

ANTROPOGENNÍ OVLIVNĚNÍ OXIDU UHLIČITÉHO V JESKYNI V OBDOBÍ POTLAČENÉ VENTILACE (BALCARKA, MORAVSKÝ KRAS)

Anthropogenic influence on carbon dioxide in cave during period of limited ventilation (Balcarka Cave, Moravian Karst)

Marek Lang, Jiří Faimon

Ústav geologických věd PřF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno; e-mail: 309580@mail.muni.cz

(24-23 Protivanov)

Key words: anthropogenic flux, Balcarka Cave, carbon dioxide, cave airflows, dynamic model

Abstract

An anthropogenic impact on carbon dioxide (CO_2) concentrations was studied in the Balcarka Cave (Moravian Karst). The variables such as CO_2 concentrations, cave/external temperatures, and number of visitors (attendance) were monitored in the Gallery Chamber and exterior with two-minute step during two-day monitoring campaign. For interpretation of the found data, a dynamic model was proposed. Modeling showed that the CO_2 levels in the chamber under given conditions were controlled by the different CO_2 concentrations in adjacent cave spaces and by the cave airflows driven by difference between the temperatures in cave and exterior, ΔT . The adjacent CO_2 concentrations were $(3.00\text{--}3.30) \cdot 10^{-2} \text{ mol m}^{-3}$ (DAF ventilation mode) and $2.57 \cdot 10^{-2} \text{ mol m}^{-3}$ (UAF ventilation mode). There was identified a time shift between switching both the individual ventilation modes: the UAF mode switched over to DAF mode at non-zero temperature difference, $\Delta T = -2^\circ\text{C}$. The overall natural net input of CO_2 into the studied chamber was $8 \cdot 10^{-5} \text{ mol s}^{-1}$. The anthropogenic CO_2 appeared as the peaks superimposed onto the natural CO_2 concentrations. The peaks heights correspond to (i) number of visitors and (ii) period of their staying. The overall anthropogenic CO_2 flux into the studied chamber varied from $8 \cdot 10^{-5}$ to $3.47 \cdot 10^{-3} \text{ mol min}^{-1}$. This flux normalized to person number was $4 \cdot 10^{-3} \text{ mol min}^{-1}$.

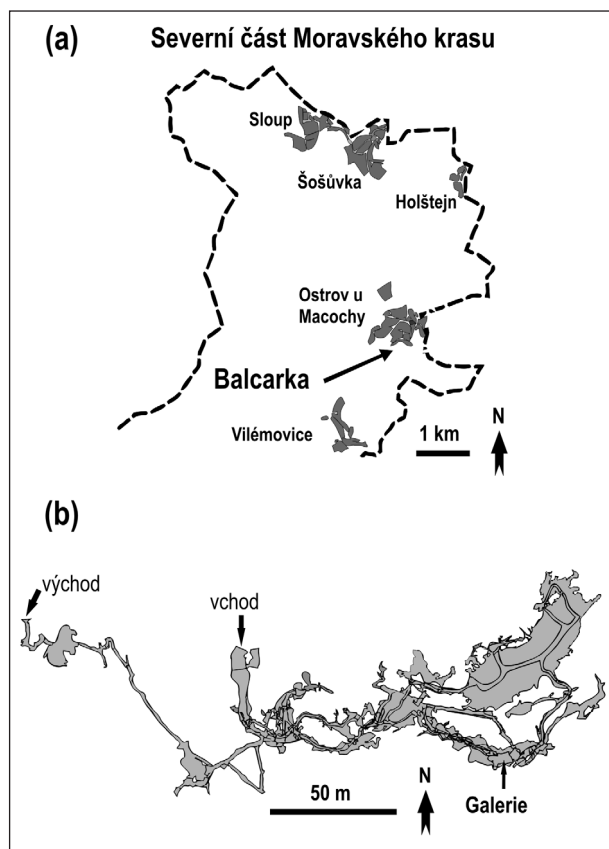
Úvod

Oxid uhličitý hraje klíčovou roli v krasových procesech, jakými jsou rozpouštění vápenců a růst kalcitových speleotém. Hnací síly těchto procesů jsou principiálně dány rozdílem mezi (1) parciálním tlakem CO_2 v půdách/epikrasu, ${}^{(\text{EK})}\text{P}_{\text{CO}_2(\text{g})}$, a (2) parciálním tlakem CO_2 v jeskynní atmosféře, ${}^{(\text{J})}\text{P}_{\text{CO}_2(\text{g})}$. Vyšší ${}^{(\text{EK})}\text{P}_{\text{CO}_2(\text{g})}$ řídí rozpouštění vápenců a chemické složení prosakujících vod vadózní zónou. Nižší ${}^{(\text{J})}\text{P}_{\text{CO}_2(\text{g})}$ v jeskyni řídí odplynění „přebytečného“ CO_2 ze skapových vod, s následným růstem pH, přesycení vod kalcitem a tvorbou kalcitových speleotém (Faimon et al. 2012a). Okamžité koncentrace CO_2 v jeskynní atmosféře představují dynamický stav, při kterém je suma toků CO_2 do jeskyně vyrovnávána tokem CO_2 ven z jeskyně. Vstupní toky CO_2 do jeskyně zahrnují (1) přirozené toky, spojené především s (i) difuzí CO_2 z epikrasu, (ii) odplyňováním skapových vod (Bourges et al. 2001), (iii) prouděním vzduchu z hlubších pasáží jeskyně, a (iv) endogenním CO_2 (Batiot-Guilhe et al. 2007) a (2) antropogenní tok (CO_2 vydechovaný návštěvníky jeskyně) (Dragovich a Grose 1990; Faimon et al. 2006). Výstupní tok CO_2 z jeskyně je řízen ventilací jeskyně. Proudění vzduchu jeskyní závisí na (1) rozdílech v hustotách vzduchu v jeskynní a venkovní atmosféře (de Freitas et al. 1982; Bourges et al. 2001; Spötl et al. 2005) a (2) geometrii jeskyně. Protože hustota vzduchu je nejméně ovlivňována teplotou, rozdíly v hustotách jeskynního a venkovního vzduchu zhruba odpovídají rozdílu mezi teplotou vzduchu v jeskyni a ve venkovním prostředí. Hlavní řídicí parametr proudění vzduchu v jeskyni tak představuje teplotní rozdíl $\Delta T = T_{\text{exteriér}} - T_{\text{jeskyně}}$ (kde $T_{\text{exteriér}}$ je teplota ve vnější atmosféře a $T_{\text{jeskyně}}$ je teplota v jeskyni) (Buecher 1999; Russell a MacLean 2008; Kowalczk a Froelich 2010). Podle ventilace jsou jeskyně

klasifikovány do dvou skupin: (i) statické jeskyně (jeskyně s jedním vchodem) a (ii) dynamické jeskyně (jeskyně s dvěma a více vchody s různou nadmořskou výškou) (Geiger 1966; Bögli 1978). Podle znaménka teplotního rozdílu se mění směry proudění: u dynamických jeskyní lze rozlišit tři různé režimy ventilace (ventilační módy): (1) UAF mód se vzestupným prouděním (upward airflow mode), (2) DAF mód se sestupným prouděním (downward airflow mode) a (3) přechodový mód s neustáleným prouděním (Faimon et al. 2012b; Faimon a Lang 2013). V závislosti na rozsahu ventilace můžeme u dynamických jeskyní rozlišit dvě hlavní období: období aktivní ventilace a období potlačené ventilace. Během období aktivní ventilace je doba zadržení vzduchu v jeskyni delší než doba trvání aktuálního ventilačního módu a dochází ke kompletní výměně vzduchu v jeskyni. V období potlačené ventilace je doba zadržení vzduchu v jeskyni kratší než doba trvání aktuálního ventilačního módu: dříve než dojde k výměně vzduchu v jeskyni, dojde k obrácení směru proudění. Tímto způsobem jsou větrány pouze vstupní pasáže jeskyně (Faimon et al. 2012b). Cíle práce spočívaly v (1) upřesnění představ o mechanismech a projevech antropogenních vlivů v jeskyni, (2) navržení dynamického modelu a (3) kvantifikaci antropogenního ovlivnění.

Místo studia

Studie byla provedena v jeskyni Balcarka. Jeskyně je budována ve svrchnodevonských vápencích Macošského souvrství v severní části Moravského krasu v blízkosti obce Ostrov u Macochy (obr. 1a). Jeskyně je dlouhá 350 m a mocnost nadloží se pohybuje od 20 do 50 m. Je tvořena úzkými chodbami a dómy s bohatou jeskynní výzdobou rozkládajícími se ve dvou patrech. Vzhledem k morfologii



Obr. 1: Pozice jeskyně (a) a mapa jeskyně s místem monitoringu (b) (Balák, nepublikovaná práce).
 Fig. 1: The cave position (a) and cave map with monitoring site (b) (Balák, unpublished work).

jeskyně a rozdílně položeným vchodům se jedná o dynamickou jeskyni. Jeskyně je otevřená pro turisty a průměrná návštěvnost představuje 30–40 000 návštěvníků za rok. Pro monitoring sledovaných proměnných byl vybrán dóm Galerie v hlubších pasážích jeskyně (obr. 1b).

Monitoring

Data prezentovaná v této práci byla naměřena v říjnu 2013. Koncentrace oxidu uhličitého a teplota vzduchu v jeskyni byly kontinuálně měřeny ve výšce přibližně 1 m nad podlahou jeskyně. Teplota vzduchu ve venkovní atmosféře byla měřena v blízkosti východu jeskyně. Proměnné byly monitorovány po dobu 48 hodin s krokem měření 1 minuta. K monitorování koncentrací oxidu uhličitého v jeskynní atmosféře byla použita dvoukanálová ruční spektrální sonda FY A600-CO₂H propojená s přenosným dataloggerem ALMEMO 2590-4S, Ahlborn, Germany (rozsah měření 0 až 10 000 ppmv s rozlišením ± 1 ppmv). Teplota vzduchu v jeskynní a venkovní atmosféře byla měřena teploměrem/vlhkoměrem s dataloggerem COMET S3120 (rozsah teplot -30 až 70 °C s přesností ± 0,4 °C). Naměřená data byla zpracována v programech Microsoft Excel a STATISTICA verze 10 (Statistica 2014).

Výsledky a analýza dat

Data

Koncentrace CO₂ byly měřeny při venkovních teplotách pohybujících se v rozsahu od 1,3 do 15,1 °C. Při téměř

konstantní teplotě uvnitř jeskyně (8,7 °C) po celou dobu měření variovaly hodnoty teplotního rozdílu ΔT v závislosti na venkovní teplotě od -7,3 do 6,3 °C. Koncentrace CO₂ variovaly kolem průměrné hodnoty 673 ppmv (nejvyšší naměřená hodnota byla 896 ppmv, nejnižší naměřená hodnota byla 567 ppmv). Během prvních hodin monitoringu prošly jeskyní 4 skupiny návštěvníků o celkovém počtu 49 osob. Vývoj koncentrací CO₂ v závislosti na teplotním rozdílu ΔT a návštěvnosti je znázorněn na obrázku 2. Numerické výpočty byly provedeny Eulerovou metodou v programu MS Excel.

Modelování

Pro interpretaci naměřených dat byl navržen dynamický model reprezentující monitorovaný dóm. Model se skládá ze tří rezervoárů (Galerie a dvou přilehlých prostor, sousedních rezervoárů 1 a 2) (obr. 3). Monitoring probíhal v dómu Galerie. Rezervoár 1 reprezentuje vstupní pasáže jeskyně a rezervoár 2 hlubší pasáže jeskyně. Okamžité koncentrace CO₂ v jeskynním dómu jsou dány bilancí všech toků CO₂ do/z dómu. V rámci modelování byly uvažovány 4 hlavní toky: (1) přírodní tok j_N (spojený s přímou difúzí CO₂ z epikrasu a odplyňováním skapových vod), (2) antropogenní tok j_A (CO₂ vydechovaný návštěvníky jeskyně), (3) tok $j_{(adj)}$ ze sousedních jeskynních dómů (spojený s ventilací jeskyně) a (4) tok vystupující z dómu $j_{(out)}$ (řízený ventilací). Toky CO₂ do dómu Galerie (modelový hlavní rezervoár) jsou považovány za kladné (znaménko +) a tok z dómu za negativní (znaménko -). Celkový tok CO₂ do rezervoáru (dómu Galerie), j [mol s⁻¹] je dán sumou jednotlivých toků,

$$j = \frac{dn_{CO_2}}{dt} = \frac{Vdc}{dt} = j_N + j_A + j_{(adj)} + j_{(out)}, \quad (1)$$

kde n_{CO_2} je celkový obsah CO₂ v rezervoáru [mol], V je objem monitorovaného dómu [m³], c je aktuální koncentrace CO₂ v monitorovaném dómu [mol m⁻³], t je čas [s] a j_N , j_A , $j_{(adj)}$ a $j_{(out)}$ představují jednotlivé toky [mol s⁻¹]. Toky $j_{(adj)}$ a $j_{(out)}$ jsou funkcí ventilace a mohou být vyjádřeny jako

$$j_{(adj)} = vc_{(adj)} \quad (2)$$

a

$$j_{(out)} = -vc, \quad (3)$$

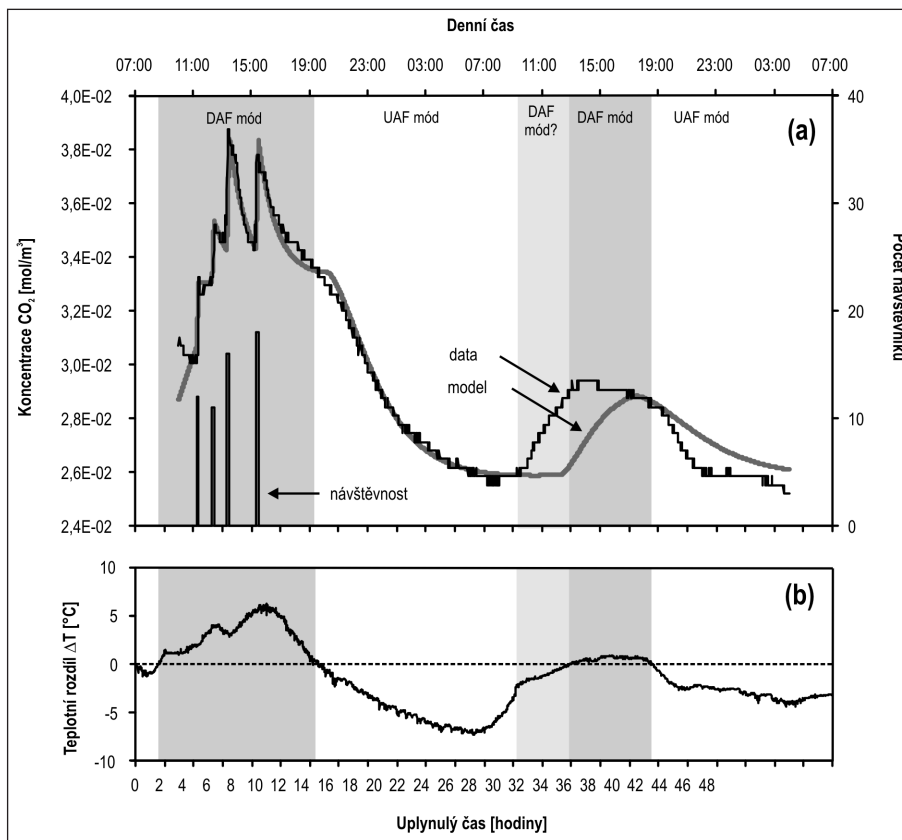
kde v je objemová rychlost proudění vzduchu [m³ s⁻¹] a $c_{(adj)}$ je koncentrace CO₂ v sousedních jeskynních dómech [mol m⁻³]. Po dosazení toků do rovnice (1) a úpravách dostáváme

$$\frac{dc}{dt} = \frac{j_A}{V} + \frac{j_N + vc_{(adj)}}{V} - \frac{vc}{V}. \quad (4)$$

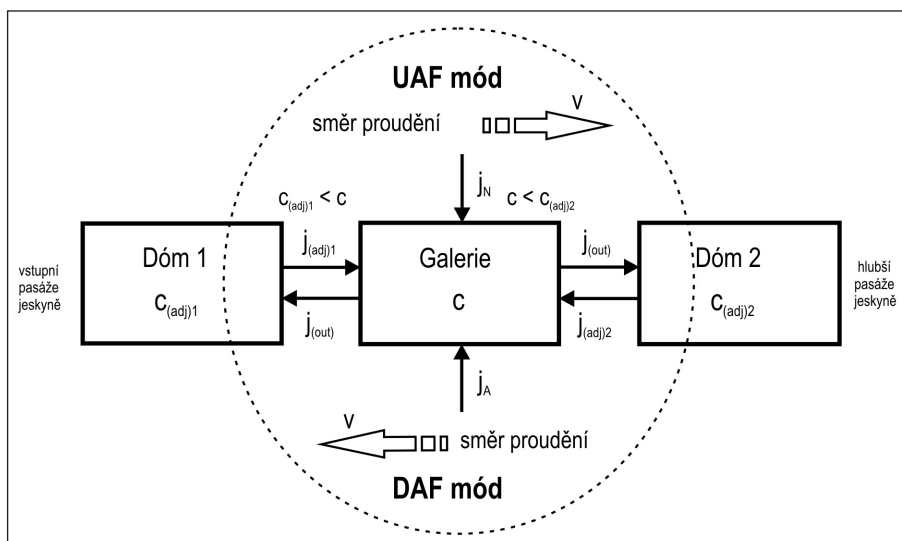
Objemová rychlost proudění bylo počítána podle vztahu

$$v = k_{\Delta T} \sqrt{\Delta T}, \quad (5)$$

viz Faïmon a Lang (2013), kde $\Delta T = T_{\text{exteriér}} - T_{\text{jeskyně}}$ a $k_{\Delta T}$ je konstanta úměrnosti [m³ min⁻¹ deg^{-1/2}].



Obr. 2: Proložení dat oxidu uhličitého teoretickou modelovou křivkou (a) v závislosti na teplotním rozdílu jeskyně (b) (Balcarka, Galerie).
 Fig. 2: Fitting the carbon dioxide data by theoretical model curve (a) based on the cave temperature difference (b) (Balcarka Cave, Gallery).



Obr. 3: Konceptuální model dynamiky oxidu uhličitého v atmosféře jeskynního dómu.
 Fig. 3: Conceptual model of carbon dioxide dynamics in cave chamber atmosphere.

Antropogenní toky CO₂ byly počítány podle vztahu

$$j_A = k_{at} \cdot A, \tag{6}$$

kde A je návštěvnost [počet návštěvníků] a k_{at} je příslušná konstanta úměrnosti [mol min⁻¹].

Data naznačila vliv rozdílných koncentrací CO₂ v prostorách sousedících s rezervoárem (dómem) v závislosti

na směr proudění (jednotlivých ventilačních módech). Tyto koncentrace byly hledány regresí dat jako parametry: c_{(adj) UAF} (pro časový úsek v UAF módu) a c_{(adj) DAF1}, resp. c_{(adj) DAF2} (pro rozdílné časové úseky v DAF módu). Celkový objem rezervoáru (monitorovaný dóm) byl odhadnut na 150 m³. Numerickým řešením rovnice (4) byly simulovány koncentrace CO₂. Výsledné parametry modelu jsou v tabulce 1. Proložení naměřených dat modelovou teoretickou křivkou CO₂ je znázorněno na obrázku 2a.

Diskuze

Během studia varioval teplotní rozdíl mezi jeskynní a venkovní atmosférou (ΔT = T_{exteriér} - T_{jeskyně}) v širokém rozmezí hodnot (obr. 2b).

V závislosti na znaménku teplotního rozdílu byla v signálu CO₂ vyléna 4 období s rozdílnými módy proudění vzduchu: dvě období s kladnými hodnotami teplotního rozdílu odpovídají DAF módu proudění vzduchu a dvě období se zápornými hodnotami teplotního rozdílu odpovídají UAF módu (obr. 2a). Modelování ukázalo, že „požadové koncentrace CO₂“ v rezervoáru (přirozené koncentrace bez antropogenního vlivu) byly v daném období řízeny toky CO₂ z vedlejších jeskynních prostor, j_(adj). Přímé toky CO₂ z epikrasu, j_N, měly jen malý význam. Zatímco v hlubších pasážích jeskyně jsou koncentrace CO₂ vyšší z důsledku vyšších toků CO₂ z epikrasu z předcházejícího období, ve vstupních pasážích jeskyně jsou koncentrace nižší díky výměně vzduchu s venkovní atmosférou. Aktuální koncentrace CO₂ v rezervoáru pak závisí na směru proudění vzduchu (ventilačním módu) v jeskyni. Pokud se jeskyně nachází v UAF módu, vzduch proudí ve směru ze vstupních pasáží jeskyně do hlubších částí a přináší do monitorovaného dómu nižší koncentrace CO₂ (snižuje koncentrace CO₂ v rezervoáru). Naopak při DAF módu vzduch proudí

Tab. 1: Výsledné parametry modelování oxidu uhličitého na Galerii (Balcarka).

Tab. 1: Resulted parameters of CO₂ concentrations in the Gallery Chamber (the Balcarka Cave).

Parametry		Hodnoty
j_N	[mol min ⁻¹]	8,00·10 ⁻⁵
$c_{(adj) DAF 1}$	[mol m ³]	3,30·10 ⁻²
$c_{(adj) DAF 2}$	[mol m ³]	3,00·10 ⁻²
$c_{(adj) UAF}$	[mol m ³]	2,57·10 ⁻²
k_{at}	[mol min ⁻¹]	4,00·10 ⁻³
$k_{DT(DAF)}$	[m ³ min ⁻¹ deg ^{-1/2}]	0,90
$k_{DT(UAF)}$	[m ³ min ⁻¹ deg ^{-1/2}]	0,41

z hlubších částí jeskyně a přináší do monitorovaného dómu vyšší koncentrace CO₂ (zvyšuje koncentrace CO₂ v rezervoáru). U druhého přechodu mezi UAF a DAF módy byl u signálu CO₂ identifikován časový posun. Koncentrace CO₂ se začaly zvyšovat už před změnou módu proudění, což je konzistentní s již dříve popsáním jevem, kdy přepnutí módů je dosaženo při nenulových hodnotách ΔT (Faimon et al. 2012b).

Antropogenní ovlivnění koncentrací CO₂ v monitorovaném dómu v závislosti na návštěvnosti je na datech dobře patrné (obr. 2a). Přírůstek CO₂ se zde projevuje jako píky nasuperponované na „požadové koncentraci CO₂“. Výšky jednotlivých píků odpovídaly (i) počtu osob v jednotlivých skupinách a (ii) délce pobytu v dómu. Antro-

pogenní toky CO₂ do monitorovaného dómu se v závislosti na počtu návštěvníků pohybovaly od 4,4·10⁻² do 7,2·10⁻² mol min⁻¹. Tento tok normalizovaný na osobu odpovídá 4·10⁻³ mol min⁻¹. Modelové chování je ovlivněno velkým počtem parametrů, které neumožňují jednoznačné řešení. Uvedené řešení lze tak chápat jako jedno z možných. Fenomén antropogenního ovlivnění jeskyně vyžaduje další podrobné studium.

Závěry

Antropogenní ovlivnění oxidu uhličitého bylo studováno v jeskyni Balcarka v Moravském krasu. Pro interpretaci naměřených dat byl navržen dynamický model reprezentující monitorovaný dóm. Modelování ukázalo, že „požadové koncentrace CO₂“ v jeskynním dómu byly řízeny toky CO₂ z vedlejších jeskynních prostor v závislosti na směru proudění vzduchu v jeskyni. Ventilace jeskyně tak může v některých pasážích paradoxně přispívat ke zvýšení koncentrací. Antropogenní ovlivnění koncentrací CO₂ v monitorovaném dómu je reprezentováno píky na „požadové koncentraci CO₂“, jejichž intenzita je přímo úměrná počtu osob a délce jejich pobytu.

Poděkování

Práce byla zaštitěna institucionální podporou výzkumu Masarykovy univerzity v roce 2011–2012. Autoři děkují recenzentovi J. Zemanovi za kritické připomínky.

Literatura

- Batiot-Guilhe, C. – Seidel, J.-L. – Jourde, H. – Hébrard, O. – Bailly-Comte, V. (2007): Seasonal variations of CO₂ and ²²²Rn in a mediterranean sinkhole – spring (Causse d'Aumelas, SE France). – *International Journal of Speleology*, 36 (1), 51–56.
- Bourges, F. – Mangin, A. – d'Hulst, D. (2001): Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques: l'exemple de l'Aven d'Orgnac (Ardèche). – *Earth and Planetary Science*, 333, 685–692 (in French).
- Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische speleologie. – Springer, Berlin. 292 pp.
- Buecher, R.H. (1999): Microclimate study of Kartchner Caverns, Arizona. – *Journal of Cave and Karst Studies*, 61 (2), 108–120.
- De Freitas, C. R. – Littlejohn, R. N. – Clarkson, T. S. – Kristament, L. S. (1982): Cave climate: assessment of airflow and ventilation. – *Journal of Climatology*, 2, 383–397.
- Dragovich, D. – Grose, J. (1990): Impact of tourism on carbon dioxide levels at Jenolan Caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave management. – *Geoforum*, 21 (1), 111–120.
- Faimon, J. – Štelcl, J. – Sas, D. (2006): Anthropogenic CO₂-flux into cave atmosphere and its environmental impact: A case study in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). – *Science of the Total Environment*, 369, 231–245.
- Faimon, J. – Ličbinská, M. – Zajíček, P. (2012a): Relationship between carbon dioxide in Balcarka Cave and adjacent soils in the Moravian Karst region of the Czech Republic. – *International Journal of Speleology*, 41 (1), 17–28.
- Faimon, J. – Troppová, D. – Baldík, V. – Novotný, R. (2012b): Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). – *International Journal of Climatology*, 32, 599–623.
- Faimon, J. – Lang, M. (2013): Variances in airflows during different ventilation modes in a dynamic U-shaped cave. – *International Journal of Speleology*, 42 (2), 115–122.
- Geiger, R. (1966): The climate near the ground. – Cambridge, MA, Harvard University Press. 628 pp.
- Kowalczk, A. J. – Froelich, P. N. (2010): Cave air ventilation and CO₂ outgassing by radon-222 modeling: How fast do cave breath? – *Earth and Planetary Science Letters*, 289, 209–219.
- Russell, M.J. – MacLean, V.L. (2008): Management issues in a Tasmanian tourist cave: Potential microclimatic impacts of cave modifications. – *Journal of environmental management*, 87, 474–483.
- Spötl, C. – Fairchild, U. – Tooth, A. F. (2005): Cave air control on dripwater geochemistry, Obir Caves (Austria): Implications for speleothem deposition in dynamically ventilated caves. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 2451–2468.
- Statistica (2014): StatSoft. Dostupné na <http://www.statsoft.com/> [17. 1. 2014]