezidua je křehká a otírá se o prsty již při pouhé manipulaci. Drobné, obvykle submilimetrové úlomky vzniklé mechanickým namáháním jsou proto snadno vyváté větrem a rozneseny široko po krajině. Je tedy zřejmé, že pozůstatky lesních požárů v podobě uhlikatého rezidua najdeme, byť jen v malém množství, na mnoha místech i mimo vlastní území postižené požárem, např. v hlubokomořských sedimentech. Zde pak tento chemicky odolný uhlikatý materiál přežije miliony let prakticky beze změny. Fosilní dřevěné uhlí je proto oním nevhodnějším „archivem“, z něhož lze dnes usuzovat na výskyt, frekvenci a někdy i rozsah požárů v geologické minulosti.



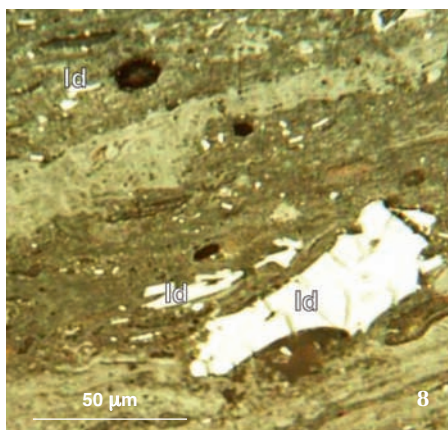
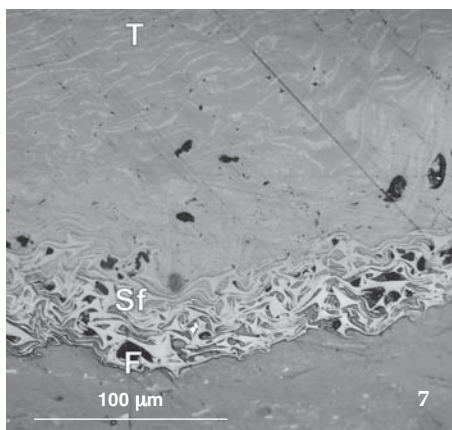
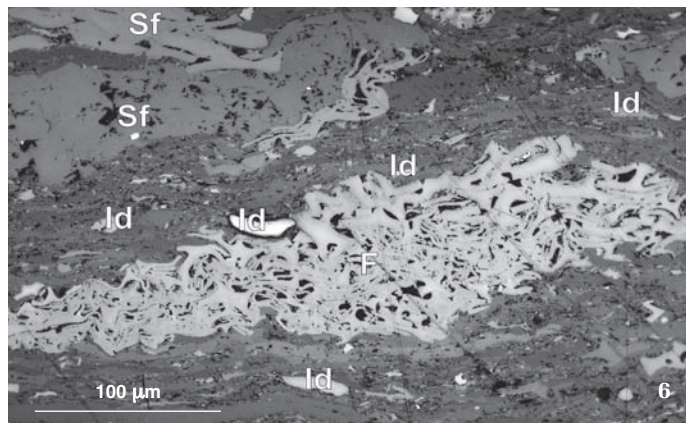
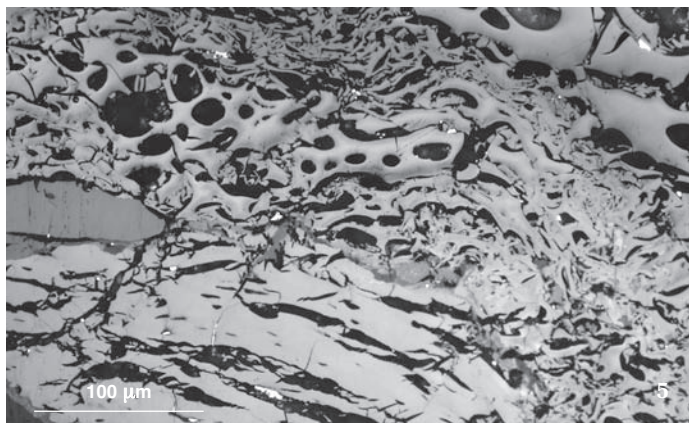
Spousta názvů – stejný původ

V odborné literatuře se kousky fosilního dřevěného uhlí skrývají pod řadou nejrozličnějších názvů. Francouzský geolog François Cyrille Grand'Eury použil koncem 19. století pro úlomky a vrstvičky dřevěného uhlí v černouhelných slojích termín fusain, pro který se v české literatuře vžil označení fuzit. Pro úplnost bychom měli zmínit, že fuzit může vznikat nejen hořením, ale také trouchnivěním rostlinných pletiv za přístupu vzduchu. Buněčná stavba v takovém případě však nebývá dobře zachovaná. Obě formy se proto dají obvykle snadno odlišit pod mikroskopem. V uhlí bývá trouchnivěním vzniklý fuzit podstatně vzácnější. Mikroskopicky je fusain nejčastěji tvořen fusinitem, semifusinitem a inertodetrinitem (obr. 5–7). Všechny tyto komponenty lze alespoň v malém množství najít snad v každém kousku uhlí, obzvláště z období mladšího karbonu. Uhlí některých karbonových slojí těžkých na Karvinsku, Kladensku nebo v okolí Žacléře jich obsahuje běžně 15–30 %. Vzácností však nejsou ani milimetrové až centimetrové vrstvičky tvořené téměř čistým a makroskopicky snadno identifikovatelným fuzitem. V pět metrů mocné sloji „Russkohlenflöz“ v cvikovském revíru v sousedním Sasku tvořily vrstvičky vzniklé nahromaděním úlomků dřevěného uhlí místy až polovinu mocnosti sloje. Hojný výskyt v některých uhelných slojích současně ukazuje, že se požáry nemusejí šířit jen „suchým“ lesem, ale nepohrdnou ani mokřady včetně rašelinišť, pokud je jejich vegetace dostatečně hustá. V planárních rašeliništích s volnou vodní hladinou (reotrofní typ, jako např. naše slatiniště) se požár šíří pouze korunami stromů a teplota hoření zde přesahuje 1 000 °C. V ombrotrofních rašeliništích vytvářejících rašelin-

né dómy se však požáry snadno šíří nejen hustou vegetací, ale během sušší sezony, kdy hladina vody klesá o několik decimetrů, i povrchovou vrstvou rašeliny. Příkladem jsou rozsáhlé požáry ombrotrofních rašelinišť v Indonésii, při kterých vyhoří vrstva rašeliny vznikající několik století, a uvolní tak dočasně uložený uhlík zpět do atmosféry v podobě CO₂ a dalších skleníkových plynů. Tyto zemní požáry probíhají za omezeného přístupu vzduchu a při nižších teplotách, typicky kolem 200–700 °C. Vzniká při nich však více dřevěného uhlí, v němž je část uhlíku vázána a zůstává uložena v zemské kůře.

Nejstarší požáry v geologické historii

Doklady nejstarších požárů bychom logicky očekávali s výstupem rostlin na souš, ke kterému došlo podle nálezů spor patrně již uprostřed ordoviku před zhruba 470 miliony let. Nejstarší rostliny, zřejmě mechy a játrovky, však tvořily jen tenké „povlaky“ blízko pobřeží. Dostatek vhodného paliva rozhodně neposkytovaly. Vhodným „palivem“ byly až cévnaté suchozemské rostliny. Nejstarší fosilie suchozemských rostlin na světě známe až ze středně silurských břidlic stupně wenlock (před asi 432 miliony let) z okolí Berouna. Jen o několik milionů let mladší nálezy jsou již poměrně hojné i v jiných částech světa. Tyto nejstarší suchozemské rostliny (např. rod *Cooksonia*) však byly drobné, obvykle jen několikacentimetrového vzrůstu s bezlistými vidličnatě větvenými nepravými stonky (telomy), jejichž středem probíhal cévní svazek (blíže např. Živa 2021, 2: 57–59; 2022, 1: 6–10). Jejich zbytky se často vyskytují v mořských sedimentech, což naznačuje, že většina těchto porostů patrně kolonizovala pobřežní oblasti a teprve po řadě adaptací se vydala „dobývat“ vnitrozemí do té doby nehostinných a pustých kontinentů. Vzhledem k drobnému vzrůstu vegetace a nesouvislému vegetačnímu pokryvu v blízkosti vodních ploch trpěly požáry nedostatkem paliva a měly velmi omezený rozsah. Doklady požárů ze staršího paleozoika jsou proto vzácné. Nejstarší „fuzitizované“ zbytky rostlin pocházejí ze spodní části stupně přídol ve svrchním siluru (kolem 423 milionů let) z dnešního Walesu. V mělkomořských sedimentech uložených v dosahu přílivo-odlivového proudění zde byly nalezeny fuzitizované pozůstatky drobných vymřelých výtrusných rostlin z oddělení Rhyniophyta s nepravými stonky silnými necelými milimetry.



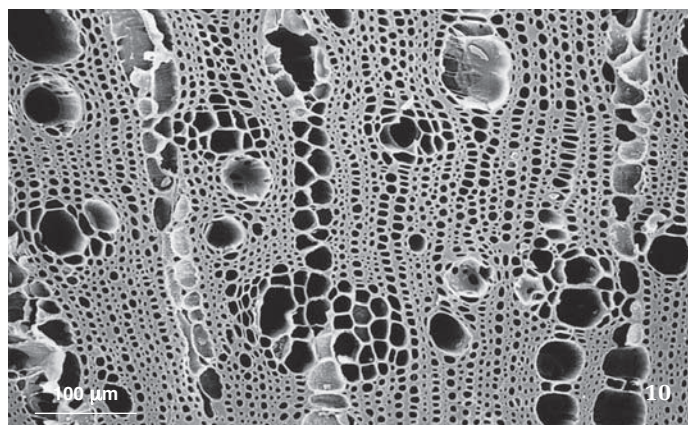
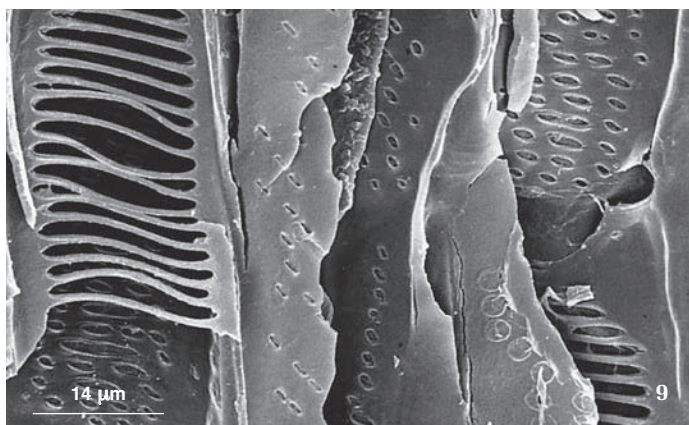
5 až 8 Mikroskopické snímky nábrusů černého (obr. 5–7) a hnědého uhlí (8). Požárem karbonizovaná rostlinná pletiva (fusinit, obr. 5) se zachovanou buněčnou stavbou (příčné i podélné řezy) v uhlí sloje Prokop na bázi karvinského souvrství (karbon, před 320 miliony let). Důl Darkov. Drobné úlomky dřevěného uhlí „plovcí“ v uhelné hmotě (6) patří různým mikropetrografickým komponentám: Id – inertodetrinit (drobné fragmenty, úlomky buněčných stěn), F – fusinit (světlejší varianta karbonizovaných buněčných pletiv), Sf – semifusinit (tmavší varianta požárem karbonizovaných rostlinných pletiv vznikající při nižších teplotách hoření). Uhlí sloje Prokop, Důl Darkov. Přechod fusinitu (F) do semifusinitu (Sf) a následně do požárem neovlivněného dřevního pletiva označovaného v uhelné petrografii jako telinit (T, 7). Uhlí sloje Prokop, Důl Darkov. Hnědé uhlí ze žitavské pánve ve frýdlantském výběžku (8, miocén, zhruba před 19 miliony let). Důl Kristýna. Id představují požárem karbonizované fragmenty buněčných stěn rostlinných pletiv v „normální“ uhelné hmotě vzniklé prouhelněním rašeliny. Foto S. Opluštil (obr. 5–7) a I. Sýkorová (8)

Situace se příliš nezměnila ani v průběhu devonu (před 419–358 miliony let). Počátkem tohoto období si rostliny osvojily novou strategii – tvorbu sekundárních pletiv, která jim pak, od středního devonu, umožnila dorůstat stromovitých rozměrů. Příkladem je svrchnodevonský rod *Archaeopteris* s dřevem rodu *Callixylon* (v paleobotanice se dávají rodové a druhové názvy samostatným orgánům, např. typu dřeva) podobným dnešním jehličnanům, avšak reprodukčním systémem na úrovni výtrusných rostlin. Vznikly tak nejstarší lesy, které pokryly podstatně rozsáhlejší oblasti než drobné rostliny v siluru a poskytly i dostatek paliva. Frekvence požárů se ale kupodivu nezvýšila, spíše naopak – doklady požárů v sedimentárním záznamu středního devonu prakticky chybějí. Vysvětlení zdánlivého paradoxu je spojováno s poklesem obsahu kyslíku v tehdejší atmosféře, která ve středním devonu podle dostupných modelů činila pouhých 10 %. Tato hodnota je pod spodní hranicí „požárového okna“ vymezeného koncentrací kyslíku v atmosféře v rozmezí 15–35 %. Spodní hranice experimentálně odvozeného intervalu odpovídá minimální koncentraci kyslíku potřebné k hoření rostlinné hmoty; horní hranicí je pak hodnota, při které se požáry vymykají kontrole a stávají se prakticky „neuhasitelnými“. Koncentrace kyslíku v atmosféře byla proto klíčovým parametrem ovlivňujícím frekvenci požárů i v následujících geologických obdobích.

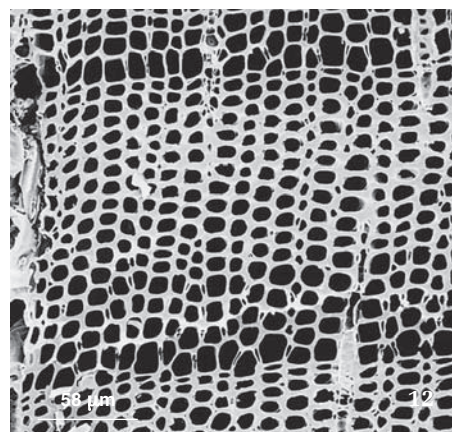
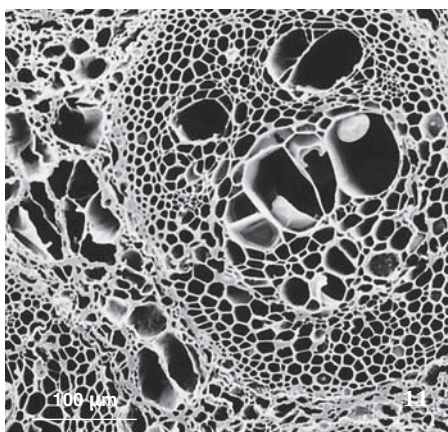
Výskytů fosilního dřevěného uhlí přibývá až v karbonu (před 358–299 miliony let), počátkem mladších prvohor. S diverzifikací rostlin a jejich adaptací na různé typy prostředí se výrazně zvětšuje rozloha vegetačního pokryvu a narůstá i obsah kyslíku v atmosféře. Již uprostřed staršího karbonu (v mississippu, před 359–323 miliony

let) se jeho koncentrace pohybovala kolem 23 % a na konci mississippu dosáhla 30–31 %. Ruku v ruce s popsaným trendem roste i frekvence požárů, včetně těch postihujících rašelinisté. Uhelné sloje z tohoto období proto běžně obsahují kolem 10–15 % fuzitu rozptýleného v uhelné hmotě nebo sloučeného do tenkých vrstviček. Uprostřed karbonu, na hranici mississippu a pennsylvanu, dochází ke globálnímu ochlazení (mladopaleozoická doba ledová), které odezní až po 60 milionech let počátkem svrchního permu. S ochlazením se výrazně zvětšil rozsah zalednění jižního superkontinentu Gondwana, doprovázený poklesem hladiny světového oceánu o desítky až více než sto metrů. Pokles způsobil posun pobřežní linie, místy přes tisíc kilometrů. Rozlehlá šelfová moře v oblasti rovníkové Pangeje se tak změnila během geologicky velmi krátké doby v rozsáhlé nížiny pokryté nekonečnými tropickými mokřady a rašeliníšti o odhadované rozloze kolem 2–3 milionů km². Mokřadní vegetaci tvořily především výtrusné rostliny zahrnující plavuně, přesličky a kapradiny často stromovitých rozměrů. Hojně však byly i některé vymřelé skupiny nahosemenných, např. kapradinám podobné kapradosemenné a kordaity. V té době se obsah kyslíku v paleoatmosféře pohyboval podle modelů kolem 30 % a požáry byly proto běžnou součástí mokřadních biotopů. V uhelných slojích, původně karbonských rašeliníštích, se tenké laminy (vrstvy) a čočky fuzitu objevují od několika milimetrů do prvních centimetrů, což při přírůstku rašeliny 1–2 mm/rok a kompakčním poměru mezi vrstvou rašeliny a z ní vzniklé sloje uhlí 10 : 1 ukazuje na frekvenci velkých požárů v měřítku desetiletí až století. Množství dřevěného uhlí v uhelných slojích mladšího karbonu se pohybují běžně kolem 15–20 %.

Obsah kyslíku v atmosféře dosahuje maxima (35 % a více) počátkem permu, avšak doklady požárů v rovníkové Pangeji oproti karbonu výrazně ubývá. Tentokrát je na vině narůstající aridizace (vysušování) této části superkontinentu, která vedla nejen k zániku mokřadů, ale patrně i k řídkému vegetačnímu pokryvu. Ten neumožňoval šíření požárů na velkých plochách. Za požáry bychom se v tomto období museli vydat do vyšších zeměpisných šířek jižní polokoule, do oblasti původního jižního kontinentu Gondwany. V podmínkách mírného a vlhkého podnebí zde po skončení doby ledové ve středním a především svrchním permu vznikala rozsáhlá rašeliníšt. Jejich dominantu tvořily vymřelé skupiny nahosemenných, např. rody *Glossopteris* a *Gangamopteris*. Množství uhelné hmoty permských gondwanských ložisek je srovnatelné s karbonskými ložisky tropické Pangeje. Permské uhlí Gondwany však má mnohem vyšší obsahy fuzitu (v průměru kolem 40 % a více) než uhlí karbonské. Z charakteru fuzitu je zřejmé, že vznikl zejména nedokonalým hořením při zemních požárech rašeliníšt. Častost těchto požárů zároveň ukazuje na vysoké obsahy kyslíku v tehdejší atmosféře až do konce permu.



9 až 12 Pletiva, zejména drobných bylin, ale i dřevo angiosperm (krytosemenných rostlin) se v rašeliništi poměrně snadno rozkládají, a jejich buněčná stavba se nenávratně „ztrácí“. Pokud jsou však požárem přeměněny v chemicky inertní dřevěné uhlí, vzniká trvalý preparát vhodný pro paleobotanické studium. Dřevěné uhlí z přibližně 15 milionů let staré (miocén) hnědouhelné sloje v dolnorýnské pánvi. Vodivá pletiva (tracheje) rostliny patrně z čajovníkovitých (*Theaceae*, obr. 9). Dřevo krytosemenné vavřínovité rostliny (*Lauraceae*), příčný řez (10). Příčný průřez stonkem palmy s cévními svazky (11) a dřevem borovice (*Pinus*) s letokruhy. Podle: I. Figueiral a kol. (2002). Publikováno se souhlasem Society for Sedimentary Geology (SEPM)



Požáry a velká vymírání

Hranice permu a triasu (hranice mezi paleozoikem a mezozoikem) je ve znamení největšího vymírání ve fanerozoiku, tedy od počátku paleozoika před asi 539 miliony let do současnosti (více v Živě 2021, 5). Během této biotické krize klesá obsah kyslíku pod současnou úroveň a ve středním triasu je jen kolem 18 %. V daném období vrcholí také aridizace podnebí, která nedovolovala vznik rašelinišť a rostlinný pokryv zredukovala na nesouvislé ostrůvky vegetace. Následkem změn se frekvence požárů drasticky snížila, jak je patrné z celosvětově velmi vzácných výskytů dřevěného uhlí v sedimentech z počátku triasu. Ve zbývajícím období mezozoika (druhohor) kolísá obsah kyslíku v atmosféře, a tím i frekvence požárů. Nejlepším indikátorem jsou opět fosilní rašeliniště přeměněná dnes v uhelné sloje. Ta se po pauze ve starší polovině triasu začínají tu a tam objevovat v mladším triasu v různých částech světa (např. na dnešní Sibiři, ve Vietnamu, USA nebo Austrálii). Koncem triasu obsah kyslíku v atmosféře narůstá a s ním i obsah fuzitu v uhlí z několika málo procent na průměrných 30 % (před zhruba 240–201 miliony let). Počátkem jury obsah kyslíku opět klesal, začal znovu stoupat počátkem mladší jury až do hranice s křídou (160–150 milionů let). Průměrné obsahy fuzitu v uhelných slojích jurského stáří proto kolísají v širokém rozmezí od 15 do 45 %. Podobné výkyvy způsobené změnami obsahu kyslíku v atmosféře byly zjištěny i v období křídý. Po počátečním poklesu v intervalu 140–125 milionů let se uprostřed starší křídý stabilizuje na hodnotách srovnatelných se současností. Následně však obsah

kyslíku narůstal a počátkem mladší křídý (asi 93 milionů let) dosáhl úrovně kolem 29 %, nejvyšších hodnot za celé mezozoikum. Křídové uhlí z tohoto intervalu má proto vysoké koncentrace fuzitu běžně mezi 30–40 %. Dalších 50 milionů let během nejmladší křídý a starší poloviny paleogénu (90–40 milionů let) je ve znamení poklesu obsahu kyslíku na hodnoty kolem 24 % uprostřed eocénu (před asi 40 miliony let). Uhlí z tohoto dlouhého intervalu vykazuje velký rozptyl fuzitu od 5 do 40 %. Nejčastěji se však pohybuje jen kolem 10 %. Překvapivě žádné masivní výskyt dřevěného uhlí nebyly zjištěny na hranici křídý a paleogénu (66 milionů let) v souvislosti s předpokládanými celosvětově rozšířenými požáry po dopadu meteoritu a s ním spojeným vymřením dinosaurů a dalších organismů. V oligocénu (konec paleogénu) a v neogénu se koncentrace kyslíku v atmosféře jeví relativně stabilní v intervalu 23–21 % (dnešní hodnota je bezmála 21 %). Celosvětově velmi hojně miocenní uhlí (23–5 milionů let), k němuž patří i hnědouhelné sloje těžené v Podkrušnohoří, mají již velmi nízké obsahy fuzitu, nejčastěji mezi 3 a 5 %. Nárůst výskytu dřevěného uhlí v geologicky nejmladším období – v holocénu (před zhruba 12 tisíci let po současnost) – již nesouvisí se změnou obsahu kyslíku v atmosféře, ale s činností člověka.

Lze odhadnout plošný rozsah požárů?

Četnost výskytů fosilního dřevěného uhlí je poměrně spolehlivým indikátorem frekvence požárů v geologické minulosti, řízené významnou měrou obsahem kyslíku v atmosféře. Můžeme ale odhadnout i plošný rozsah jednotlivých požárů? To je, bohužel, komplikováno řadou překážek, např. odhadem množství dřevěného uhlí vzniklého při požáru. Studií tohoto typu existuje po-

skrovnu. Jeden z nejzdařilejších odhadů se týká katastrofického požáru, ke kterému došlo zhruba před 335 miliony let koncem staršího karbonu (ve stupni visé) v dnešním severním Irsku (Nichols a Jones 1992). V sedimentech karbonské estuárie (nálevkovitý tvar ústí řeky do moře) odkrytých v pobřežních útesech u města Donegal se vyskytuje písčité vrstva o mocnosti 1 m až 1,7 m s obsahem úlomků dřevěného uhlí v průměru asi 20 %. Dochovaná plocha vrstvy je kolem 10 km² při zachování přibližně stejné koncentrace úlomků všude, kde vychází na povrch. Pro výpočet rozlohy spálené plochy použili autoři studie poněkud konzervativnější parametry: koncentraci dřevěného uhlí 10 %, mocnosti vrstvy 1 m a plochu 10 km². Obsah uhlí ve vrstvě pak činil 1 milion m³. Pro převod na plochu vycházeli z odhadů množství dřevěného uhlí vzniklého při současných požárech na jednotku plochy s přihlédnutím k charakteru vegetace. Na základě této analogie u současných požárů bylo odhadnuto, že 1 milion m³ fuzitu vznikl nedokonalým shořením vegetace na ploše 95 tisíc km². Tento výpočet je na spodní hranici a původní spálená plocha byla patrně větší. I tak odhad donegalského požáru výrazně přesahuje rozlohu České republiky i velkého požáru na Borneu v letech 1982–83, při kterém shořelo 37 tisíc km² tropického lesa.

Až budete grilovat na dřevěném uhlí, vezte, že máte co činit s materiálem, jehož historie začala před více než 400 miliony let a že ukrývá fascinující příběh o vývoji vegetace i složení atmosféry v minulosti.

Výzkum probíhá za podpory Grantové agentury ČR (projekt 22-11661K).

Doporučená literatura je na webu Živý.