

JE PROUDĚNÍ VZDUCHU V JESKYNĚ OVLIVNĚNO VENKOVNÍM VĚTREM?

Is the cave airflow influenced by external wind?

Marek Lang, Jiří Faimon

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

(24-23 Protivanov)

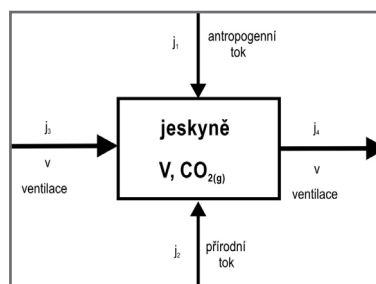
Key words: cave airflow, Císařská Cave, correlation analysis, external wind, spectral analysis

Abstract

Based on the case study in Císařská Cave (Moravian Karst), it was tested the impact of external wind on airflow dynamic. Time series of the cave airflow, external wind, and cave/external temperature (signals) were monitored at the lower entrance of the cave during an upward airflow ventilation mode. The periods of the oscillations in both signals (3.8 to 13.3 minutes in the cave airflow and 5.5 to 9.2 minutes in the external wind) were inconsistent. The correlation between both signals was statistically insignificant. The cross correlation did not show any time shift between both signals. These results rather question the generally presumed impact of external wind on cave airflow.

Úvod

Klíčovou roli při procesech v karbonátovém krasu hraje oxid uhličitý: rozdíl v parciálních tlacích CO_2 (P_{CO_2}) v půdách/epikrasu a v jeskyni je principiální hnací silou růstu speleotém (White 1988, Ford a Williams 2007). Zatímco vysoký P_{CO_2} v půdách/epikrasu zaručuje vysoké nasycení prosakujících vod kalcitem, nízký P_{CO_2} v jeskyni je zodpovědný za odplynění těchto vod (uvolnění „přebytečného“ CO_2). Rozsah odplynění pak určuje stupeň přesyčení vod kalcitem a rychlost/rozsah růstu kalcitových speleotém. Okamžitý parciální tlak CO_2 v jeskynní atmosféře představuje stacionární stav, při kterém je suma toků CO_2 do jeskyně vyrovnávána tokem CO_2 ven z jeskyně (Faimon et al. 2006). Vstupní toky CO_2 do jeskyně zahrnují (1) přirozené toky (difuze CO_2 nesaturovanou zónou po puklinách a produkce CO_2 při odplyňování skapových vod) (Bourges et al. 2001) i (2) antropogenní toky (CO_2 vydechovaný návštěvníky jeskyně) (Spötl et al. 2005, Faimon et al. 2006) (obr. 1). Výstupní toky jsou spojeny především s ventilací jeskyně (Faimon a Ličbinská 2010). Intenzita ventilace je dána geometrií jeskyně a rozdíly v hustotách vzduchu v jeskynní a venkovní atmosféře (de Freitas et al. 1982, Spötl et al. 2005). Hustota vzduchu je funkcí více proměnných, z nichž nejvýznamnější je teplota. Proudění vzduchu v jeskyni je pak řízeno diferencí teplot $\Delta T = T_{\text{exteriér}} - T_{\text{jeskyně}}$ (kde $T_{\text{exteriér}}$ je teplota ve vnější atmosféře a $T_{\text{jeskyně}}$ je teplota v jeskyni) (Pflitsch a Piasecki 2003, Kowalczk a Froelich 2010, Faimon et al. 2012). Podle znaménka difference ΔT 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. 2012, Faimon a Lang 2013). Někteří autoři nepochybně o tom, že proudění vzduchu jeskyní je ovliv-



Obr. 1: Dynamický model CO_2 v jeskynní atmosféře. Symboly j_1 , j_2 a j_3 představují toky CO_2 do jeskyně, symbol j_4 představuje tok CO_2 z jeskyně spojený s prouděním vzduchu jeskyní o rychlosti v .

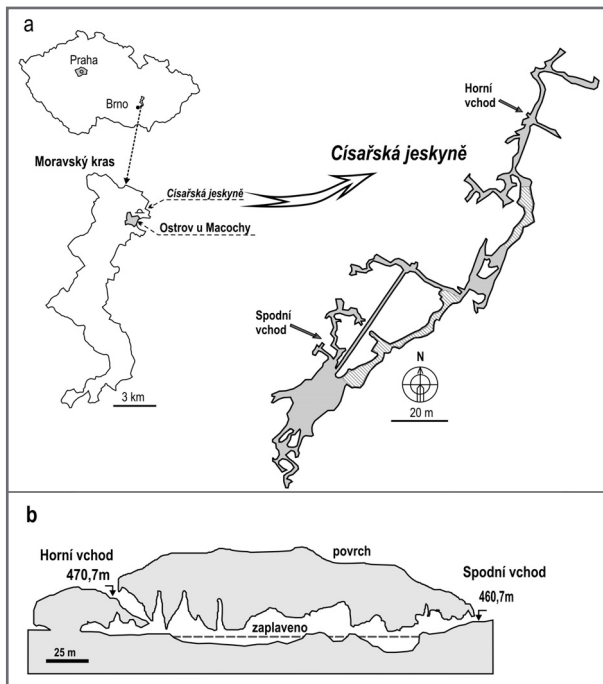
Fig. 1: A dynamic model of CO_2 in cave atmosphere. The j_1 , j_2 and j_3 symbols mean CO_2 – fluxes directed into cave. The j_4 symbol means the CO_2 – flux from cave associated with the cave airflow v .

něno venkovním větrem (de Freitas et al. 1982, Kowalczk a Froelich 2010). V závislosti na směru proudění může vítr v principu ovlivňovat ventilaci jeskyně dvěma způsoby. U vchodu, kterým proudí externí vzduch do jeskyně, vítr přispívá k zesílení proudění, naopak u vchodu, kterým vzduch proudí z jeskyně ven, vítr „brzdí“ vystupující vzduch. Teoreticky by se tedy měl vliv větru vzájemným působením na opačných koncích jeskyně rušit. Stále však zůstává řada nevyjasněných faktorů jako jsou časové posuny, orientace směru větru vůči jeskynním vchodům apod. Hlavním cílem této práce bylo základní ověření zda a v jaké míře je proudění vzduchu v jeskyni ovlivňováno venkovním větrem.

Metodika

Místo studia

Studie byla provedena v Císařské jeskyni. Císařská jeskyně je budována ve svrchnodevonských vápencích Macošského souvrství v severní části Moravského krasu v blízkosti obce Ostrov u Macochy (obr. 2a). Jeskyně je tvořena úzkými chodbami spojujícími relativně malé prostory. Celkový objem jeskyně se odhaduje na 11 500 m^3 .



Obr. 2: Císařská jeskyně: a – pozice jeskyně; b – vertikální profil jeskyně.

Fig. 2: The Císařská Cave: a – cave position; b – cave vertical cross-section.

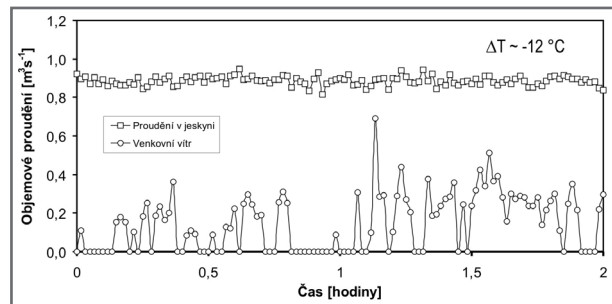
Část jeskyně je zaplavena téměř stagnující krasovou vodou. Prostředí jeskyně je upraveno betonovými chodníky a ocelovými můstky přes jeskynní jezírka. Dvě protilehlé části jeskyně, původně zaplavené vodou, byly propojeny štolou. Jeskyně má dva rozdílné položené vchody (s nadmořskou výškou 460,7 a 470,7 m). Jedná se tedy o typický dynamickou jeskyni (obr. 2b). Oba vchody jsou uzavřeny ocelovými dveřmi opatřenými větracími okénky. V současnosti je jeskyně využívána dětskou léčebnou v Ostrově u Macochy ke speleoterapii.

Monitoring

Časové série proudění vzduchu v jeskyni a venkovního větru byly naměřeny u spodního vchodu jeskyně s krokem měření 10 sekund. Proudění vzduchu bylo měřeno v úrovni okénka dveří o rozměrech 20 × 20 cm (celková plocha 0,04 m²). Proudění směrem do jeskyně bylo považováno za kladné. Proudění venkovního větru bylo monitorováno v blízkosti spodního vchodu ve směru kolmém na plochu okénka. Rychlosti proudění vzduchu i venkovního větru byly zaznamenávány termoanemometrem FVA935 TH4 (rozsah rychlostí 0,05 až 2 m·s⁻¹ s rozlišením ±0,04 m·s⁻¹), který byl propojený s dataloggerem ALMENO 2590-4S. Teplota vzduchu v jeskyni a v externí atmosféře byla monitorována dataloggerem COMET S3120 (rozsah teplot -30 až 70 °C s rozlišením ±0,4 °C). Naměřená data byla zpracována v programu STATISTICA verze 10 (Statistica 2013).

Výsledky, analýza dat a jejich diskuze

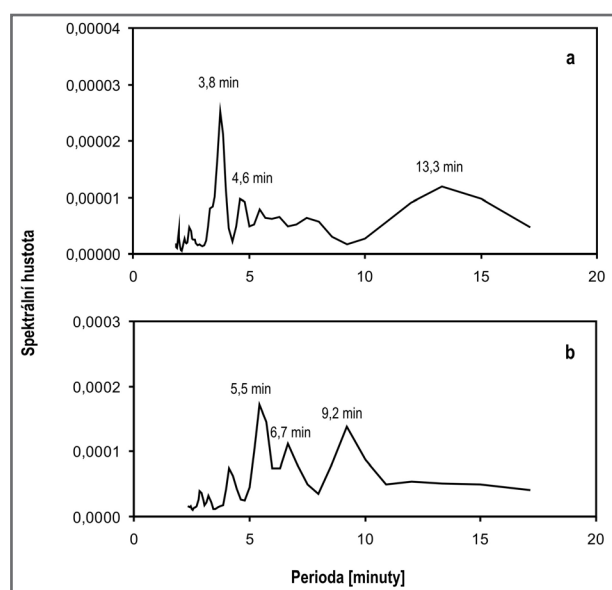
Data ve formě časových řad (dále signály) byla naměřena v lednu 2013. Během měření se jeskyně nacházela v UAF módu – externí vzduch proudil do jeskyně spod-



Obr. 3: Proudění vzduchu Císařskou jeskyní (měřeno v úrovni okénka spodního vchodu) a venkovní vítr (měřeno kolmo na vchod do jeskyně).

Fig. 3: The airflow through the Císařská Cave (measured at the level of the lower entrance window) and external wind (measured perpendicularly to the cave entrance).

ním vchodem a vystupoval z jeskyně horním vchodem. Teplotní rozdíl ΔT mezi externí a jeskynní atmosférou představující hnací sílu proudění v jeskyni se pohyboval mezi -13,0 a -11,9 °C. Rychlost proudění vzduchu měřená v úrovni okénka dveří spodního vchodu se pohybovala kolem $0,89 \pm 0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (interval spolehlivosti na hladině významnosti $\alpha = 0,05$). Rychlost proudění externího větru kolísala v rozmezí od 0 do $0,69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Naměřená data jsou na obrázku 3. Jak je vidět, oba srovnávané signály vykazují odlišný charakter. Externí vítr je charakteristický výraznými fluktuacemi, zatímco proudění vzduchu v jeskyni osciluje kolem průměrné hodnoty jen s malou amplitudou. Pro statistickou analýzu nebyla naměřená data vhodná, protože vykazovala lokální trend. Data byla proto převedena na stacionární odečtením lineárního trendu. Korelační analýza mezi prouděním vzduchu v jeskyni a prouděním externího větru prokázala pouze slabou pozitivní korelaci ($r = 0,04$), statisticky nevýznamnou na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Křížová korelace nepotvrdila žádný časový



Obr. 4: Spektrální analýza dat (Císařská jeskyně, spodní vchod): a – proudění vzduchu v jeskyni; b – venkovní vítr.

Fig. 4: Spectral analysis of the data (Císařská Cave, the lower entrance): a – cave airflow; b – external wind.

posun mezi oběma signály. Spektrální analýza ukázala oscilace s periodami od 3,8 do 13,3 minut u proudění vzduchu jeskyní a od 5,5 do 9,2 minut u venkovního větru (obr. 4). Nalezené frekvence oscilací obou signálů zhruba odpovídají frekvencím naměřeným např. Plummerem (1969) nebo Badinem (2010). Periody oscilací v obou naměřených signálech však nejsou konsistentní. Uvedené výsledky naznačují, že za daných podmínek bylo proudění vzduchu jeskyní na venkovním větru nezávislé.

Závěry

Vliv venkovního větru na ventilaci jeskyně byl studován v Císařské jeskyni v Moravském krasu. Studie přímý vliv větru na proudění vzduchu v jeskyni nepotvrdila. K definitivnímu vyloučení vlivu externího větru na výměnu vzduchu v jeskyni je však nezbytné provést další studie za odlišných podmínek. Tyto výsledky by mohly být inspirativní pro mikroklimatologii, karsologii a paleoekologii.

Poděkování

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

Literatura

- Badino, G. (2010): Underground meteorology – „What’s the weather underground?“ – *Acta Carsologica*, 39 (3), 427–448.
- 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)
- 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.
- Faimon, J. – Lang, M. (2013): Variances in airflows during different ventilation modes in a dynamic U-shaped cave. – *International Journal of Speleology*, In press.
- Faimon, J. – Ličbinská, M. (2010): Carbon dioxide in the soils and adjacent caves of the Moravian Karst. – *Acta Carsologica*, 39 (3), 463–475.
- 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. – Troppová, D. – Baldík, V. – Novotný, R. (2012): Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). – *International Journal of Climatology*, 32, 599–623.
- Ford, T. D. – Williams, P. W. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. – Wiley & Sons, Chichester. 562 pp.
- Kowalczyk, 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.
- Pflitsch, A. – Piasecki, J. (2003): Detection of an airflow system in Niedzwiedzia (Bear) Cave, Kletno, Poland. – *Journal of Cave and Karst Studies*, 65 (3), 160–173.
- Plummer, W. T. (1969): Infrasonic resonance in natural underground cavities. – *The Journal of the Acoustical Society of America*, 46, 1074–1080.
- 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 (2013): StatSoft. Dostupné na <http://www.statsoft.com/> [30. 1. 2013].
- White, W. B. (1988): *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. – Oxford University Press, New York, 464 pp.