

„BLACK CARBON“ JAKO PRODUKT NEDOKONALÉHO SPALOVÁNÍ – VZNIK, VLASTNOSTI, VÝSKYT, STANOVENÍ

JAROSLAV BLAŽEK, IVANA SÝKOROVÁ
a MARTINA HAVELCOVÁ

Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8
jaroslav.blazek@irms.cas.cz

Došlo 24.9.13, přepracováno 17.3.14, přijato 27.3.14.
Rukopis byl zařazen k tisku v rámci placené služby urychleného publikování.

Klíčová slova: uhlík, black carbon, saze, nedokonalé spalování, pyrolyza

Obsah

1. Úvod
2. Vznik
3. Vlastnosti
4. Výskyt a působení v biosféře
 - 4.1. Pohyb v atmosféře
 - 4.2. Ukládání ve vodním prostředí (včetně sněhu aj.)
 - 4.3. Půdní prostředí
5. Metody stanovení
6. Vliv na lidské zdraví
7. Příznivé vlastnosti BC
8. Závěr

1. Úvod

Především v zahraniční, anglicky psané literatuře z oboru paliv a ekologie se lze často setkat s termínem „black carbon“. Téměř každý autor jej však definuje jinak – liší se procesy, jakými se k tomuto produktu došlo a rovněž metodami, jakými se stanovuje. Tato nejednotnost může někdy znesnadňovat porozumění přínosu relevantní publikace. Obecně termín „black carbon“ (BC) označuje relativně nereaktivní uhlíkatý materiál, vzniklý nedokonalým spalováním fosilních paliv a biomasy.

Z chemického hlediska se BC často definuje jako materiál odolný laboratorní oxidaci. Jeho hlavní složkou je elementární uhlík¹. BC se také vymezuje² jako uhlíkatá frakce vzniklá spalováním, jejíž molární poměr H/C je nižší nebo roven 0,2 a která nepodléhá oxidaci do teploty 340 °C v atmosféře čistého kyslíku.

2. Vznik

Nedokonalé spalování fosilních paliv vede ke kondenzačním reakcím v plynné fázi¹, jejichž produkty jsou vysoce aromatické struktury kulovitého tvaru, shromážděné v agregátech (angl. soot, saze) tvaru hroznů. Kromě sazí produkuje nedokonalé spalování biomasy též méně strukturovaná uhlíkatá rezidua (angl. char, dřevěné uhlí, polokoks). Char označuje pevný materiál vznikající v počátečních fázích termického rozkladu uhlíkatého materiálu při odstranění lehkých plynných složek a dehtu. V případě tepelného rozkladu bylin, trav, mechů a rašelin vznikají převážně drobnější a lehčí částice polokoxu (pod 10 μm), zatímco v případě nedokonalého hoření dřeva a uhlí vznikají větší částice s různými texturami (sferule, porézní, hutné a další). Polokoks je tedy produktem nízkoteplotní karbonizace při teplotách kolem 500 °C, kdy se získává dehet a polokoks, a produktem nedokonalého spalování uhlí a biomasy. V případě karbonizace je rozdělení procesu karbonizace na fázi nízkoteplotní a vysokoteplotní technologicky nemožné. Při této mezní teplotě v rámci karbonizace dochází k tvorbě plastického stavu – vzniku mezofáze – a po finálním odplynění k tuhnutí a k tvorbě koksových stěn – koksu.

K případům nedokonalého spalování, kterým se tvoří mj. částice BC, patří i zpracování paliv v motorech dopravních prostředků. V rozvinutých zemích je tento zdroj emisí BC velice významný³ – např. v USA a dalších průmyslových zemích je doprava hlavním přispěvatelem k emisím BC, a naopak v rozvojových zemích je důležitějším zdrojem využití fosilních paliv na ohřev a přípravu potravy v domácnostech, vypalování lesních porostů pro získání zemědělské půdy, stavby komunikací a osídlení (Jižní Amerika, Indonésie).

BC byl dlouhou dobu považován výhradně za produkt nedokonalého spalování fosilních paliv a biomasy. Některé isotopové analýzy vzorků mořských a půdních sedimentů z předindustriální doby však podporují myšlenku, že jelikož daný BC neobsahuje radioaktivní uhlík, nepochází z produktů spalování, ale z metamorfovaných hornin⁴.

Většina prací, které se zabývají vlastnostmi BC, popisují jeho vznik a metody stanovení, se ale týká BC pyrogenního původu.

3. Vlastnosti

Obecně mají částice BC trojrozměrnou strukturu tvořenou na sobě poskládanými aromatickými vrstvami⁵. Velikost částic závisí na výchozím materiálu, který je vystaven procesu degradace. BC vzniká v podobě malých sferulí o velikosti 0,001 až 0,005 μm, které se shlukují a vytvá-

řejí větší částice 0,1 až 1 μm (cit.⁶). Ještě větší částice – i v řádu mm – tvoří součást nespálených zbytků pevných fosilních paliv (dřevo, uhlí). Specifická plocha povrchu částic BC, důležitá pro modelování osudu, je vysoká, ale proměnná, a to v rozmezí od 1 do 85 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ (naměřeno u sazí)⁷ až do cca 500 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ (u polokoku z javorového dřeva)⁸. Mikroporozita BC bývá v oblasti⁹ šířek < 4–10 Å (cit.⁹). Velikost částic také závisí na teplotě a fázi degra-dačního procesu, ve které se předmětný materiál nachází.

Běžné prvkové složení BC zahrnuje uhlík, vodík, kyslík, dusík a síru. Poměry C:H:N bývají rozmanité, standardně uváděná¹ hodnota průměrné koncentrace uhlíku je 60 %.

Pro BC je typický¹⁰ nízký poměr O/C. Saze (soot) mají nižší poměr O/C (< 0,2) než zuhelnatělý zbytek (char) nebo dřevěné uhlí (char coal) (O/C = 1; 0,2–0,6).

BC je nerozpustný ve vodě a běžných organických rozpouštědlech¹¹. Má schopnost vázat vybrané toxické organické sloučeniny, zachycuje i kovy.

4. Výskyt a působení v biosféře

Výskyt částic BC v různých částech biosféry závisí na procesu jejich vzniku, velikosti, klimatických podmínkách a dalších okolnostech souvisejících s charakterem prostředí, ve kterém vznikly. Například částice větší než 2 mm nemají za běžných klimatických podmínek schopnost vstoupit následně po vzniku do atmosféry. Mohou být spláchnuty deštěm či odváty větrem a stávají se součástí půd, jezerních a říčních sedimentů. Částice v rozsahu cca 2 mm až 1 μm se obvykle nepadají součástí vzdušných proudů a rychle klesají nedaleko místa svého vzniku na zem¹². Hraniční vzdáleností od vodních toků, po jejímž překročení se tyto částice místo odplavení vodou do vodních toků smísí s půdou, je 1 km (cit.¹²). Částice menších rozměrů mají vyšší schopnost zůstat v atmosféře a jsou schopny transportu na větší vzdálenosti¹³.

Více než 80 % BC vzniklého hořením setrvává v blízkém okolí místa vzniku¹⁴. Pak zůstává jako součást půdního sedimentu i po velmi dlouhá časová období. Nebo je dopravován vodními toky a ukládá se při březích nebo na dně řek, jezer, či oceánů. Třetí destinací je atmosféra, ve které zůstává v porovnání s ostatními lokalitami výskytu kratší dobu, obvykle týden nebo déle³. Tato atmosférická frakce BC se však postupně stane součástí sedimentární vrstvy na dně oceánů, kde se dlouho zdržuje ve velmi stabilní formě.

Z některých výzkumů vyplývá, že BC má zřejmě měřitelný účinek na oteplování atmosféry a povrchu země, předně v důsledku rozptýlení a absorpce radiace v atmosféře a též vlivem změn albeda zemského povrchu¹⁵.

Množství BC v globální bilanci uhlíku¹⁶ bylo zpočátku odhadováno na 500–1700 Tg/rok, tj. 20–30 % celkové spálené biomasy. Postupně se odhady snižovaly¹⁷, např. až na 44–194 Tg/rok.

Někteří autoři¹⁴ poukazují na skutečnost, že BC je

důležitý z toho hlediska, že představuje jednu z mála možných cest převedení uhlíku do relativně inertní podoby, ze které se snadno nespojí s kyslíkem na CO_2 . Proto má BC silný potenciál jako zprostředkovatel ukládání (angl. sink) uhlíku a přesunutí z rychlejšího bio-atmosférického uhlíkového cyklu do pomalejšího, resp. dlouhodobějšího geologického uhlíkového cyklu. Obvykle se předpokládá, že většina BC se nachází v půdě¹⁸.

4.1. Pohyb v atmosféře

V čisté grafitické podobě jsou částice BC hydrofobní a chemicky inertní. Postupem doby a též při směšování se sloučeninami tvořícími součásti aerosolu v atmosféře – sírany, dusičnany a s minerálním prachem – se mohou jejich fyzikální a optické vlastnosti měnit. Starší částice BC mohou např. přispívat k nukleaci mraků¹⁹ a na jejich povrchu dochází k heterogenním reakcím²⁰.

Látky adsorbované na BC katalyzují chemické reakce v atmosféře²¹, např. tvorbu kyseliny dusičné, což přispívá k produkci fotochemického ozonu, vzniku smogu a kyselých dešťů.

Atmosférické částice obsahující BC se usazují na povrchu budov, mostů, chrámů i dalších stavebních děl. Zjišťování BC ve vzorcích atmosférických nečistot obsažených na povrchu budov je ovšem vzhledem k jejich nepatrnému množství a velikosti obtížné. Pomocí Py-GC/MS (pyrolýzní plynové chromatografie s hmotnostní detekcí) byl ve vzorcích z různých částí budov Pražského hradu stanoven²² mj. toluen, naftalen, bifenyl, dibenzofuran, chinolin a benzonitril; z nich zvláště benzonitril, který byl mezi produkty pyrolýzy zastoupen největší měrou, patří mezi dobré indikátory přítomnosti BC ve vzorku²³. Jedna studie²⁴ rovněž ukázala, že benzonitril je velice význačným ukazatelem BC jako produktu nedokonalého spalování vegetace a fosilních paliv.

Globální průměrná doba setrvání BC v atmosféře se uvádí²⁵ v rozsahu okolo 5 dní (na základě využití atmosférického modelu ECHAM), z předchozí verze modelu ECHAM vychází globální průměr²⁶ v rozsahu 8 dní. Typická doba setrvání BC v atmosféře je dle dalších autorů³ 4 až 12 dní, z měření prováděných v jižním Skotsku.

Účinky BC v atmosféře nejsou zcela jednoznačné. V rozporu s dříve uvedenými závěry výzkumů¹⁵ další badatelé uvádějí, že BC má potenciál²⁷ průměrné světové teploty snížit o 0,5 °C, nebo je zvýšit o 1,08 °C. Jakým směrem se bude vývoj průměrné teploty na Zemi vyvíjet, určuje z hlediska BC způsob tvorby těchto částic. Také jejich poloha v atmosféře ovlivňuje účinek na světové klima. V pozici nad mraky absorbují částice teplo snadněji a způsobují zahřívání, pod nimi naopak na zahřívání nepůsobí v takové míře. Vliv na změny klimatu je stále předmětem rozsáhlých debat.

4.2. Ukládání ve vodním prostředí (včetně sněhu aj.)

Po jisté době setrvání v atmosféře, do které vstupují částice BC v podobě aerosolu, se dostávají buď přímo

Tabulka I

Koncentrace BC ve vodním prostředí (říční a mořské sedimenty)

Vzorek/místo	BC [%]	TOC [%]
Invalidovna 2 ^a	0,20	4,80
Invalidovna 3 ^a	0,13	5,02
Džbán L1 ^a	1,25	3,69
Džbán P1 ^a	1,96	4,53
Řeka Anacostia ^b	0,32 ^c /0,46 ^d	3,99
Přístav v Baltimore ^b	0,46 ^c /1,56 ^d	11,3
Řeka Hudson ^b	0,46 ^c /0,51 ^d	3,69
Řeka Grasse ^b	0,30 ^c /0,15 ^d	7,15
Řeka Milwaukee ^b	1,91 ^c /0,73 ^d	2,82
Záliv u Cádiz ^e	0,03 ^f /0,08 ^g	0,5–1,4 (0,88) ^h

^a Sýkorová a spol.²⁴, ^b Grossman a spol.²⁸, ^c CTO-375 (chemotermická oxidace, viz kap. 5), ^d chemická oxidace, ^e Sánchez-García a spol.²⁹, ^f CTO-375, ^g BPCA (analýza pomocí benzen-polykarboxylové kyseliny), ^h rozsah (průměr) z 15 měření; TOC = celkový organický uhlík

prostřednictvím atmosférické depozice, nebo nepřímo spolu se suspendovanými pevnými látkami odtékajícími vodami nebo s půdou uvolněnou erozí do vodního prostředí¹.

Příklady koncentrace BC ve vodním prostředí²⁴ uvádí tab. I, a sice pro říční a potoční sedimenty z České republiky (Praha – Vltava, vodní nádrž Džbán), USA²⁸ (řeky Anacostia, Hudson a další) a pro mořské sedimenty z USA (přístav Baltimore) – a Španělska²⁹ (záliv Cádiz).

Přítomnost BC byla zjištěna v hlouběji uložených sedimentech v Atlantickém a Tichém oceánu, kde tvoří v některých případech 12–47 % sedimentovaného organického uhlíku^{30,31}.

Srážení sazí na sněhu způsobuje snížení schopnosti arktického ledu odrážet sluneční záření a patrně tak přispívá ke globálnímu oteplování³².

Vliv BC na tání ledovců je stále nejistý; studií obsahu BC v ledovcích je zatím velké množství a studie tání dosud nedostatečně vysvětlují přirozené nečistoty jako prach z půdy a působení řas či nesnadné modelování v oblastech s horským terénem¹¹.

4.3. Půdní prostředí

V půdě a sedimentech se vyskytuje: a) organický uhlík vzniklý biogeneticky či ve fázi diagenese sedimentárních hornin a b) BC či jiná forma uhlíku vzniklá teplotní degradací fosilních paliv či biomasy, které na sebe sorbují hydrofobní organické sloučeniny, např. polycyklické aromatické uhlovodíky.

V tab. II jsou uvedeny příklady koncentrace BC v půdním prostředí³³ různých zemí. Kromě vzorku z Nanjing v Číně, jehož hmotnostní podíl BC byl stanovován

Tabulka II

Hmotnostní podíl BC v půdním prostředí a sedimentech³³

Původ vzorku	BC [mg g ⁻¹]	TOC [mg g ⁻¹]
<i>Půda</i>		
Austrálie, pozemek CSIRO	2,53	50,46
Norsko	1,4 ^a	287 ^a
Spojené království	1,2 ^a	183 ^a
Švýcarsko	1,1	64,96
ostrov Tenerife	0,76	29
Čína; Nanjing, město	4,35 ^b	10,65 ^b
Čína; Xuzhou, město (silnice)	29,2	–
Čína; Xuzhou, město (pozdí)	3,8	–
<i>Sedimenty</i>		
USA, zátoka North Quincy	6	36,8
USA, zátoka South Dorchester	2,6	14,6
USA, Mexický záliv	1,7	28,6
USA, Mystic Lake	6,6	54,7

^a Geometrický průměr; ^b stanoveno chemickou oxidací (ostatní metodou CTO-375)

metodou chemické oxidace, byla pro všechny ostatní vzorky použita metoda CTO-375.

Již zmiňovanou vysokou odolností vůči rozkladu, která byla řadu let považována za charakteristickou vlastnost BC, řada studií zpochybňuje. Ve dvou studiích rozkladu zuhelnatělých rýžových slupek se v aerobních a anaerobních podmínkách za téměř 3 roky na CO₂ mineralizovalo 4,4 %, resp. 8,5 % BC (cit.³⁴). Tyto výsledky kontrastují se stářím až 9500 let, stanoveným³⁵ pro ¹⁴C půd ve Skandinávii a střední Evropě. Střední doba setrvání BC v oceánských sedimentech byla jinými autory³⁰ odhadnuta na 2400 až 13 900 let. V poslední době někteří badatelé³⁶ zvažují možnost, že část BC podléhá rozkladu snadno, část je vůči chemickému či biologickému působení odolná.

Pomocí ¹³C NMR byla nalezena³⁷ značná podobnost spektroskopických vlastností a chemického složení huminových kyselin vzniklých laboratorní oxidací BC (k metodám oxidace a stanovení viz též cit.³⁸) a huminových kyselin přirozeně přítomných v půdách. Na základě toho se BC pokládá za možný zdroj huminových kyselin.

5. Metody stanovení

V literatuře lze nalézt řadu různých metod ke stanovení BC, založených na rozličných fyzikálních či chemických principech. Každá z těchto metod ovšem kvantifikuje s ohledem na odlišné principy nebo experimentální podmínky jinou část „kontinua BC“ (viz tab. III). V praxi se proto někdy využívá kombinace analytických metod. Tzv.

Tabulka III

„Kontinuum BC“, spolu s odhadem možnosti kvantitativního stanovení BC uvedenými metodami¹⁸ (viz kap. 5. Metody stanovení) v různých oblastech kontinua

Materiál Definice	Palivo přírodní uhlík	Nespálený zbytek		Kondenzáty spalin	
				„black carbon“	
Terminologie „kontinua“	biomasa	zuhelnatělá biomasa	dřevěné uhlí		saze
Metody					
	CTO-375 ^a	—	—	částečně	lze použít
	TOT/TOR ^a		lze použít pro všechny typy výchozích analytů		
	Rock-Eval ^a		lze použít pro všechny typy výchozích analytů		
	Chemická oxidace	—	—	částečně	lze použít
	BPCA ^a	—	lze do jisté míry použít pro tyto analyty		

^a viz Seznam použitých zkratk

Řídící výbor pro Black Carbon (BCSC) v pokusu o určení, kterou část kontinua jaká metoda deteguje a jak se výsledné hodnoty vztahují k výsledkům ostatních metod, rozvinul použití referenčních materiálů³⁹.

Kromě omezených detekčních rozsahů různých metod je také vhodné při analýze vzorků vzít v úvahu možnost ovlivnění výsledků přítomností látek, které se při analýze budou v rámci dané metody chovat jako BC.

Metody stanovení BC se někdy třídí¹⁸ do šesti skupin: mikroskopické, optické, termické, chemické, spektroskopické, s využitím molekulárních markerů. Tyto principy se rovněž mohou navzájem kombinovat.

Do takto vznikající široké škály analytických metod používaných ke stanovení uhlíkatých částic patří mj.: termogravimetrie v kombinaci s kalorimetrií, optická a rastrovací/transmisní elektronová mikroskopie, petrografie, stanovení TOC, elementární analýza, spektroskopie ¹³C NMR, FTIR či Ramanova spektroskopie, Py-GC/MS a další⁴⁰.

Dále jsou stručně popsány dvě nejčastěji používané skupiny metod – chemické a termické.

Chemické metody využívají roztoky silných oxidačních činidel (např. H₂O₂ či Cr₂O₇²⁻), které se přidají ke vzorku, aby odstranily organickou hmotu lišící se od BC. Výhodou oproti dále jmenovaným termickým metodám je zabránění uhelnatění⁴⁰. Hlavní nevýhodou je možnost ztrát částic na vnitřním povrchu zkumavek nebo i akumulaci na rozhraní vody a vzduchu (díky jejich hydrofobnímu charakteru) při rozsáhlé manipulaci se vzorky ve vodných roztocích⁴¹.

Základem použití termických metod pro stanovení obsahu BC ve vzorcích je rozdíl v termické stabilitě. Předpona chemo- připojená ke slovu „termické“ rozlišuje metody, které využívají chemické úpravy vzorků k odstranění uhlíku mimo stanovované frakce. Pro tyto metody se užívá zkratky CTO, často doplněné o udání teploty, za které dochází k laboratornímu spalování frakcí obsahujících organický uhlík jiného charakteru než BC. Zřejmě nejčastěji se

setkáme⁴² se zápisem CTO-375, který označuje běžnou metodu spalování při teplotě v rozsahu 340–375 °C po dobu 2–24 hodin. Další varianty metody uplatňují jiné teploty a různé doby spalování.

Anorganický uhlík a organický uhlík mimo BC se v přípravné fázi ze vzorku odstraňuje např. pomocí NaOH, HNO₃, HCl, HF, nebo TFA.

Někteří badatelé⁴³ s využitím referenčních materiálů BCSC aplikovali metodu přidavků standardu.

Velmi známou metodou, která se primárně používala při ropném průzkumu k určení typu a stupně přeměny organické hmoty ve zdrojové hornině, je analýza „Rock-Eval“. Sestává ze dvou stupňů. V prvním se vzorek zahřeje za nepřístupu kyslíku, poté se ochladí a následně znovu zahřeje v oxidační atmosféře⁴⁴.

6. Vliv na lidské zdraví

Některé studie uvádí BC do souvislosti s výskytem dýchacích a kardiovaskulárních onemocnění u člověka. Polutanty z ovzduší ve formě nepatrných částic sazí mohou migrovat hluboko do našich plic spolu s nasorbovanými velmi toxickými, často též karcinogenními sloučeninami, jako např. polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)⁴⁵. Pro vdechované částice o průměru přesahujícím 4 μm bylo zjištěno⁴⁶, že v plicních sklípcích se jejich depozice snižuje se vzrůstající velikostí; dále se částice ukládají v nosní dutině, ústech a krku.

Účinky částic BC na lidské zdraví závisí na jejich velikosti a na látkách, které jsou na jejich povrchu sorbovány¹⁵. Vzhledem k tomu, že částice BC se v ovzduší vyskytovaly již v předindustriální době (samovolné požáry lesů, spalování fosilních paliv) a jejich výskytu nelze z tohoto důvodu předejít, jeví se vhodným tento problém řešit především na straně toxických látek, které se obvykle na BC sorbují. Také je třeba zlepšit technologii spalování fosilních paliv a omezit tvorbu BC z dopravy.

7. Příznivé vlastnosti BC

Částice BC jsou často v odborných člancích chápány jako faktor působící v životním prostředí a přímo na člověka negativně. Specifický charakter BC má však i pozitivní vliv.

V sedimentech vyskytujících se ve vodním prostředí, kde obsah BC přesahuje 1 % TOC (cit.⁵) (medián z dostupných dat odkazovaných tamtéž pro půdy a sedimenty nabývá hodnot 3 a 9 %, s extrémy až 40 % i více), dominuje sorpce na BC; BC přitom v roli adsorbenta POPs vykazuje mnohem větší účinnost než jiné složky organické hmoty. Uvedený poměr vůči TOC je typický v oblastech, které jsou předmětem zájmu toxikologů a kde se hodnotí rizika pro vodní organismy, tj. pro znečištěné oblasti – místa sloužící jako sídla průmyslových podniků či hustě osídlené oblasti. BC zde tedy může hrát významnou roli při zadržení toxických látek a snížení hrozby těchto látek pro ve vodě žijící organismy. Účinnost sorpce BC v porovnání s molekulami DOM vyjadřuje např. relativní důležitost sorpce PCB na BC, která dosahuje až 90 %; pro sorpci PAU na BC je to dokonce až 95 % (cit.⁴⁷).

V půdním prostředí BC patrně kromě zvyšování produktivity půd a zachycování živin pro rostliny⁴⁸ zadržuje vodu a posiluje stabilitu vůči erozi⁴⁹ a rovněž podněcuje nárůst mikrobiální biomasy i její aktivity⁵⁰.

8. Závěr

Black carbon je významnou součástí života všech organismů na Zemi, ať už žijí ve vzduchu, na zemi, v půdě, nebo ve vodě. Tvoří nepřehlédnutelnou součást koloběhu uhlíku. Ukazuje se, že jeho vlastnosti vykazují značnou proměnlivost a odpovídají charakteru výchozích materiálů a procesu jeho tvorby. Účinky na zdraví člověka mohou být nepříznivé, zvláště pokud se na částice BC sorbují toxické látky. Schopnost vázat toxické sloučeniny však jeho negativní vlivy pro ekosystémy za určitých podmínek naopak zmírňuje. V půdě BC prospívá rostlinám zachycováním živin, zadržováním vody a zvýšením stability půdy vůči erozi. Tím se zvyšuje produktivita půd pro zemědělské účely. Při stanovení BC v analytu je nutné přihlídnout k podmínkám jeho tvorby a pokud jsou tyto neznámé, volit vyhovující škálu metod zajišťující kvalitní výsledky analýzy dle žádaného účelu.

Tato práce vznikla za finanční podpory Grantové agentury České republiky (grant č. 13-18482S).

Seznam použitých zkratk

¹³ C NMR	spektroskopie nukleární magnetické rezonance s využitím isotopu ¹³ C
BCSC	Řídicí výbor pro Black Carbon (angl. Black Carbon Steering Committee)
BPCA	analýza pomocí benzen-polykarboxylové kyseliny

CTO-375	chemotermická oxidace
DOM	rozpuštěná organická hmota
PAU	polycyklické aromatické uhlovodíky
POPs	perzistentní organické látky
Py-GC/MS	pyrolýzní plynová chromatografie s hmotnostní detekcí
TOC	celkový organický uhlík
TOT/TOR	termická optická transmise/odraznost

LITERATURA

- Goldberg E. D.: *Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution*. J. Wiley, New York 1985.
- Kuhlbusch T. A. J., Crutzen P. J.: *Global Biogeochem. Cycles* 9, 491 (1995).
- Cape J. N., Coyle M., Dumitrean P.: *Atmos. Environ.* 59, 256 (2012).
- Dickens A. F., Gélinas Y., Masiello C. A., Wakeham S., Hedges J. I.: *Nature* 427, 336 (2004).
- Koelmans A. A., Jonker M. T. O., Cornelissen G., Bucheli, T. D., Van Noort P. C. M., Gustafsson Ö.: *Chemosphere* 63, 365 (2006).
- U. S. Environmental Protection Agency: Report to Congress on Black Carbon, 2012.
- Rockne K. J., Taghon G. L., Kosson D. S.: *Chemosphere* 41, 1125 (2002).
- Sander M., Pignatello J. J.: *Environ. Sci. Technol.* 39, 1606 (2005).
- Cornelissen G., Elmquist M., Groth I., Gustafsson Ö.: *Environ. Sci. Technol.* 38, 3574 (2004).
- Hedges J. I., Eglinton G., Hatcher P. G., Kirchman, D. L., Arnosti C., Derenne S., Evershed R. P., Kögel-Knabner I., de Leeuw J. W., Littke R., Michaelis W., Rullkötter J.: *Org. Geochem.* 31, 945 (2000).
- Bond T. C., Doherty S. J., Fahey D. W., Forster P. M., Berntsen T., DeAngelo B. J., Flanner M. G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P. K., Sarofim M. C., Schultz M. G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S. K., Hopke P. K., Jacobson M. Z., Kaiser J. W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J. P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S. G., Zender C. S.: *J. Geophys. Res.: Atmos.* 118, 5380 (2013).
- Clark J. S., Patterson W. A., v knize: *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change* (Clark J. S., Cachier H., Goldammer J. G., Stocks B. J., ed.), str. 23–48. Springer Verlag, Berlin 1997.
- Suman D. O., Kuhlbusch T. A. J., Lim B., v knize: *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change* (Clark J. S., Cachier H., Goldammer J. G., Stocks B. J., ed.) str. 271–293. Springer Verlag, Berlin 1997.
- Forbes M. S., Raison R. J., Skjemstad J. O.: *Sci. Total Environ.* 370, 190 (2006).
- Shrestha G., Traina S. J., Swanston C. W.: *Sustainability* 2, 294 (2010).
- Seiler W., Crutzen P. J.: *Clim. Change* 2, 207 (1980).

17. Kuhlbusch T. A. J., Crutzen P. J., v knize: *Biomass Burning and Global Change* (Levine J. S., ed.), sv. 1, kap. 16, str. 160–9. The MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 1996.
18. Masiello C. A.: *Mar. Chem.* 92, 201 (2004).
19. Lammel G., Novakov T.: *Atmos. Environ.* 29, 813 (1995).
20. Ahmed T., Dutkiewicz V. A., Shareef A., Tuncel G., Tuncel S., Husain L.: *Atmos. Environ.* 43, 6305 (2009).
21. Ammann M., Kalberer M., Jost D. T., Tobler L., Rössler E., Piguet D., Gäggeler H. W., Baltensperger U.: *Nature* 395, 157 (1998).
22. Sýkorová, I., Havelcová M., Zeman A., Trejtnarová H.: *Sci. Total Environ.* 409, 4606 (2011).
23. Kaal J., Cortizas A. M., Nierop K. G. J.: *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 85, 408 (2009).
24. Sýkorová I., Havelcová M., Trejtnarová H., Matysová P., Vašíček M., Kříbek B., Suchý V., Kotlík B.: *Int. J. Coal Geol.* 80, 69 (2009).
25. Stier P., Feichter J., Kinne S., Kloster S., Vignati E., Wilson J., Ganzeveld L., Tegen I., Werner M., Balkanski Y., Schulz M., Boucher O., Minikin, A., Peterzold, A.: *Atmos. Chem. Phys.* 5, 1125 (2005).
26. Lohmann U., Feichter J., Chuang C. C., Penner J. E.: *J. Geophys. Res.* 104, 9169 (1999).
27. Doherty S. J., Grenfell T. C., Forsström S., Hegg D. L., Brandt R. E., Warren S. G.: *J. Geophys. Res.: Atmos.* 118, 5553 (2013).
28. Grossman A., Ghosh U.: *Chemosphere* 75, 469 (2009).
29. Sánchez-García L., de Andrés J. R., Gélinas Y., Schmidt M. W. I., Louchouart P.: *Mar. Chem.* 151, 13 (2013).
30. Masiello C. A., Druffel E. R. M.: *Science* 280, 1911 (1998).
31. Middelburg J. J., Nieuwenhuize J., van Breugel P.: *Mar. Chem.* 65, 245 (1999).
32. Hansen J., Nazarenko L.: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101, 423 (2004).
33. Liu S., Xia X., Zhai Y., Wang R., Liu T., Zhang S.: *Chemosphere* 82, 223 (2011).
34. Knoblauch Ch., Maarifat A.-A., Pfeiffer E.-M., Haefele S. M.: *Soil Biol. Biochem.* 43, 1768 (2011).
35. Gerlach R., Baumewerd-Schmidt H., van den Borg K., Eckmeier E., Schmidt M. W. I.: *Geoderma* 136, 38 (2006).
36. Rovira P., Vallejo V. R.: *Soil Biol. Biochem.* 39, 202 (2007).
37. Haumaier L., Zech W.: *Org. Geochem.* 23, 191 (1995).
38. Praus P., Klika Z., Kurková M., de Lourdes Pacheco Ma.: *Acta Geodyn. Geomater.* 1/4 (136), 7 (2004).
39. Poot A., Quik J. T. K., Veld H., Koelmans A. A.: *J. Chromatogr., A*, 1216, 613 (2009).
40. Song J., Peng P., Huang W.: *Environ. Sci. Technol.* 36, 3960 (2002).
41. Gélinas Y., Prentice K. M., Baldock J. A., Hedges J. I.: *Environ. Sci. Technol.* 35, 3519 (2001).
42. Elmquist M., Gustafsson Ö., Andersson P.: *Limnol. Oceanogr.: Methods* 2, 417 (2004).
43. Zhan Ch., Han Y., Cao J., Wei Ch., Zhang J., An Zh.: *Chemosphere* 91, 1462 (2013).
44. Lafargue E., Marquis F., Pillot D.: *Rev. Inst. Fr. Pet.* 53, 421 (1998).
45. Morawska L., Zhang J. F.: *Chemosphere* 49, 1045 (2002).
46. Lippmann M., Albert R. E.: *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 30, 257 (1969).
47. Lohmann R., MacFarlane J. K., Gschwend P. M.: *Environ. Sci. Technol.* 39, 141 (2005).
48. Novak J. M., Busscher W. J., Laird D. L., Ahmedna M., Watts D. W., Niandou M. A. S.: *Soil Sci.* 174, 105 (2009).
49. Piccolo A., Pietramellara G., Mbagwu J. S. C.: *Soil Use Manage.* 12, 209 (1996).
50. Gaskin J. W., Steiner C., Harris K., Das K. C., Bibens B.: *Trans. ASABE* 51, 2061 (2008).

J. Blažek, I. Sýkorová, and M. Havelcová (*Institute of Rock Structure and Mechanics, Academy of Science of the Czech Republic*): **Black Carbon as a Product of Imperfect Combustion – Formation, Characteristics, Occurrence, and Methods of Determination**

Black carbon (BC) occurs in atmosphere, soil and marine sediments as a product of either imperfect combustion of fuels and biomass or weathering. The processes occur under various conditions which determine the size of BC particles and their unique parameters important for its useful or harmful effects.

BC particles make their way through biosphere and sooner or later come to a certain state of standstill caused by high resistance to a range of degradation agents. BC also consists of a fraction that can readily undergo biochemical reactions.

Both noxious and favourable effects of BC on human health are discussed. BC is efficient in aquatic sediments and also in soils, where it promotes retention of plant nutrients. It is also instrumental in water retention and helps against soil erosion.