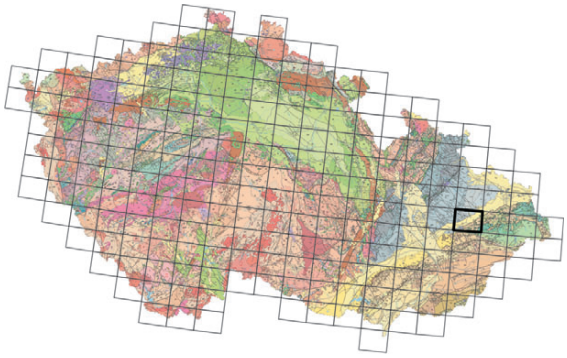
Hmotnostní tok juvenilního oxidu uhličitého v Hranickém krasu, praktické možnosti jeho měření a první výsledky

Subcrustal CO_2 flux measurement in the Hranice hydrothermal Karst, methodology and first results

Milan Geršl [1] – Eva Geršlová [2] – Barbora Šimečková [3]

[1] Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin, Vysoká škola báňská-TUO, 17. listopadu 15, 708 33 0strava; milan.gersl@vsb.cz
[2] Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 602 00 Brno
[3] Správa jeskyní České republiky, Správa Zbrašovských aragonitových jeskyní, 753 51 Teplice nad Bečvou 75

Key words: *Hranice Karst, Zbrašov aragonite caves, carbon dioxide, CO_2 flux*



(25-12 Hranice)

Abstract: Hranice Karst with Zbrašov aragonite caves is situated in the Teplice nad Bečvou district, 40 km SE from Olomouc. Hranice hydrothermal Karst is developed in the sequence of Paleozoic limestones as a result of deep influx of thermal water charged with subcrustal carbon dioxide (CO_2). Flux CO_2 ($g.m^{-2}.d^{-1}$) was measured in the soil and cave. Homogenisation chamber and pumping test were applied to evaluate CO_2 flux. The average soil CO_2 flux ranged from 74 to 125 $g.m^{-2}.d^{-1}$ reflecting venting of subcrustal CO_2 in the Hranice area. In the Zbrašov aragonite cave the CO_2 concentration in the atmosphere varies from 0 to 85% with measured constant flux of 32894,45 $g.m^{-2}.d^{-1}$.

Krasové území nevelkých rozměrů pojmenované podle blízkého města Hranice se nachází mezi obcemi Hranice, Teplice nad Bečvou a Černotín, na styku Českého masivu a Západních Karpat. Otevření hlubokých struktur, podmíněné přítomností styku dvou velkých geologických celků, umožnilo výstupy fluid ze zemského pláště k povrchu (Kodym 1960, Panoš 1964). Oxid uhličitý migruje po hlubokých zlomech až na povrch a rozpouští se do infiltrovaných vod nebo vytváří tzv. plynová jezera v podzemních dutinách.

Nejznámější výstupy plynu jsou popsány ze Zbrašovských aragonitových jeskyní. Jejich nižší patra jsou vyplňována oxidem uhličitým, vytvářejícím zde tzv. plynová jezera. Jeho koncentrace běžně dosahují až 40 % obj. V roce 1999 však např. v Gallašově dómu dosahovala průměrná koncentrace 84,9 % obj. Toto zvýšení je vysvětlováno jako důsledek změn způsobených povodněmi v roce 1997 (Bosák, Geršl 2003). Studovány byly sezónní variace obsahu oxidu uhličitého (Geršl et al. 2004). Chemické a izotopové složení juvenilních plynů bylo dosud studováno jen na ojedinělých vzorcích. Analýzy poměru stabilních izotopů uhlíku v oxidu uhličitém ($\delta^{13}C$ okolo –5 ‰) naznačují juvenilní (plášťový) původ tohoto plynu. Izotopové analýzy v kyselce rozpuštěných plynů dokazují, že část těchto plynů pochází až ze svrchního pláště Země (Meyberg – Rinne 1995). Výstupy oxidu uhličitého jsou patrné také v okolním terénu, především v okolí Hranické propasti a v korytě řeky Bečvy.

Objemový (hmotnostní) tok oxidu uhličitého

Pro měření objemového toku oxidu uhličitého ve studované oblasti byl sestaven prototyp homogenizační komory (obr. 1) vycházející z principu komor používaných pro měření toků plynů ve vulkanických oblastech (např. Lewicki et al. 2005, Cardellini et al. 2003, Carapezza – Granieri 2004). Vývoj prototypu byl také inspirován technologií, kterou pro měření toku CO_2 detailně zhodnotili Norman et al. (1997) nebo Sorey et al. (1998).

Komora je fixována do půdy, kde bude prováděno měření plynu. Uvnitř komory je vestavěn ventilátor, který plyn zachycený komorou kontinuálně homogenizuje a připravuje tak reprezentativní směs plynu vhodnou pro následný vstup do analyzátoru. Analyzátor napojený na homogenizační komoru umožňuje průběžné analýzy plynu a elektronický záznam koncentrací. Nová verze aparatury umožňuje přes by-pass odběr vzorku plynu pro náročnější laboratorní analýzy, např. izotopovou analýzu plynu. V ideálním případě lze v záznamu koncentrací studovaného plynu (v našem případě CO_2) vyhledat časový úsek, kde plyn komoru naplňuje lineárně v čase, resp. jeho koncentrace v čase lineárně stoupá. Z časového záznamu koncentrací zjistíme přírůstek a za použití konkrétních rozměrů komory následně spočteme tok vyjádřený v jednotce plochy. Pomocí jednoduchých přepočtů pak můžeme získat tok hmotnostní, objemový nebo molární. Nejčastější

(a vhodné ke srovnávání) je pak vyjádření v $g.m^{-2}.den^{-1}$, často se ale setkáváme také s odvozenými jednotkami jako $kg.m^{-2}.d^{-1}$, $t.m^{-2}.rok^{-1}$ nebo s pouhým vyjádřením „produkce“ CO_2 dané oblasti v tunách za rok.

Objemový tok CO_2 na povrchu – spontánní emanace

Metodické provedení experimentu

Pro terénní měření byly vybrány oblasti Hranického krasu, kde jsou přírodní výstupy oxidu uhličitého známy již delší dobu. Na základě měření koncentrací CO_2 v půdním vzduchu a teplot půdy, které na těchto lokalitách probíhají pravidelně od roku 2004 (Geršl, nepublikované zprávy) byly určeny následující lokality vhodné pro měření toku CO_2:

Závrt U rybízu WGS 84: N 49° 31´ 47,2˝ E 17° 44´ 57,6˝
Půlhodina 1 WGS 84: N 49° 31´ 55,2˝ E 17° 44´ 58,4˝
Půlhodina 2 WGS 84: N 49° 31´ 55,4˝ E 17° 44´ 58,5˝

Povrchové měření výstupů CO_2 bylo realizováno pomocí homogenizační komory. Každá z uvedených lokalit byla vybavena sondou (vrtem) s PE pažnicí sv. prům. 75 mm, hloubky 50 cm, ve spodní polovině perforovanou vrtáním 7,5 mm. Na třech uvedených lokalitách pobíhalo měření objemového toku CO_2 s homogenizační komorou uloženou na sondě a poté mimo sondu, na neporušeném půdním pokryvu. Půdní vrstvy byly pokryty lesní hrabankou, vždy bez travního porostu, který fotosyntézou koncentrace CO_2 znatelně ovlivňuje. Příklady záznamu měření jsou uvedeny v obr. 4.

Diskuse dosažených výsledků

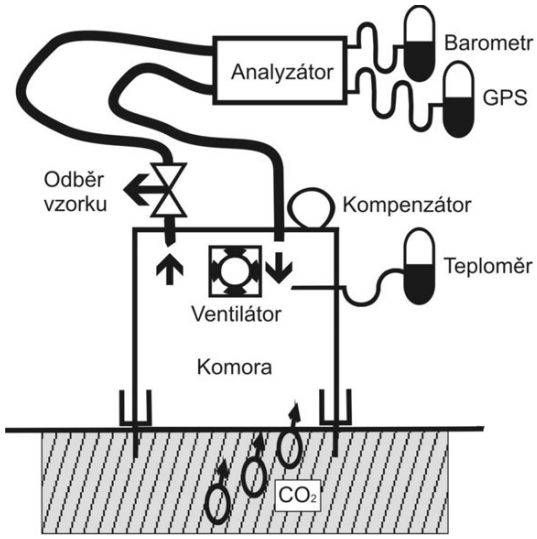
Na každé z uvedených tří lokalit bylo v letech 2010 a 2011 provedeno celkem 10 měření toku CO_2, měření bylo opakováno vždy 5×. Příklady záznamů koncentrací CO_2 v homogenizační komoře (obr. 1) na jednotlivých lokalitách zobrazuje obr. 4. Z důvodů vyloučení vlivů okolního prostředí byly v průběhu měření sledovány také další fyzikální veličiny, především okolní (barometrický) tlak, tlak a teplota v aparatuře.

Ze získaných dat byl pro každou lokalitu spočten medián, který uvádí střední hodnotu toku CO_2 na sledované lokalitě.

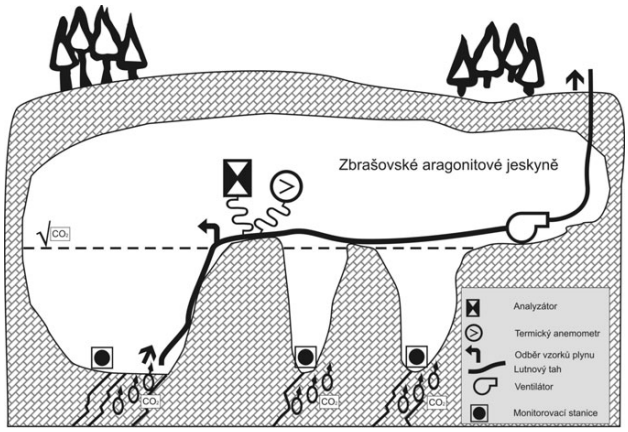
Hmotnostní tok CO_2 v jeskynních prostorách – čerpací zkouška

Metodické provedení čerpací zkoušky

Čerpací zkouška plynné výplně podzemních prostor byla provedena s cílem dosáhnout ustáleného proudění, tedy proudění, při němž se v daném bodě nemění vektor rychlosti proudění v čase (Jetel 1982), ověřit vlastní navrženou metodiku této zkoušky a zjistit reálný tok CO_2 na konkrétní lokalitě. Čerpací zkouška byla provedena ve Zbrašovských



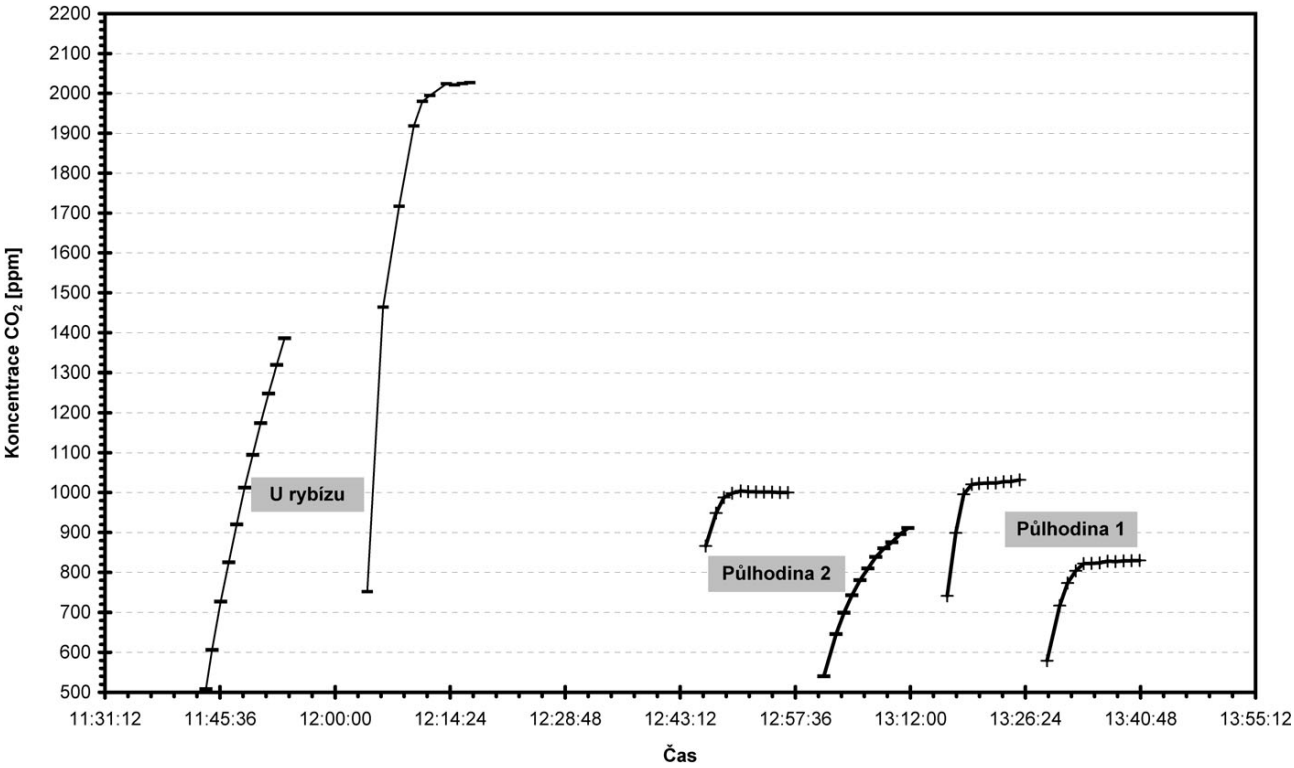
Obr. 1. Schéma zapojení prototypu homogenizační komory pro měření toku CO_2.



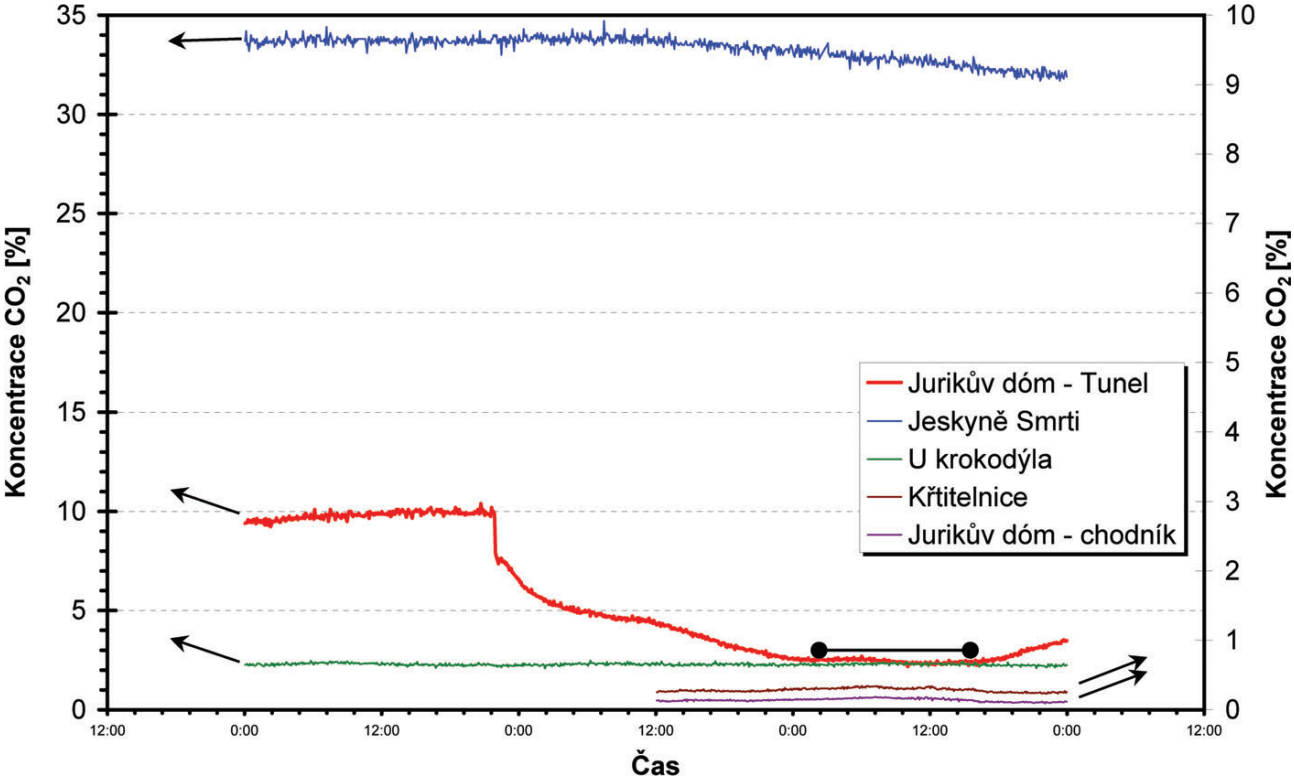
Obr. 2. Schematické uspořádání čerpací zkoušky ve Zbrašovských aragonitových jeskyních.

Obr. 3. Celkový pohled na zapojení techniky při čerpací zkoušce plynných speleotém.

aragonitových jeskyních, v Jurikově dómě, části Tunel. Jde o kapsovitou prohlubeň, trvale zaplavenou oxidem uhličitým o koncentracích obvykle dosahujících prvních desítek procent. Prostora přesvědčivě vykazuje statický typ větrání,



Obr. 4. Příklad záznamu terénního měření toku CO_2 na půdním povrchu.



Obr. 5. Koncentrace CO_2 při čerpací zkoušce na lokalitě Tunel, časový úsek vyrovnaného proudění ukazuje černá úsečka. Koncentrace v sousedních lokalitách dokazující neovlivňování experimentu bočním přítokem CO_2.

koncentrace CO_2 v ní klesají k nule jen výjimečně v některých letech, a to za velmi mrazivého počasí. Dno prostory tvoří kamenitá suť z vápencových bloků. Pro potřeby tohoto experimentu byla prostora detailně zmapována pomocí laserového dálkoměru a elektronického sklonoměru spojeného s kompasem.

Tabulka 1. Celkový přehled základního statistického posouzení naměřených dat

	Jurikův dóm – Tunel		Jeskyně Smrti		U krokodýla		Křtitelnice		Jurikův dóm – počva	
	CO_2	T	CO_2	T	CO_2	T	CO_2	T	CO_2	T
počet měření (*n*)	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153
délka trvání (hod.)	13:35	13:35	13:35	13:35	13:35	13:35	13:35	13:35	13:35	13:35
minimum	2,18 %	15,4 °C	32,3 %	16,8 °C	2,17 %	14,5 °C	14,7 %	0,283 °C	0,134 %	15,8 °C
maximum	2,70 %	15,6 °C	33,6 %	16,8 °C	2,42 %	14,6 °C	14,9 %	0,342 °C	0,186 %	15,9 °C
průměr	2,47 %	15,52 °C	32,87 %	16,80 °C	2,31 %	14,52 °C	14,73 %	0,31 °C	0,16 %	15,82 °C
medián	2,49 %	15,50 °C	32,90 %	16,80 °C	2,31 %	14,50 °C	14,70 %	0,31 °C	0,16 %	15,80 °C
Smodch	0,0975	0,0566	0,2619	0,0000	0,0468	0,0376	0,0522	0,0140	0,0113	0,0381
rozptyl	0,0095	0,0032	0,0686	0,0000	0,0022	0,0014	0,0027	0,0002	0,0001	0,0015
Skew	–0,3387	–0,0166	0,3068	–1,0099	–0,3782	1,7751	1,5855	0,3356	–0,1232	1,7142

K odsátí plynné výplně Tunelu byla použita stacionární aparatura vybavená odstředivým axiálním ventilátorem DYNAIR F35T, 0,37 kW. Odsávaný plyn byl odváděn lutnovým tahem přesahujícím 300 délkových metrů až na zemský povrch. Měření koncentrací CO_2 bylo prováděno stacionárním zařízením monitoringu u počvy Tunelu. Dále bylo využito sedm stacionárních monitorovacích stanic, které v okolních prostorách kontinuálně zaznamenávaly koncentraci CO_2, teplotu, popř. vlhkost vzdušin a barometrický tlak (obr. 2). Krok měření stacionárních modulů byl zvolen 5 min. Měření rychlosti proudění v odsávacím vedení bylo prováděno aparaturou Testo 425. Rozsah měření rychlosti proudění: 0–20 $m.s^{-1}$, rozlišení: 0,01 $m.s^{-1}$, přesnost: ± 0,03 $m.s^{-1}$ +5 %, krok měření: $2.s^{-1}$. Pro měření byla použita termická anemometrická sonda, zabudovaná do potrubí odsávacího vedení. Ze získaných dat byl za použití korekcí na atmosférický tlak počítán objem odsávaných vzdušin.

Diskuse dosažených výsledků

Čerpací zkouška proběhla ve dnech 1.–3. července 2010 po předchozím prověření aktuálního stavu vybrané lokality a jejího okolí. Zjištěn byl setrvalý stav atmosférického tlaku, téměř neměnné koncentrace CO_2 v podzemních prostorách a četné silné výrony plynu v nedaleké řece Bečvě.

Odsávání plynné výplně Tunelu bylo započato 1. července 2010 ve 22:40 SELČ a ukončeno 3. července 2010, 13:24 SELČ. V době experimentu bylo získáno 838 měření uvedených veličin. Celkový průběh čerpací zkoušky je zaznamenán na obr. 5.

Ustáleného proudění bylo dosaženo 2.7. 2010, 23:48 SELČ, koncentrace CO_2 2,64 %. V době ustáleného proudění bylo získáno 153 měření uvedených veličin v kroku 5 min. Ustálené proudění bylo udržováno 13 hodin 35 minut. Průměrná konc. CO_2 po tuto dobu dosahovala 2,47 % CO_2, střední hodnota (medián) konc. CO_2 2,49 % CO_2. Koncentrace se pohybovaly mezi minimem 2,18 % a maximem 2,70 % CO_2 se směrodatnou odchylkou souboru dat 0,0975. Průtok vzdušin v odsávací aparatuře, resp. výkon ventilátoru, byl po celou dobu ustáleného proudění udržován na 27,695 $m^3.hod^{-1}$.

Kontrola ustáleného proudění CO_2 byla zajištěna nejen měřením na lokalitě Jurikův dóm – Tunel a sledováním přímky koncentrace, ale také měřením na čtyřech sousedních lokalitách. Průběh koncentrací CO_2 v čase je zobrazen na obr. 5, základní statistické posouzení datových souborů je uvedeno v tab. 1. Sousední lokality poskytly neměnné, vyrovnané křivky koncentrací CO_2 s nevýznamným rozptylem a bez snižujícího se trendu.

Závěr

Měřením toku CO_2 z půdy v Hranickém krasu byly zjištěny tyto střední hodnoty toku CO_2: lokalita U rybízu: 202,12 $g.m^{-2}.den^{-1}$, Půlhodina 1: 152,01 $g.m^{-2}.den^{-1}$, Půlhodina 2: 77,99 $g.m^{-2}.den^{-1}$.

Odsáváním plynných výplní jeskynního prostoru ventilátorem bylo po ca 25 hodinách dosaženo rovnovážného stavu, ve kterém se objem odsávaného plynu rovnal objemu plynu vystupujícího z podloží. Šlo o plyn bezprostředně vystupující z podloží, ovlivnění sousedními lokalitami bylo měřením ověřeno a vyloučeno. Medián koncentrace CO_2 v době vyrovnaného proudění byl spočten na 2,49 % CO_2, průměr na 2,47 % CO_2. Ze vztahu daného vyrovnaným prouděním uvažujícím lineární přínos CO_2 v čase odpovídajícím odsávanému objemu byl vypočten tok CO_2. Objemový tok CO_2 byl stanoven na 3561,53 $g.m^{-2}.den^{-1}$.

Podstatný rozdíl, zjištěný mezi tokem CO_2 difuzí přes půdu na povrchu Hranického krasu a v podzemních prostorách Zbrašovských aragonitových jeskyní, je dán pozicí jednotlivých lokalit v prostoru. Plyn procházející přes suť a půdu je rozptýlen do širší vývěrové oblasti, naopak jeskynní prostory jsou primárně založeny na hlubokých tektonických poruchách a výstupy plynu jsou přímé a efektivní.

Poděkování. Tento experiment mohl být uskutečněn díky podpoře projektů Č.Fr-TI1/379 „Výzkum a vývoj metod a technologií zachycování CO_2 v elektrárnách na fosilní paliva a ukládání do geologických formací v podmínkách ČR“ a interního projektu České geologické služby č. 333700 „Výstupy skleníkových plynů (CO_2 a CH_4) z různých typů horninového prostředí“. Zvláštní

poděkování patří panu Slavomíru Černému ze Správy Zbrašovských aragonitových jeskyních za ochotu a pomoc při praktickém provedení experimentu.

Literatura

BOSÁK, P. – GERŠL, M. (2003): Excursion Guide. Hranice Karst. – 22nd Speleological School Cieszyn (Poland), 17 s. – Inst. Geol., Acad. Sci. Czech Republic. Prague.

CARAPEZZA, M. L. – GRANIERI, D. (2004): CO_2 soil flux at Vulcano (Italy): comparison between active and passive methods. – Appl. Geochem. 19, 73–88.

CARDELLINI, C. – CHIODINI, G. – FRONDINI, F. – GRANIERI, D. – LEWICKI, J. – PERUZZI, L. (2003): Accumulation chamber measurements of methane fluxes: application to volcanic-geothermal areas and landfills. – Appl. Geochem. 18, 45–54.

GERŠL, M. – HLADIL, J. – HYPR, D. – STEPIŠNIK, U. (2004): Variability of carbon dioxide concentrations in Zbrašov Aragonite Caves and its assessment on the base of nineyear monitoring research. 3rd. Nat. speleol. congress Sloup, abstracts, 15–19. – Czech speleol. Soc. Kuřim.

CHIODINI, G. – CIONI, R. – GUIDI, M. – RACO, B. – MARINI, L. (1998): Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas. – Appl. Geochem. 13, 5, 543–552.

JETEL, J. (1982): Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. – 248 s. Ústř. úst. geol., Praha.

KODYM, O. (1960): O genesi Hranického krasu. – Čas. Mineral. Geol. 5, 3, 262–264. Praha.

LEWICKI, J. L. – BERGFELD, D. – CARDELLINI, C. – CHIODINI, G. – GRANIERI, D. – VARLEY, N. – WERNER, C. (2005): Comparative soil CO_2 flux measurements and geostatistical estimation methods on Masaya volcano, Nicaragua. – Bull. Volcanol. 68, 76–90. DOI 10.1007/s00445-005-0423-9

MEYBERG, M. – RINNE, B. (1995): Messung des $^3He/^4He$-Isotopenverhältnisses im Hranicka Propast (Tschechische Republik). – Höhle. 46, 1, 5–8. Wien.

NORMAN, J. M. – KUCHARIK, C. J. – GOWER, S. T. – BALDOCCHI, D. D. – CRILL, P. M. – RAYMENT, M. – SAVAGE, K. – STRIEGL, R. G. (1997): A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. – J. Geophys. Res. 102, 28771–28777.

PANOŠ, V. (1964): Der Urkarst im Ostflügel der Böhmischen Masse. – Z. Geomorphol., neue F. 8, 2, 105–162.

SOREY, M. L. – EVANS, W. C. – KENNEDY, C. D. – FARRAR, C. D. (1998): Carbon dioxide and helium emissions from a reservoir of magmatic gas beneath Mammoth Mountain, California. – J. Gephys. Res. 103, 15303–15323.

WERNER, C. – HURWITZ, S. – EWANS, W. C. – LOWENSTERN, J. B. – BERGFELD, D. – HEASLER, H. – JAWOROWSKI, C. – HUNT, A. (2008): Volatile emissions and gas geochemistry of Hot Spring Basin, Yellowstone National Park, USA. – J. Volcano. geotherm. Res. 178, 751–762.