SLOVENSKÝ KRAS

ACTA CARSOLOGICA SLOVACA

ROČNÍK 55 číslo 1





2017 Liptovský Mikuláš

SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA

Vedecký karsologický a speleologický časopis

Časopis vychádza dvakrát ročne Evidenčné číslo: EV 3878/09 ISSN 0560-3137

Editor / Editor doc. RNDr. Pavel Bella, PhD.

Výkonný redaktor / Executive Editor Ing. Peter Holúbek

Redakčná rada / Editorial Board

Predseda / Chairman

doc. RNDr. Zdenko Hochmuth, CSc.

Členovia / Members

doc. RNDr. Pavel Bella, PhD., prof. RNDr. Pavel Bosák, DrSc., RNDr. Václav Cílek, CSc., RNDr. Ľudovít Gaál, PhD., Dr. hab. Michał Gradziński, Ing. Jozef Hlaváč, Ing. Peter Holúbek, doc. RNDr. Jozef Jakál, DrSc., RNDr. Vladimír Košel, CSc., doc. RNDr. Ľubomír Kováč, CSc., acad. prof. Dr. Andrej Kranjc, RNDr. Alexander Lačný, PhD., RNDr. Peter Malík, CSc., doc. Mgr. Martin Sabol, PhD., PhDr. Marián Soják, PhD., prof. Ing. Michal Zacharov, CSc.

Recenzenti / Reviewers

Ing. Peter Bajtoš, PhD., prof. RNDr. Pavel Bosák, DrSc., doc. Mgr. Michal Gallay, PhD., RNDr. Ľudovít Gaál, PhD., doc. RNDr. Zdenko Hochmuth, CSc., doc. RNDr. Jozef Jakál, DrSc., Mgr. Branislav Šmída, PhD., RNDr. Ján Zelinka

© Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva a Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky – Správa slovenských jaskýň, Liptovský Mikuláš, 2017

$\mathbf{O} \mathbf{B} \mathbf{S} \mathbf{A} \mathbf{H} - \boldsymbol{C} \boldsymbol{O} \boldsymbol{N} \boldsymbol{T} \boldsymbol{E} \boldsymbol{N} \boldsymbol{T} \boldsymbol{S}$

ŠTÚDIE A VEDECKÉ SPRÁVY – SCIENTIFIC PAPERS

Tomáš Lánczos, Petronela Filipčíková: Speleogenetický význam CO_2 pre vývoj vybraných jaskýň Plaveckého krasu v Malých Karpatoch Speleogenetic importance of CO_2 for development of selected caves of the Plavecký Karst areas in the Malé Karpaty Mts.	5
Alexander Lačný, Silvia Michalíková, Tamás Csibri, Tomáš Klučiar, Ivan Dostál, René Putiška, Dávid Kušnirák: Nový súhrn poznatkov o Smolenickom krase (Malé Karpaty) New summary of knowledge of the Smolenice Karst (Malé Karpaty Mts.)	23
Alena Gessert, Tamás Telbisz: Geomorfologické špecifiká reliéfu Zádielskej planiny v Slovenskom krase Geomorphological particularities of the Zádiel Plateau relief in the Slovak Karst	47
Dagmar Haviarová: Chemické zloženie a kvalita vôd jaskyne Zápoľná (Kozie chrbty) Chemical composition and water quality in the Zápoľná Cave (Kozie chrbty Mts.)	61
Erika Kováčová, Peter Malík, Jaromír Švasta, Natália Bahnová, Alexandra Pažická, Peter Bajtoš, Zuzana Grolmusová: Priestorové zmeny distribúcie mikroklimatických parametrov počas letného režimu prúdenia vzduchu v Krásnohorskej jaskyni Spatial changes in distribution of microclimatic parameters during the summer ventilation mode in the Krásnohorská Cave (Slovak Karst, Slovakia)	81
Peter Holúbek: Nové poznatky o sufóznych jaskyniach v Podtatranskej kotline New knowledge of the suffosion caves in the Podtatranská Basin	103
Pavel Bella: Al Hoota, Omán – jediná sprístupnená jaskyňa na Arabskom polostrove Al Hoota, Oman – the only show cave in the Arabian Peninsula	111
SPOLOČENSKÁ KRONIKA – <i>SOCIAL CHRONICLE</i>	
Ľudovít Gaál: Za Marcelom Lalkovičom In memory of Marcel Lalkovič	122
RECENZIE – REVIEWS	
Gabriel Lešinský: Z. Hochmuth: Atlas jaskyne Skalistý potok Z. Hochmuth: Atlas of the Skalistý potok Cave	125

ŠTÚDIE A VEDECKÉ SPRÁVY – SCIENTIFIC PAPERS

SPELEOGENETICKÝ VÝZNAM CO₂ PRE VÝVOJ VYBRANÝCH JASKÝŇ PLAVECKÉHO KRASU V MALÝCH KARPATOCH

TOMÁŠ LÁNCZOS – PETRONELA FILIPČÍKOVÁ

Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Ilkovičova 6, 842 15, Bratislava; lanczos@fns.uniba.sk, nela.filipcikova@gmail.com

T. Lánczos, P. Filipčíková: Speleogenetic importance of CO₂ for development of selected caves of the Plavecký Karst areas in the Malé Karpaty Mts.

Abstract: The aim of this study was to describe geochemical processes involving reactions of CO_2 occuring either in the cave environment or in water sollution. Our research was realized at three locations – caves situated in the middle part of the Malé Karpaty Mts. belonging to the Plavecký Karst areas. Cave atmosphere parameters were measured as CO_2 content, temperature, humidity, and wall surface temperature. Water samples were also taken and analyzed using Merck Spectroquant® method. In situ measured parameters were alkality, acidity, temperature, electrolytic conductivity and pH. Obtained data were used as input data to prepare thermodynamical models of chemical reactions involving processes on the water-gas-minerals multiphase boundaries. The models were prepared and performed in PHREEQC environment. These models represent recent processes of corrosion as wel as speleotheme formation. As the result, we conclude that CO_2 represents one of the key speleogenetic factors for corrosion caves. There are three diverse reservoirs of CO_2 which are possible sources of a gas we measured in the cave atmosphere. These reservoirs are atmosphere, soil organic matter decay, and the deeper parts of Earth's crust. The CO_2 in different reservoirs widely differ in its isotopic composition. The isotope studies are therefore the proper tool to determine the source of CO_2 .

Key words: PHREEQC geochemical modeling, corrosion, secondary autochtonous fillings

ÚVOD

Výskum krasových oblastí Malých Karpát, orientovaný najmä na geológiu, geomorfológiu, speleologický prieskum a dokumentáciu krasových javov, sa začal už v 50. rokoch minulého storočia. Hlavnými osobnosťami publikujúcimi od tých čias po osemdesiate roky boli A. Droppa (1951, 1952a, 1952b, 1955–56), J. Majko (1961a, 1961b), M. Stankoviansky (1974, 1978, 1982) a ďalší. Výskum v týchto vedných oblastiach prebieha dodnes, rozšírený o ďalšie vedné disciplíny (napr. geochémia, mineralógia, mikrobiológia) a zameriava sa na detailnejší opis a štúdium pomocou modernej analytickej techniky. Geochemický výskum zameraný na speleogenetické procesy na tomto území prebieha od roku 2011 v Havranickej jaskyni a okolí (Lánczos et al., 2013). Neskôr bol speleologický výskum rozšírený na tri jaskyne patriace do krasových oblastí identifikovaných ako Plavecký a Kuchynsko-orešanský kras (Došek, 1962; Droppa 1973; Stankoviansky, 1974). Ťažiskovou lokalitou nášho geochemického výskumu zostávala Havranická jaskyňa, kde sme terénne práce uskutočnili celkovo 5-krát, s cieľom postrehnúť aj sezónne zmeny jednotlivých sledovaných parametrov. Ďalšími dvomi skúmanými lokalitami boli Plavecká priepasť (PP-2) a Trstínska vodná priepasť. Cieľom nášho výskumu bol opis a modelovanie procesov rozpúšťania vápenca infiltrovanou zrážkovou vodou a kondenzovanou vzdušnou vlhkosťou pri meniacej sa teplote vzduchu a obsahu CO_2 v ovzduší jaskyne, a to na základe dát získaných terénnymi meraniami jaskynnej atmosféry a vody, ako aj chemickými analýzami odobratých vzoriek vody. Terénne práce sme tiež rozšírili o monitorovanie koncentrácie CO_2 v atmosfére jaskyne, merania teploty a vlhkosti vzduchu a merania teploty povrchu stien.

CHARAKTERISTIKA SKÚMANÝCH JASKÝŇ

Horninové prostredie, v ktorom sa jaskyne vyvinuli, je reprezentované strednotriasovými vápencami. Havranická jaskyňa vznikla v gutensteinských, jaskyne Plavecká priepasť a Trstínska vodná priepasť vo wettersteinských vápencoch (Polák et al., 2012). Bližšiu lokalizácia skúmaných jaskýň je uvedená na obrázku 1.

Havranická jaskyňa je situovaná medzi obcami Smolenice a Buková (obr. 1). Jej vchod sa nachádza na horskom hrebeni vo výške 585 m n. m. Jej objavená dĺžka je 174 m pri denivelácii -51 m. Podľa Bellu et al. (2013) ide o inaktívnu fluviokrasovo-koróznu jaskyňu, aj keď známky fluviálnej činnosti sú zachované viac-menej iba v náznakoch. Uvodné pasáže jaskyne sú puklinovo-sutinového charakteru bez známok tvorby sintrovej výplne. Sekundárna autochtónna výplň je tu zaznamenaná hlavne v hlbších častiach jaskyne, počnúc priestormi nad Zbojníckou sieňou (-25 m), kde sa nachádza najmä na strope a je reprezentovaná brkami. V Zbojníckej sieni sa vyskytuje najmä na ľavej stene a na konci siene vo forme sintrových nátekov, kde je vytvorená retenčná depresia zachytávajúca skvapovú vodu (obr. 2B). Z tejto depresie boli opakovane odoberané vzorky vody. V nižších úrovniach jaskyne (-45 m) sa nachádza tzv. Zasintrovaná sienka, ktorá sa vyznačuje bohatou sintrovou výzdobou (obr. 3F). Ďalej je v týchto priestoroch zdokumentovaná prítomnosť prekalcifikovanej terra rossy (obr. 2C), obsahujúcej autochtónne karbonátové klasty (Lánczos et al., 2013). Vo všeobecnosti sa v tejto jaskyni nachádzajú rôzne druhy sekundárnej autochtónnej výplne, ako je to zdokumentované na obrázku č. 2. Na niektorých sintrových útvaroch boli pozorované známky korózie (obr. 2E).



Obr. 1. Lokalizácia skúmaných jaskýň (podľa Poláka et al., 2011) Fig. 1. Localization of studied caves (after Polak et al., 2011)



Obr. 2. Sintrové útvary v Havranickej jaskyni. A – bradavičnaté sintre koralovitého tvaru, B – zasintrované jazierko zachytávajúce skvapovú vodu, C – kalcifikovaná terra rossa, D – bradavičnaté sintre, E – prejavy korózie na sintrovom náteku, F – pohľad na bohatú výzdobu v Zasintrovanej sienke, typickú pre hlbšie časti jaskyne. Foto: T. Lánczos

Fig. 2. Sinter deposits in the Havranická Cave. A – bulbous coralloid sinter form, B – sinter depression filled with dripwater, C – calcified terra rossa, D – the bulbous sinter deposits, E – signs of corrosion on the flowstone, F – bulk sinter deposits present in "Zasintrená Chamber", typical for deeper parts of the cave. Photo: T. Lánczos

Plavecká priepasť (tiež PP-2) sa nachádza severne od obce Plavecké Podhradie (obr. 1) v masíve Pod zámkom. Má vchod vo výške 270 m n. m., jej dĺžka je 335 m s de-



Obr. 3. Speleotémy a netopierie guáno v Plaveckej priepasti. A – mäkký sinter, B, C – bohatá výzdoba jaskyne, D – celková veľkosť kopy guána, E – zisťovanie tvorby CO_2 z kopy guána, F – speleotémy v najväčšej sieni jaskyne. Foto: T. Lánczos

Fig. 3. Speleothems and guano deposits in the Plavecká Abyss. A – moonmilk, B, C – cave decoration, D – total size of guano deposit, E – measurments of possible release of CO_2 from guano deposit, F – speleothems in the largest hall of the cave. Photo: T. Lánczos

niveláciou –70 m. Je klasifikovaná ako inaktívna fluviokrasovo-korózna (Bella et al., 2013).V spodných častiach sa vyskytuje bohatá kvapľová výzdoba, najhojnejšia vo vrchnej sienke (obr. 3B a C), kde bola odobratá vzorka vody zo skvapového jazierka. Kvapľové

útvary tu dosahujú značné rozmery, stalagmity majú výšku až štyri metre. Ojedinele sa tvorí mäkký sinter (obr. 3A). Výzdoba je zdokumentovaná aj na obr. 3F. Ďalším typom sedimentárnej výplne je netopierie guáno, ktoré sa na tejto lokalite vyskytuje v značnom množstve (obr. 3D a E). Ďalšia vzorka vody bola odobraná z jazierka vo freatickej zóne.

Trstínska vodná priepasť sa nachádza aktívnom kameňolome severne od obce Trstín (obr. 1) v masíve Holého vrchu, vchod je vo výške 242 m n. m. Predstavuje hlbokú jaskynnú trhlinu situovanú v spodnej etáži lomu. Trhlina sa tiahne v smere JZ – SV, má dĺžku 170 m. V hĺbke približne –60 m je hladina jazera, z ktorého bola odobraná vzorka vody. Na stenách jaskyne sa vyskytuje výzdoba označovaná ako bradavičnaté sintre, ktoré predstavujú hráškovité alebo koralovité útvary (Fairchild a Baker, 2012). Tento druh výzdoby pokrýva steny celoplošne po oboch stranách, avšak jej charakter sa mení, ako ukazujú fotografie na obr. 4A – C. Miestami sa vyskytujú aj antodity – drobné kryštalické speleotémy (obr. 4B). Iný druh výzdoby (kvaple, záclonky ap.) sme tu nezaznamenali.



Obr. 4. Výzdoba Trstínskej vodnej priepasti. A – bradavičnaté sintre (koraloidy), B – antodity, C – koralovitý útvar s mierkou. Foto: T. Lánczos

Fig. 4. Decoration of the Trstín Water Abyss. A – bulbous sinter deposits (coralloids), B – anthoids, C – coralloid form with scale. Photo: T. Lánczos

METODIKA

Vzorky vody v Havranickej jaskyni sa opakovane odoberali z retenčnej nádržky v Zbojníckej sieni, v Plaveckej priepasti z freatického jazierka a zo skvapového jazierka, v Trstínskej vodnej priepasti z jazera na dne priepasti.

Na odber vzoriek vody boli použité striekačky DB Plastipak so závitom na sterilné filtre Merck Millex Millipor so svetlosťou 0,45 µm, voda sa po odobratí hneď prefiltrovala a plnila do centrifugačných skúmaviek s objemom 50 ml na meniskus. Celkový objem vzoriek bol vždy 100 ml. Po odbere sa vzorky vody čo najrýchlejšie (priemerne do troch hodín) podrobili chemickej analýze prenosným spektrofotometrickým prístrojom

Merck Spectroquant® Move 100, kde sme stanovovali koncentrácie nasledujúcich látok (v zátvorke je analytický rozsah): Ca^{2+} (5 – 160 mg·l⁻¹), Mg^{2+} (5 – 75 mg·l⁻¹), Fe (0,05 – 4 mg·l⁻¹), Mn (0,05 – 6 mg·l⁻¹), Al³⁺ (20 – 700 µg·l⁻¹), NO³⁻ (2,2 – 66,4 mg·l⁻¹), PO4³⁻ (0,05 – 4 mg·l⁻¹), Si-SiO²⁻ (0,05 – 4 mg·l⁻¹)a SO₄²⁻ (5 – 250 mg·l⁻¹). Presnosť merania je podľa výrobcu 2 % analytického rozsahu.

Kyselinová neutralizačná kapacita KNK4,5 (alkalita) bola stanovená titráciou s 0,1 M HCl na 100 ml vzorky do hodnoty pH = 4,5 so zmesovým indikátorom metylčerveň a brómkrezolová zeleň. Zásadová neutralizačná kapacita ZNK_{8,3} (acidita) sa stanovila titráciou s 0,1 M NaOH na 100 ml vzorky do pH = 8,3 s indikátorom fenolftaleín. Na titráciu sme použili dávkovaciu pipetu BRAND Handy Step®S.

Terénne merania mernej elektrolytickej vodivosti (EC), pH a teploty vody sa realizovali kombinovaným prístrojom WTW ph/cond 340i, ktorý bol pred použitím vždy kalibrovaný.

Na merania koncentrácie CO_2 v atmosfére sme použili prístroj Testo 535 CO2 Monitor (presnosť ± 50 ppm), vzdušnú vlhkosť a teplotu sme merali prístrojom TFA 31.10 28 DTH Dewpoint Pro. Na stanovenie teploty povrchu stien sme používali teplomer TFA 31.11 24, ktorý však z dôvodu jeho citlivosti na vzdušnú vlhkosť po určitom čase prestal fungovať.

Zozbierané dáta sme použili ako vstupný údaj na konštrukciu termodynamických modelov chemických reakcií v multifázovom systéme voda-hornina-plyn v prostredí PHREEQC (Parkhurst a Appelo, 2013). Aktivitné koeficienty plynnej fázy, ktoré vstupujú do výpočtov parciálnych tlakov plynov, sú vypočítavané zo vzťahov odvodených z Pengovej – Robinsonovej stavovej rovnice (Peng a Robinson, 1976):

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2}$$
(1)
kde:
p - tlak plynu,
R - plynová konštanta,
T - teplota,
Vm - molárny objem plynu,
a, b, α - empirické koeficienty.

Odchýlka od rovnovážneho stavu reakcií prebiehajúcich v modelovanom systéme je vyjadrená indexom nerovnovážnosti (I):

 $I = \log IAP - \log K$

(2)

kde:

IAP – ión-aktivitný produkt reakcie, vypočítaný dosadením aktuálnych aktivít reaktantov a produktov reakcie do vzťahu pre termodynamickú rovnovážnu konštantu, K – termodynamická rovnovážna konštanta.

Vytvorili sme štyri modely založené na hodnotení indexov nerovnovážnosti v roztoku s cieľom kontroly správnosti analýz, identifikácie korózneho potenciálu vody a dva modely prechodu meteorickej vody pôdnym pokryvom a horninovým prostredím s cieľom porovnať priemerné uvádzané koncentrácie pre pôdne CO_2 s nameranými hodnotami a identifikovať mieru príspevku H₂S k rozpúšťaniu minerálov.

Posledným modelom bol model vplyvu korozívneho efektu vzdušnej vlhkosti na povrch stien jaskyne vo vzťahu ku koncentrácii CO₂ a k teplote.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na základe odlišnosti stanovených hodnôt terénnych parametrov vody, hlavne v hodnotách mernej elektrolytickej vodivosti (EC) a obsahu voľného CO2, sa skúmané lokality rozdelili do dvoch skupín. Prvú skupinu tvoria vzorky z Havranickej jaskyne (H1 až H5), ktoré sú typické nízkou hodnotou EC (do 511 μ S.cm⁻¹), čo naznačuje nižšie obsahy rozpustených látok. Zároveň ich nízke koncentrácie voľného CO₃ za predpokladu rovnovážneho stavu medzi kvapalnou a plynnou fázou poukazujú na nízke obsahy CO, aj v jaskynnej atmosfére. Po analýze dát získaných priamym meraním CO, v jaskynnej atmosfére sa potvrdilo, že hodnoty koncentrácie CO, merané na rovnakom mieste ako odoberané vzorky vody nedosahovali extrémne hodnoty v porovnaní s hodnotami na ostatných dvoch lokalitách (tab. 3). Vzorky prvej skupiny pochádzali zo skvapovej vody jaskyne vo vadóznej zóne. Jaskyňa, z ktorej pochádzajú, je charakteristická dobrou cirkuláciou vzduchu a jej známe priestory sú lokalizované relatívne plytko pod povrchom s deniveláciou do 50 m. Vzorky druhej skupiny odobrané v Plaveckej priepasti (PP2-1, PP2-2) a Trstínskej vodnej priepasti (TVP) sa odlišovali dvojnásobne vyššími hodnotami EC, ale aj približne desaťnásobne vyššími koncentráciami voľného CO, (tab. 1). Tieto vzorky sa odoberali z freatickej zóny (okrem vzorky PP2-1, ktorá reprezentuje vadóznu zónu), v relatívne hlbších priepastiach s deniveláciou -70 m, kde cirkulácia vzduchu nebola výrazná. Priemerné namerané koncentrácie CO, v atmosfére na týchto lokalitách boli 1879 ppm pre Plaveckú priepasť a 7434 ppm pre Trstínsku vodnú priepasť.

Vzorka	Dátum odberu	рН	Teplota vody [°C]	EC [μS ⁻¹ ·cm ⁻¹]	HCO3 [*] [mg·l ⁻¹]	Voľný CO2** [mg·l-1]
H-1	26.1.2013	7,78	7,1	511	241,56	8,8
H-2	8.2.2014	8,14	7	467	233,02	2,2
H-3	21.5.2014	8,21	7	453	218,38	2,64
H-4	7.10.2014	8,01	7,6	456	246,52	5,28
H-5	3.3.2015	8,15	7,2	479	268,49	1,76
PP2-1	17.9.2014	7,88	12,2	1139	277,641	5,72
PP2-2	17.9.2014	7,3	13,5	1006	326,457	26,4
TVP	13.11.2014	7,1	10,9	833	225,774	25,52

Tab. 1. Prehľad terénnych stanovených parametrov vod	ly
Table 1. Overview of the field measurement data	

* Vypočítané z KNK4,5, ** vypočítané zo ZNK8,3

Kolorimetrická analýza vzoriek vody ukázala jednu anomáliu, a to pri vzorke PP2-1, kde boli zaznamenané nečakane vysoké koncentrácie dusičnanov a fosforečnanov (tab. 2). Išlo o vzorku skvapovej vody, ktorá sa odoberala z malej retenčnej nádrže s neustálym pomalým odtokom. Najpravdepodobnejším zdrojom tejto kontaminácie je kopa netopierieho guána, nachádzajúca sa v blízkosti odberného miesta.

Vzorka	Ca ²⁺	Ca ²⁺ Mg ²⁺		Al ³⁺ Fe ³⁺		Mn ³⁺ NO ³⁻		SO42-	Si-SiO2
	[mg·l ⁻¹]	[mg·l ⁻¹]	[mg·l ⁻¹]	[mg·l ⁻¹]	[mg·l ⁻¹]	[mg·l ⁻¹]	[mg·-1]	[mg·l ⁻¹]	[mg·l ⁻¹]
H-1	61	19,7	0,155	0,03	0,04	-	-	21	1,49
H-2	80	3,4	0,018	0	0,07	30,54	0,02	16	2,2
H-3	68	4,5	UR*	0,03	0,04	27	0	20	3,94
H-4	48	3,2	0,029	UR	0,12	27,44	0,01	15	4,31
H-5	45	UR*	UR*	0,03	0,12	24,8	0,11	13	4,24
PP2-1	94	UR*	0,149	UR	0,05	296,7	0,47	93	5,44
PP2-2	61	UR*	0,167	UR	UR*	7,97	UR*	45	4,18
TVP	58	42,1	0,016	0,02	UR*	45,17	0,03	54	5,37

Tab. 2. Prehľad výsledkov analýz vzoriek vody (* podlimitné hodnoty) Table 2. Overview of the results of water analyses

Tab. 3. Prehľad dát meraných charakteristík jaskynnej atmosféry – Havranická jaskyňa Table 3. Overview of the cave atmosphere measurments – Havranická Cave

Havranická jaskyňa											
Hĺbka m p. p.	Teplota steny [°C]		Vlhkosť [%]		Tepl	lota vzduc [°C]	hu	Obsah CO ₂ [ppm]			
	marec ³	august1	október ²	marec ³	august ¹	október ²	marec ³	august ¹	október ²	marec ³	
0	-	70,9	-	44	20,7	-	6,3	357	-	397	
2	4,9	70,7	-	71,8	20,7	-	7	355	-	625	
4	5,5	66	81,7	78	20,2	12,3	8,2	432	733	565	
7	5,8	65	-	81,6	17,5	-	7,8	978	-	649	
12	6,5	57,3	79,9	84	16,5	12,4	7,3	768	1083	685	
17	6,6	52,2	79,9	85,7	15,4	10,2	7,2	585	1159	568	
22	7,8	56,6	84,9	89,6	15	9,1	8	595	1179	623	
22	7,9	61,1	82,8	88,4	14,8	9,5	8,3	609	1224	558	
25	8,0	58,4	86,1	87,8	14	8,8	9	595	1192	517	
30	7,8	59,1	86,1	84,1	13,5	9	9,4	608	1249	662	
28	7,6	61,8	86,9	82,9	13,2	9	9,8	1030	1365	730	
30	-	67,5	86	79,9	12,3	8,8	9,9	711	1216	628	
35	-	69,5	86,1	78,7	12	9,1	10,2	626	1283	977	
37	-	74	-	74,5	11,1	-	11,2	980	-	3051	
33	-	70,9	86,1	78,8	10,6	9,1	10,7	791	1321	4718	
38	-	74,2	86,5	70,2	10,2	9	12,3	1166	1267	1219	
35	_	74,9	85,7	87,3	10,6	9,2	10,6	608	1361	813	
38	-	75,3	84,5	83,6	10,7	9,5	10,8	611	1287	854	
41	-	76	-	-	9,9	-	-	690	-	-	
43	-	77,5	79,6	86,1	9,6	10,4	10,7	1053	1776	996	
48	-	79	78	87,9	9,2	11	9,6	714	1487	1349	
51	-	-	81,7	89,3	-	10	10	-	1408	1927	

 1 - 7. 8. 2014, 2 - 7. 10. 2014, 3 - 3. 3. 2015

Modelovanie reakcií vzoriek vody s pevnou a plynnou fázou – základná analýza

Výsledky terénnych meraní a laboratórnych analýz (tab. 1 a 2) boli použité ako vstupné údaje do numerických termodynamických modelov reakcií prebiehajúcich medzi pevnou (minerály), kvapalnou (vodný roztok) a plynnou (CO_2 , O_2) fázou v prostredí softvéru PHREEQC.

V tabuľke 4 sú uvedené výsledky dvoch modelov, cieľom ktorých bolo preveriť správnosť titračného stanovenia kyselinovej a zásadovej neutralizačnej kapacity (KNK_{4,5} a ZNK_{8,3}). Tieto hodnoty reprezentujú molárne koncentrácie iónu HCO₃⁻ a voľného CO₂ vo vodnom roztoku, v tabuľkách ich uvádzame ako hmotnostné koncentrácie týchto ukazovateľov. Do prvého modelu (model 1) sme zadali výsledky terénnych a laboratórnych stanovení okrem koncentrácie voľného CO₂, ktorého koncentrácia bola dopočítaná na základe rovnovážnych vzťahov s ostatnými stanovenými ukazovateľmi za danej teploty. V druhom modeli sme zadali súčet molárnej koncentrácie HCO₃⁻ a voľného CO₂ ako celkové množstvo anorganického uhlíka, bez určenia špeciácie. Koncentrácie HCO₃⁻ a voľného CO₂ sa dopočítali na základe rovnováhy so stanovenou hodnotou pH za danej teploty. Pri porovnaní stanovených a modelovaných parametrov vidíme vo väčšine prípadov iba malé odchýlky, spôsobené menšími analytickými chybami alebo nerovnovážnymi vzťahmi medzi jednotlivými ukazovateľmi, resp. fázami.

Tab. 4. Výstupy z modelov 1 a 2 Table 4. Results from the models 1 and 2

	Stanov	ené údaje	e vo vzorke		Model 1		Model 2			
Vzorka	рН	Teplota [°C]	EC [μS ⁻¹ ·cm ⁻¹]	Voľný CO ₂ [mg·l ⁻¹]	HCO ₃ ⁻ [mg·l ⁻¹]	CO ₂ [mg·l ⁻¹]	I _{cc}	CO ₂ [mg·l ⁻¹]	HCO ₃ - [mg·l ⁻¹]	I _{cc}
H-1	7,78	7,1	511	8,8	241,56	8,02	0,22	8,14	242,54	0,23
Н-2	8,14	7	467	2,2	233,02	4,67	0,68	3,39	231,44	0,69
Н-3	8,21	7	453	2,64	218,38	2,69	0,66	2,73	218,32	0,67
H-4	8,01	7,6	456	5,28	246,44	4,74	0,59	4,81	247,16	0,6
Н-5	8,15	7,2	479	1,76	212,28	3,04	0,43	3,01	205,51	0,42
PP2-1	7,88	12,2	1139	5,72	277,64	6,17	0,63	6,33	276,78	0,64
PP2-2	7,3	13,5	1006	26,4	326,46	28,22	0,14	28,22	324,16	-0,47
TVP	7,1	10,9	833	25,52	225,77	32,66	-0,47	31,53	217,43	-0,49

Ďalším sledovaným parametrom je index nasýtenia roztoku voči kalcitu. Interpretácia týchto hodnôt je veľmi jednoduchá: pozitívne čísla indikujú zrážanie daného minerálu, čiže v tomto prípade tvorbu kalcitového sintra, negatívne čísla zase koróziu horninového materiálu vodou z analyzovanej vzorky. Hodnoty blízke nule indikujú stav, keď je roztok blízko k rovnováhe so sledovaným minerálom. Ako vidíme, väčšina hodnôt indexu nasýtenia indikuje zrážanie kalcitu, teda tvorbu sintra, rozpúšťanie kalcitu v prípade modelu 1 iba vo vzorke z Trstínskej vodnej priepasti, v prípade modelu 2 aj vo vzorke PP2-2 (vzorka z jazierka v Plaveckej priepasti).

Ako ďalší vstupný údaj sme v modeloch 3 a 4 (tab. 5) použili aj hodnoty parciálnych tlakov vypočítané zo stanovených koncentrácií CO_2 v jaskynnej atmosfére. V oboch modeloch sme uvažovali o reakciách v otvorenom systéme voči CO_2 , čo znamená plynulé dopĺňanie CO_2 spotrebovaného v reakciách, keďže tento typ modelov najlepšie opisuje reálnu situáciu. V modeli 3 sme počítali rovnovážne koncentrácie rozpustených látok za podmienky rovnováhy so stanovenou koncentráciou CO_2 v jaskynnej atmosfére. V modeli 4 sme uvažovali o dosiahnutí rovnovážneho stavu roztoku vo vzorke vody s kalcitom (ICC = 0).

Vzorka	Stanovené údaje vo vzorke					Model 3				Model 4			
	pН	$\frac{\text{CO}_2}{[\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]}$	HCO ₃ -	P _{CO2} [Pa]	pН	$\frac{\text{CO}_2}{[\text{mg} \cdot \mathbf{l}^{-1}]}$	HCO ₃ ⁻ [mg·l ⁻¹]	I _{cc}	рН	CO ₂ [mg·l ⁻¹]	HCO ₃ ⁻ [mg·l ⁻¹]		
H-3	8,21	2,64	218,38	61,6	8,44	1,58	209,04	0,88	8,15	1,58	105,37		
H-4	8,01	5,28	246,44	126,5	8,18	3,23	239,3	0,76	7,92	3,24	129,72		
H-5	8,15	1,76	268,5	68,8	8,48	1,72	249,80	1,07	8,13	1,72	109,71		
PP2-1	7,88	5,72	277,64	189	7,87	4,17	172,43	0,47	7,68	4,18	109,71		
PP2-2	7,3	26,4	326,46	191	8,1	3,84	317,77	0,36	7,99	3,84	245,59		
TVP	7,1	25,5	225,77	911	7,3	20,41	212,01	-0,3	7,39	20,4	265,87		

Tab. 5. Výstupy z modelov 3 a 4 Table 5. Results the models 3 and 4

Z porovnania atmosférických parciálnych tlakov CO_2 so stanovenými parametrami vody je zrejmá súvislosť medzi nimi, čo nie je prekvapujúce, keďže CO_2 je najdôležitejším faktorom kontrolujúcim pH prírodných vôd. CO_2 je kyslý plyn, čo znamená, že sa vo vode rozpúšťa ako kyselina uhličitá (H2CO3), ktorá sa v závislosti od pH ďalej disociuje na HCO^{3-} a $CO3^{2-}$. Mierny nárast pH a pokles koncentrácie voľného CO_2 podľa modelu 3 a HCO^{3-} po dosiahnutí rovnováhy s CO_2 v jaskynnej atmosfére (čiže v tomto prípade úniku jeho malého množstva do ovzdušia) naznačuje možnosť vyššieho parciálneho tlaku CO_2 v puklinovom systéme horninového prostredia oproti nami zaznamenaným koncentráciám v jaskynnej atmosfére. Model 4 reprezentuje opačný proces, ktorý nastane po dosiahnutí rovnováhy s kalcitom, keďže pri jeho precipitácii dochádza k uvoľňovaniu CO_2 a zároveň odčerpávaniu zložiek, ktoré vstupujú do kryštálovej mriežky kalcitu. Výnimkou je vzorka z Trstínskej vodnej priepasti, kde voda bola voči kalcitu mierne nedosýtená, a teda dosiahnutie rovnováhy s kalcitom nastane jeho rozpúšťaním.

Modelovanie vývoja chemického zloženia vody

Pri konštrukcii týchto modelov (model 5) sme vychádzali z nasledujúcej hypotézy: zrážková voda presakuje do pôdneho pokryvu, kde dochádza k jej obohacovaniu o CO₂.

Agresívny pôdny roztok gravitačne presakuje do horninového prostredia tvoreného gutensteinskými vápencami, ktoré sa tým intenzívne rozpúšťajú, vytvárajúc krasové formy. Gutensteinské vápence reprezentujúce horninové prostredie sedimentovali v plytkých anoxických podmienkach. Pre takéto prostredie je typická tvorba H_2S z rozkladu organického materiálu, ktorý zostáva prítomný v štruktúre vápenca. Roztok vnikajúci do horninového prostredia mikroštruktúrnymi diskontinuitami môže eventuálne rozpúšťať tento H_2S , čo prispieva k ďalšiemu okysľovaniu presakujúcich vôd, a teda k zvýšenému korozívnemu efektu.

Jednotlivé modely obsahovali nasledujúce reakčné kroky:

- 1. nasýtenie zrážkovej vody atmosférickým kyslíkom (Po₂ = 20217 Pa (10^{-0.7} atm) a P_{CO2} = 32 Pa (10^{-3.5} atm),
- nasýtenie zrážkovej vody pôdnym CO₂ za podmienky predpokladanej hodnoty pôdneho Pco₂, Pco₂ reakcia s H₂S, pričom počet mólov vstupujúcich do reakcie musel zodpovedať molárnej koncentrácii SO4²⁻ vo vzorke vody,
- 3. reakcia s minerálnymi fázami (kalcit, dolomit, SiO₂ a kaolinit) do hodnôt indexov nasýtenia zodpovedajúcich vypočítaným hodnotám podľa modelu 4,
- 4. pokiaľ bola hodnota výsledného pH odlišná od hodnoty stanovenej vo vzorke, tak sa proces znovu opakoval od bodu 2 s odlišnou hodnotou pôdneho P_{co.}, až kým sa nedosiahla zhoda v hodnote pH medzi danou vzorkou a modelovanou hodnotou.

Priemerná koncentrácia CO₂ v zemskej atmosfére je cca 350 ppm (35 Pa pri t = 10°C), čo je zároveň dolnou hranicou jeho koncentrácie v pôdach. Hornou hranicou P_{CO₂} v pôdach je limitovaná schopnosťou respirácie pôdnych organizmov a rozkladom organických látok, čo podľa Apella a Postmu (2006) predstavuje 3200 Pa (10^{-1.5} atm). Pri tejto hodnote P_{CO₂} nastáva pokles pH na hodnotu 4,6. Hodnota pôdneho P_{CO₂} závisí od viacerých faktorov, napr. od teploty, množstva organických látok, evapotranspirácie a pod. Hornú hranicu P_{CO₂} dosahujú tropické pôdy, v stredoeurópskych klimatických podmienkach môžeme podľa Brooka et al. (1983) očakávať hodnoty P_{CO₂} v rozmedzí cca 250 až 640 Pa (10^{-2.6} – 10^{-2.2} atm).

Tab. 6. Výstupy modelov prechodu meteorickej vody pôdnym pokryvom a horninovým prostredím * iniciálny parciálny tlak CO_2 bez príspevku H_2S ; ** iniciálny parciálny tlak CO_2 s spríspevkom H_2S ; *** príspevok H_2S

Vzorka	P _{C02} *	P _{CO2} **	$\Delta P_{\rm CO2}$	H ₂ S***	pН	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO3 ⁻	SO 4 ²⁻	SiO ₂		
	[Pa]			[mmol·l ⁻¹]		[mg·l ⁻¹]						
H-1	2856	2575	281	0,22	7,8	59,32	18,57	241,93	21,24	1,48		
Н-2	2604	2348	256	0,17	8,14	78,91	3,41	231,19	15,99	2,2		
H-3	2375	2021	354	0,21	8,21	66,09	4,32	212,21	19,92	3,94		
H-4	2823	2569	252	0,16	8,01	75,51	4,93	246,93	15,58	4,35		
H-5	1801	1569	232	0,13	8,15	59,4	UR	161,14	9,76	4,22		
PP2-1	3059	-	_	_	7,89	110,62	1,56	264,87	77,45	1,95		
PP2-2	6393	-	_	-	7,3	99,63	2,61	323,32	40,93	4,77		
TVP	5078	-	-	_	7,14	48,53	34,63	238,39	60,95	5,43		

Table 6. Results from modelling the transition of meteoric water through soil cover and bedrock. * Initial partial pressure of CO_2 without contribution of H_2S , ** Initial partial pressure of CO_2 with contribution of H_2S , *** contribution of H_2S

V tab. 6 uvádzame modelové iniciálne hodnoty P_{co_2} potrebné na dosiahnutie chemického zloženia vody podľa predpokladaného modelového scenára. Tieto hodnoty sú rádovo vyššie, ako by sme očakávali v pôdnom prostredí, čiže je potrebné uvažovať o príspevku CO_2 aj z iných zdrojov, než sú rozkladné procesy v pôdach. Do úvahy prichádzajú hlbinné zdroje (napr. magmatické alebo z termálneho rozkladu karbonátov), odkiaľ CO_2 preniká v systéme puklín smerom k povrchu. V ďalšom kroku sme popri iniciálnom P_{co_2} vypočítali aj príspevok H_2S , o ktorom sme predpokladali, že pochádza z rozpúšťania gutensteinských vápencov, pričom sme sa v tomto prípade obmedzili iba na vzorky odobrané z Havranickej

jaskyne. V prípade vzorky zo skvapového jazierka v Plaveckej priepasti je totiž obsah zlúčenín síry ovplyvnený netopierím guánom a v prípade vzoriek z jazier v Plaveckej priepasti a Trstínskej vodnej priepasti už treba zjavne uvažovať aj s hlbinnými zdrojmi síry, keďže ide o vody s hlbším obehom v horninovom prostredí.

Modelovanie korozívneho efektu vzdušnej vlhkosti na povrch stien Havranickej jaskyne

Vzdušná vlhkosť v momente jej kondenzácie svojím zložením zodpovedá destilovanej vode. Pri kontakte kondenzovanej vody s atmosférou na povrchu Zeme rozpúšťa jej plyny vrátane CO₂, ktorý sa vo vode rozpúšťa ako kyselina uhličitá, v dôsledku čoho jej hodnota pH klesne na hodnotu 5,6. Kondenzovaná vzdušná vlhkosť bude teda pôsobiť korozívne na karbonátové povrchy jednak pre nižšiu hodnotu pH, ale aj pre veľmi nízke koncentrácie rozpustených látok, čiže vysokú mieru nenasýtenosti vyjadrenej negatívnymi hodnotami indexu nasýtenia voči minerálom. V jaskynnej atmosfére, kde sú vyššie koncentrácie CO₂, bude zákonite aj korozívny efekt kondenzovanej vzdušnej vlhkosti väčší. Ku kondenzácii vzdušnej vlhkosti dochádza vtedy, keď je pevný povrch chladnejší ako vzduch. Býva to vo vetraných jaskyniach v teplejších obdobiach, keď do jaskyne prúdi teplý vzduch a na relatívne chladnejších stenách jaskyne sa zráža vzdušná vlhkosť (de Freitas a Schmekal, 2005).

Teploty povrchu stien jaskyne sa nám síce podarilo zmerať iba čiastočne (pre vysokú vlhkosť vzduchu sa povrchový teplomer stal nefunkčným už vo veľmi krátkom čase), ale aj podľa týchto neúplných údajov boli tieto teploty nižšie ako aktuálne teploty vzduchu (tab. 3). Predpokladáme, že teplota povrchov bude v porovnaní s teplotou vzduchu stabilnejšia, okrem partií bližšie ku vchodu, kde sa môže prejaviť vplyv vonkajšej teploty.

Z grafov opisujúcich závislosť zmien teploty a stanovených obsahov CO, vyplýva, že Havranická jaskyňa má pomerne komplikovaný režim prúdenia vzduchu (obr. 5 a 6). Režim prúdenia vzduchu je typický pre horný vchod jaskyne v závislosti od vonkajších poveternostných podmienok (Lačný, 2009, 2012). Boli však zaznamenané aj obdobia, keď je prúdenie vzduchu v jaskyni veľmi slabé až stagnujúce, čo je podmienené malým až žiadnym rozdielom medzi vonkajšou teplotou a teplotou vnútri jaskyne. V teplých obdobiach teplota vzduchu postupne klesá až do hĺbky cca 35 m pod povrchom, v chladnejších obdobiach naopak do tejto hĺbky stúpa, kde sa ustáli na teplote 9-10 °C. S hĺbkou koncentrácia CO, v jaskynnej atmosfére vzrastá, avšak ukazuje isté odlišnosti v rámci ročných období (obr. 5). V auguste 2014 boli nami stanovené koncentrácie CO₂ relatívne nízke (priemerná koncentrácia 725 ppm, minimum 355 ppm a maximum 1166 ppm), s pozvoľným nárastom do hĺbky, s občasnými extrémnymi hodnotami v izolovanejších priestoroch (obr. 6). To pravdepodobne súvisí s dlhodobejším letným režimom prúdenia vzduchu (von z jaskyne). Počas merania CO, v októbri sme zaznamenali podstatne vyššie koncentrácie CO, s menej výraznými extrémami (priemerná koncentrácia 1270 ppm, minimum 733 ppm a maximum 1776 ppm), pravdepodobne v dôsledku stagnácie vzduchu v jaskyni, keď boli teploty vzduchu v jaskyni a na povrchu viac-menej vyrovnané. V marci 2015, keď prúdenie vzduchu smerovalo od vchodu dovnútra jaskyne, sme zaznamenali mimoriadne veľké výkyvy v koncentráciách CO, (priemerná koncentrácia 1135 ppm, minimum 517 ppm a maximum 4718 ppm), s extrémnymi hodnotami v hlbšie položených uzavretejších priestoroch (akýchsi, pasciach", situovaných mimo hlavného ťahu prúdenia vzduchu), s výraznejším nárastom v najhlbších častiach jaskyne (do 1927 ppm). Tento stav možno súvisí s väčšími, dosial' neobjavenými priestormi v hlbokých partiách jaskyne.



Obr. 5. Distribúcia teplôt vzduchu v závislosti od hĺbky za podmienok rôzneho režimu prúdenia vzduchu (7. 8. 2014 – prúdenie vzduchu smerom z jaskyne, 7. 10. 2014 – stagnácia, 3. 3. 2015 – prúdenie smerom do jaskyne)

Fig. 5. Distribution of air temperatures in relation to depth with respect to airflow regime (7. 8. 2014 – direction of airflow from the interior outwards, 7. 10. 2014 – stagnant conditions, 3. 3. 2015 – direction of airflow into the cave interior)



Obr. 6. Distribúcia koncentrácií CO_2 v závislosti od hĺbky za podmienok rôzneho režimu prúdenia vzduchu (7. 8. 2014 – prúdenie vzduchu smerom z jaskyne, 7. 10. 2014 – stagnácia, 3. 3. 2015 – prúdenie smerom do jaskyne)

Fig. 6 Distribution of CO_2 concentrations in relation to depth with respect to airflow regime (7. 8. 2014 – direction of airflow from the interior outwards, 7. 10. 2014 – stagnant conditions, 3. 3. 2015 – direction of airflow into the cave interior)

Model korózneho efektu precipitovanej vzdušnej vlhkosti bol založený na predpoklade pôsobenia destilovanej vody na karbonátový povrch tvorený kalcitom za rovnovážneho stavu so vzdušným CO_2 , ktorého koncentrácia zodpovedá aktuálnej koncentrácii, zistenej na jednotlivých stanovištiach vnútri Havranickej jaskyne. Vstupné dáta modelu teda tvo-



Obr. 7. Závislosť množstva rozpusteného kalcitu (mg.l⁻¹) od teploty (°C) (7. 8. 2014 – prúdenie vzduchu smerom z jaskyne, 7. 10. 2014 – stagnácia, 3. 3. 2015 – prúdenie smerom do jaskyne) Fig. 7. Dependance of the amount of dissolved calcite (mg.l⁻¹) on temperature (°C) (7. 8. 2014 – direction of airflow from the interior outwards, 7. 10. 2014 – stagnant conditions, 3. 3. 2015 – direction of airflow into the cave interior)



Obr. 8. Závislosť množstva rozpusteného kalcitu (mg.l⁻¹) od koncentrácie CO_2 (ppm) (7. 8. 2014 – prúdenie vzduchu smerom z jaskyne, 7. 10. 2014 – stagnácia, 3. 3. 2015 – prúdenie smerom do jaskyne)

Fig. 8. Dependance of the amount of dissolved calcite (mg.l⁻¹) on concentration of CO_2 (ppm) (7. 8. 2014 – direction of airflow from the interior outwards, 7. 10, 2014 – stagnant conditions, 3. 3. 2015 – direction of airflow into the cave interior)

rili aktuálne koncentrácie CO₂ v jaskynnej atmosfére a teplota vzduchu, výstupné údaje reprezentovali pH, obsah HCO³⁻ a množstvo rozpusteného kalcitu (CaCO₃) na 1 liter precipitovanej vody. Výpočet korozívneho efektu (vo forme množstva rozpusteného CaCO₃) sa vykonal pre každý jeden bod merania zvlášť. Keďže precipitát vytvára tenký vodný

film na stene jaskyne s veľkým povrchom a rovnováha so vzdušným CO_2 sa nastoľuje veľmi rýchlo, môžeme uvažovať o systéme otvorenom voči CO_2 , ktorý má výraznejší korozívny efekt voči karbonátovým minerálom. Na rozpustnosť karbonátov majú v tomto prostredí v zásade najvyšší vplyv množstvo rozpusteného CO_2 a teplota, ktorá ovplyvňuje rozpustnosť CO_2 , a tým aj jeho množstvo, ktoré je k dispozícii na rozpúšťanie karbonátov. Na základe porovnania závislosti rozpúšťania kalcitu od množstva CO_2 v jaskynnej atmosfére so závislosťou rozpúšťania kalcitu od teploty (obr. 7 a 8) je zrejmé, že koncentrácia CO_2 v atmosfére bude mať na koróziu oveľa výraznejší vplyv ako teplota.

Ako vyplýva z výstupov modelu (obr. 7 a 8), najvyššie vypočítané priemerné množstvá kalcitu na 1 liter precipitátu boli v októbri (101,42 mg.l⁻¹) a najnižšie v auguste 2014 (78,98 mg.l⁻¹), v marci 2015 to bolo 93,47 mg.l⁻¹. V období stagnácie prúdenia vzduchu je aj distribúcia CO2 v jaskynnej atmosfére rovnomerná, a teda predpokladáme, že aj súhrnný vplyv korozívneho efektu bude najvyšší. Toto tvrdenie však bude možné overiť až detailným štúdiom izotopového zloženia skvapovej vody, keďže práve v tomto období býva aj intenzívnejšia zrážková činnosť, prispievajúca priesakmi ku skvapom vody zo stien jaskyne

ZÁVER

Vody vyskytujúce sa v Havranickej jaskyni, Plaveckej priepasti a Trstínskej vodnej priepasti predstavujú dva rozdielne genetické typy, ktoré sú späté aj so samotnou genézou týchto jaskýň. Prvú skupinu reprezentujú skvapové vody z Havranickej jaskyne a jedna vzorka z Plaveckej priepasti (PP2), ktoré pochádzajú z presakujúcich zrážkových vôd. V pôdnom pokryve sú tieto zrážkové vody obohacované pôdnym CO, a humínovými kyselinami. Ich agresívna reakcia s vápencovými horninami predstavuje kľúčový speleogenetický faktor koróznych jaskýň, akou je aj Havranická jaskyňa. Ich korózne pôsobenie je evidentne umocňované aj pôsobením hlbinného CO₂, vystupujúceho v puklinách pozdĺž tektonických zlomov; na jednom z nich je založená aj Havranická jaskyňa. Tento predpoklad je podporený vypočítanými hodnotami iniciálnych parciálnych tlakov CO₃, ktoré majú násobne vyššie hodnoty, ako by sme v pôdnej atmosfére očakávali. Podľa modelov zahrnujúcich vplyv pôsobenia H_aS pochádzajúceho z gutensteinských vápencov príspevok korózneho vplyvu sulfánu predstavuje cca 10 % celkového korózneho efektu. V hlbších partiách jaskyne, kde boli odobrané vzorky skvapovej vody, sú tieto vody už nasýtené produktmi rozpúšťania horninového materiálu a v dôsledku presýtenia sa stávajú zdrojom karbonátov tvoriacich sintrovú výzdobu. Vo vzorke vody z Plaveckej priepasti sme pozorovali aj významný nárast koncentrácií NO3⁻ a SO4²⁻ evidentne biogénneho pôvodu, pravdepodobne z guánovej kopy nachádzajúcej sa v blízkosti skvapového jazierka, odkiaľ bola vzorka odobraná.

Druhú skupinu vôd reprezentujú vzorky vody z freatickej zóny z Plaveckej priepasti a Trstínskej vodnej priepasti. Tieto vody sú na rozdiel od skvapových vôd vyššie mineralizované, zároveň však majú vďaka vyššiemu obsahu voľného CO_2 aj nižšie hodnoty pH, a teda aj významný korózny vplyv na vápence, čo sa prejavuje výraznou mierou nedosýtenia voči kalcitu. CO_2 vystupujúci po tektonických líniách predstavuje významný korózny faktor aj pre vody vo freatickej zóne.

Modely pôsobenia vody kondenzovanej zo vzdušnej vlhkosti a precipitovanej na steny jaskyne tiež indikujú evidentné agresívne pôsobenie precipitátu na horninový materiál v skúmaných jaskyniach, pričom mieru agresivity určujú parciálny tlak CO₂ v jaskynnej atmosfére a teplota vzduchu. V daných podmienkach dosahuje intenzita rozpúšťania

kalcitu 60 – 160 mg na 1 liter kondenzovanej vody. Vyššie hodnoty parciálneho tlaku CO_2 sprevádzané vyššou intenzitou rozpúšťania sme pozorovali v obdobiach stagnujúceho prúdenia vzduchu, ako aj v "pasciach" kde sa kumuluje CO_2 . Kvantifikovať podiel kondenzátu vzdušnej vlhkosti v skvapových vodách bude možné po detailnom výskume izotopov H a O vo vzorkách vody, ako aj monitoringom prúdenia vzduchu v jaskyni a teploty povrchu jaskynných stien.

Záverom teda môžeme konštatovať, že CO_2 predstavuje jeden z kľúčových speleogenetických faktorov pre korózne jaskyne, pričom CO_2 môže byť tak biogénneho (pôdneho), ako aj atmosférického i hlbinného pôvodu, vystupujúci najmä na zlomových líniách, ktoré sú zároveň predispozíciou vzniku koróznych jaskýň. Presne kvantifikovať podiel pôdneho a hlbinného CO_2 z jednotlivých rezervoárov bude možné tiež až na základe štúdia stabilných izotopov C a O.

Poďakovanie: Táto práca bola podporovaná Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR a Slovenskej akadémie vied na základe zmluvy č. 1/0095/14

SPELEOGENETIC IMPORTANCE OF CO₂ FOR DEVELOPMENT OF SELECTED CAVES OF THE PLAVECKÝ KARST AREAS IN THE MALÉ KARPATY MTS.

Summary

The CO₂ plays a key role in the speleogenetic processes, and its concentration is a decisive factor of carbonate dissolution (corrosion) or precipitation. Our research was focused on geochemical processes on water-rock-gas boundary in cave environment, and the contribution rate of different factors, as CO₂ partial pressure, temperature, and geochemical characteristics of the water phase as well. We realized our research in three caves located in the Malé Karpaty Mts.: the Havranická Cave, Plavecká Abyss, and Trstínska Water Abyss (fig. 1). All locations are classified as fluvial-corrosive caves according to their genesis (Bella et al., 2013). Geological environment is represented by Middle Triassic limestone formations, specifically in the Gutenstein (Havranická Cave) and Wetterstein facies (Plavecká Abyss and Trstínska Water Abyss).

To complete dataset, we carried out several fieldworks during which, we took water samples and measured of geochemical characteristics of cave water and atmosphere (pH, EC, alkality and acidity of water, partial pressure of CO_2 , temperature of both phases, air humidity, cave wall surfrace temperatures). Obtained data were used as input for processing using PHREEQC Software. Geochemical calculations, based on thermodynamic equilibria in gas/liquid/solid phase boundaries, resulted to creation of several model situations describing processes running in this multiphase environment.

Following results of water chemical analyses (tables 1 and 2) it is obvious that water samples represent two genetically different water types, both of them in tight relationship with the genesis of cave. The first type dripping waters originating from atmospheric precipitation and percolating through the soil cover and rock following tiny inner fractures until they reach the interior. They are enriched with CO_2 and humic acids from the soil cover, therefore their aggressive reaction with the limestone is an important speleogenetic factor. Gutenstein Limestone contains certain amount of H_2S due to their reductive sedimentation environment, which we also involved in the computation. Contribution of H_2S to corrosion processes constituted approx. 10% of the total effect. In the deeper parts of the caves (where the water samples were taken), water was saturated to oversaturated with the products of carbonate dissolution, and consequently various types of speleothemes were formed.

Second water type is represented by water samples from phreatic zone of the Plavecká Abyss and Trstínska Water Abyss. They are distinguished by higher TDS (total dissolved solids) values and by higher concentrations of CO₂ as well. This samples also showed lower pH and lower I_{CC} (saturation

indices toward carbonates) values as shown in the tables 4 and 5. Corrosion potential of this type of water is sufficient to consider it as an important speleogenetic factor. Origin of a certain portion of the CO_2 in this case is probably in deeper parts of the lithosphere from where it could emerge along fault lines, which are one of the basic predispositional structural features of cave origin.

Seasonal measurements of CO_2 content in cave atmosphere were realized on the site of Havranická cave. Obtained data were processed using PHREEQC and subsequently created models showed the rate of corrosional effect caused by air humidity condenzied on surface of cave walls. These models indicate corrosive interactions with the rock which is controlled by the temperature and partial pressure of CO_2 (Pco₂). Distribution of temperature and Pco₂ values strongly depends on the actual air flow regime. Relatively high values of Pco₂ distributed more or less evenly along the cave passage were detected during air stagnation periods. During periods characterized by air movement, higher values of Pco₂ were detected only in "traps" – small chambers outlying from the main path. To distinguish contribution of air humidity condensated to the dripwater we would need to perform stable isotope analyses of H and O in water samples.

We conclude that the CO₂ is one of the key factors influencing genesis of corrosional type caves. Contribution ratio of CO₂ originated from different reservoirs can be determined using stable isotope analyses of C and O in CO₂ samples.

LITERATÚRA

- Appelo, C. A. J., Postma, D. 2006. Geochemistry, groundwater and Pollution. Balkema, Rotterdam, 536 p.
- Bella, P., Hlaváčová, I., Holúbek, P. 2013. Zoznam jaskýň Slovenskej republiky (stav k 31. 12. 2013). SMOPaJ, Liptovský Mikuláš.
- Brook, G. A., Folkoff, M. E., Box, E. O. 1983. A world model of soil carbon dioxide. Earth Surface Processes and Landforms, 8, 1, 79–88.
- Došek, O., a kol. 1962. Malé Karpaty, turistický sprievodca ČSSR, 34, Bratislava.
- Droppa, A. 1951. Smolenický kras v Malých Karpatoch. Zemepisný sborník, 3, Bratislava, 7-52.
- Droppa, A. 1952a. Kras na juhovýchodnej strane Malých Karpát. In Virsík M. et al. (Eds.): Kras a jaskyne Malých Karpát. Sprievodca Slovakotouru. Tatran, Bratislava, 63–138.
- Droppa, A. 1952b. Suchá jaskyňa v údolí Demänovky. Zemepisný sborník, 4, 1-2, Bratislava, 89–99. Droppa, A. 1955–56. Plavecká jaskyňa. Československý kras, 8-9, 120–123.
- Droppa, A. 1973. Prehľad preskúmaných jaskýň na Slovensku, Slovenský kras, 11.
- Fairchild, I., Baker, A. 2012. Speleothem science. From Process to Past Environment. Chichester, UK, Wiley-Blackwell.
- De Freitas, C. R., Schmekal, A. 2005. Prediction of condensation in caves, Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 3, 2, 1–9.
- Lačný, A. 2009. Využitie digitálnych teplomerov v speleologickej praxi. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 40, 4, 30–31.
- Lačný, A. 2012. Využitie digitálnych teplomerov v speleologickej praxi II. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 44, 4, 66–68.
- Lačný, A. 2015. Vplyv litológie a tektoniky na vývin krasu vo vybraných častiach malokarpatského krasu. Rigorózna práca, Katedra geológie a paleontológie PriF UK Bratislava, 98 s.
- Lačný, A., Putiška, R., Dostál, I., Kušnirák, D. 2012. Využitie metódy ERT pri prieskume jaskýň v Havranej skale (Plavecký kras). Slovenský kras, 50, 1, 41–60.
- Lánczos, T., Lačný, A., Jánošík, M., Feketeová, Z. 2013. Speleogenéza Havranickej jaskyne ako významného fenoménu Plaveckého krasu (Malé Karpaty). Acta Geologica Slovaca, 5, 1, 83–96.
- Majko, J. 1961a. Ako došlo k prieskumu v Čachtickom krase. Krásy Slovenska, 38, 3, 106–107.
- Majko, J. 1961b. Borinský kras v prieskume. Krásy Slovenska, 39, 10, 375-377.

Parkhust, D. L., Appelo, C. A. J. 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3 – A computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations: U. S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chapter A 43, 497 p.

- Peng, D. Y. & Robinson, D. B. 1976. A new two-constant equation of state. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 15, 1, 59–64.
- Polák, M., Plašienka, D., Kohút, M., Putiš, M., Bezák, V., Filo, I., Olšavský, M., Havrila, M., Buček, S., Maglay, J., Elečko, M., Fordinál, K., Nagy, A., Hraško, Ľ., Németh, Z., Ivanička, J., Brocka, I. 2011. Geologická mapa regiónu Malých Karpát 1 : 50 000. MŽP SR, ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Polák, M., Plašienka, D., Kohút, M., Putiš, M., Bezák, V., Maglay, J., Olšavský, M., Havrila, M., Buček, S., E., Elečko, M., Fordinál, K., Nagy, A., Hraško, Ľ., Németh, Z., Malík, P., Liščák, P., Madaras, J., Slavkay, M., Kubeš, P., Kucharovič, Ľ., Boorová, D., Zlínska, A., Siráňová, Z., Žecová, K. 2012. Vysvetlivky ku geologickej mape regiónu Malé Karpaty 1 : 50 000. MŽP SR, ŠGÚDŠ, Bratislava, 309 s.
- Stankoviansky, M. 1974. Príspevok ku poznaniu krasu Bielych Hôr v Malých Karpatoch. Geografický časopis, 26, 3, 241–257.
- Stankoviansky, M. 1978. Geomorfologické pomery Čachtických Karpát s osobitným zreteľom na Čachtický kras. Slovenský kras, 17, 59–76.
- Stankoviansky, M. 1982. Geomorfologické pomery krasových území Malých Karpát. Zborník referátov z geomorfologickej konferencie. Universita Karlova, Praha, 223–241.

NOVÝ SÚHRN POZNATKOV O SMOLENICKOM KRASE (MALÉ KARPATY)

ALEXANDER LAČNÝ^{1,2} – SILVIA MICHALÍKOVÁ¹ – TAMÁS CSIBRI¹ – TOMÁŠ KLUČIAR¹ – IVAN DOSTÁL³ – RENÉ PUTIŠKA³ – DÁVID KUŠNIRÁK³

- ¹ Katedra geológie a pelontológie, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava 4, lacny@fns.uniba.sk
- ² Štátna ochrana prírody SR, Správa Chránenej krajinnej oblasti Malé Karpaty, Štúrova 115, 900 01 Modra
- ³ Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava 4

A. Lačný, S. Michalíková, T. Csibri, T. Klučiar, I. Dostál, R. Putiška, D. Kušnirák: New summary of knowledge of the Smolenice Karst (Malé Karpaty Mts.).

Abstract: The Smolenice Karst is situated in the Malé Karpaty Mts. in the western part of the Slovak Republic. We analyzed 11 caves in the study area. The lithology and tectonics are important factors in formation of karst. From tectonic point of view, the caves are predominantly connected with the structures of NW-SE, NE-SW directions which can be dated to the period of Miocene with their reactivation up to the present. Some of the cave spaces are also formed on lithological interfaces. The study is focused on geology and speleology, and it uses a rich methodology from the fields of geophysics, geomorphology, petrology, sedimentology and other geosciences. It summarizes current knowledge of many geologists, geomorphologists and other experts involved in the research of the Smolenice Karst and the other karst areas of the Malé Karpaty Mts.

Key words: Malé Karpaty Mts., Smolenice Karst, Hlboča Valley, structural analysis, ERT method

ÚVOD

Smolenický kras je situovaný v pohorí Malé Karpaty, v západnej časti Slovenskej republiky. Pohorie tvoria viaceré geomorfologické podcelky (Devínske, Pezinské, Brezovské a Čachtické Karpaty), patriace k fatransko-tatranskej oblasti (Mazúr a Lukniš, 1978). Pestrá geologická stavba a rôznorodosť hornín predurčili Malé Karpaty k vzniku krasu vo forme menších a väčších krasových území, viažucich sa na karbonátové súvrstvia. Tieto súvrstvia predstavujú menšie či väčšie, viac alebo menej izolované masívy a pásy krasovatejúcich hornín, oddelených nekrasovými horninami (obr. 1). Okrem pestrej horninovej náplne boli Malé Karpaty ovplyvnené aj významnými tektonickými udalosťami. Tieto dva významné faktory sa v najväčšej miere podieľali pri genéze krasu a jaskýň. Práca je zhrnutím doterajšieho poznania autorov a mnohých geológov, geomorfológov či iných odborníkov podieľajúcich sa na výskume Smolenického krasu. Na lepšie poznanie boli pri výskume použité aj najmodernejšie metódy geologického a geofyzikálneho výskumu. Na tomto mieste je potrebné dodať, že tieto rozmanité krasové územia môžeme skúmať najmä vďaka práci dobrovoľných jaskyniarov, a to najmä ich rozsiahlemu speleologickému výskumu či mravčej dokumentačnej práci.



Obr. 1. Geomorfologické členenie krasu Malých Karpát v zmysle Mittera (1983) Fig. 1. Geomorphological division of the Male Karpaty Mts. karst area by Mitter (1983)

LOKALIZÁCIA SKÚMANÉHO ÚZEMIA

Smolenický kras (obr. 2) je menšie krasové územie vystupujúce na východnom okraji strednej časti Malých Karpát s rozlohou približne 7 km². Viazaný je na karbonáty fatrika. Typickými predstaviteľmi krasu sú jaskyňa Driny a krasová dolina Hlboča s jediným občasným vodopádom v Malých Karpatoch. Súvrstvia sú uklonené monoklinálne na S-SZ a ponárajú sa pod štruktúru Plaveckého krasu (Mitter, 1983). Známe sú vyvýšeniny Driny, Molpír a Cejtach. Na juhozápade Smolenický kras prechádza do Kuchynsko-orešanského krasu, na severe susedí s Plaveckým krasom. Tieto krasy sa niekedy označujú ako "Kras Bielych hôr" (Stankoviansky, 1974). V súčasnosti je v Smolenickom krase evidovaných 12 jaskýň (obr. 3).



Obr. 2. Vymedzenie skúmaného územia s použitím podkladovej mapy Mittera (1983) Fig. 2. Delimination of the study area with using the Mitters (1983) basemap



Obr. 3. Lokalizačná mapa jaskýň Smolenického krasu Fig. 3. Localization map of the Smolenice Karst caves

GEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA ÚZEMIA

Geológia územia

Skúmané územie leží v pohorí Malé Karpaty, ktoré je súčasťou tatransko-fatranského pásma budujúceho vonkajšiu zónu Centrálnych Západných Karpát (Plašienka et al., 1997; Plašienka, 1999). Malé Karpaty predstavujú dôležitý segment na styku Západných Karpát a Východných Álp. Na ich stavbe sa podieľajú paleoalpínske jednotky tatrika, fatrika a hronika. Tatrikum je budované kryštalinikom a jeho mezozoickým sedimentárnym obalom. Na povrch vystupuje najmä v južnej a centrálnej časti pohoria. V severnej časti Malých Karpát sa okrem tatrika nachádzajú aj príkrovové štruktúry fatrika a hronika. Popríkrovové sedimenty vrchnej kriedy sú zastúpené brezovskou skupinou (Salaj et al., 1987).

Paleogénne sedimenty sú v Malých Karpatoch zastúpené malokarpatskou skupinou (Buček in Polák et al., 2012) v severozápadnej časti územia.

Dnešnú podobu nadobudli Malé Karpaty v neskorom neogéne (Minár et al., 2011), keď sa pohorie tektonicky a morfologicky osamostatnilo od neogénnych paniev. Počas kvartéru sa modelovala riečna sieť. Práve v tomto období sa uplatnila významná fáza prehlbovania údolí a tvorby jaskýň.

Smolenický kras je z geologického hľadiska pokračovaním Kuchynsko-orešanského krasu, práve v nadväznosti najmä na jursko-kriedové členy vysockého príkrovu fatrika. Podľa Maheľa (1986) podstatnú časť príkrovu fatrika v Malých Karpatoch buduje práve vysocká jednotka. Zliechovská jednotka je zastúpená iba minoritne v stratigrafickom rozsahu od spodnej jury po vrchnú kriedu.

Tektonika územia

Malé Karpaty patria k najzápadnejším jadrovým pohoriam tatransko-fatranského pásma Centrálnych Západných Karpát. Vystupujú v rámci dlhej – celkovo vyše 100 km, ale relatívne úzkej – 15 km hrasti smeru JZ-SV, ktorý oddeľuje neogénnu Viedenskú a Dunajskú panvu.

V rámci Pezinských Karpát je táto hrasť dlhá 50 km a široká 15 km. Hrasť tu je obmedzená extenznými zlomovými systémami smeru JZ-SV. Zo SZ strany tvorí hranicu voči Viedenskej panve spodnomiocénny až subrecentný transformný zlom Viedenskej panvy (VBTF – Viena Basin Transform Fault), členený na viaceré segmenty (Decker et al., 2005; Beidinger a Decker, 2011; Hinsch a Decker, 2011). Smerom na SV pokračuje zlomový systém VBTF do oblasti Brezovských Karpát ako dobrovodský zlom.

Zlomové obmedzenie voči Dunajskej panve je označované ako malokarpatský zlom. Ide o poklesový zlom vrchnomiocénneho až kvartérneho veku. Priečne zlomové systémy smeru SZ-JV členia najmä južné časti Pezinských Karpát a podmieňujú existenciu výrazných priečnych depresií – prielomov, v geomorfologickej terminológii nazývaných "brány" (Karnuntská, Devínska a Lamačská brána).

Zo schémy tektonických jednotiek mapy Malých Karpát (obr. 4) vyplýva, že v skúmanom území (najmä v jednotke fatrikum) sú významne zastúpené zlomy smeru SZ-JV.

Tieto zlomy môžu mať súvis so systémom tzv. pílanských zlomov smeru SZ-JV, pozdĺž ktorých je mezozoikum zaklesnuté do kryštalinika. Tieto zlomy však pravdepodobne zasahujú aj do mezozoických jednotiek na severnom okraji Malých Karpát (Marko & Jureňa, 1999). Michalík (1984) tu zmapoval celý systém týchto priečnych zlomov.





Fig. 4. Scheme of distribution of tectonic units in the studied area by Polák et al. (2011)

METODIKA

V rámci výskumu Smolenického krasu sa využilo množstvo metodických postupov z rôznych vedných disciplín, najmä geológie, geomorfológie a geofyziky.

Mapovanie jaskynných priestorov sa realizovalo metódou polygónových ťahov za pomoci banskej závesnej súpravy. Výsledky boli softvérovo spracované v programoch WinKarst a Stereonet. Štruktúrne merania sa vykonali štandardnými metódami terénneho geologického výskumu. Na vyhodnotenie štruktúrnych meraní bol použitý program Wintensor, štruktúrne prvky sú zobrazené v spodnej hemisfére Schmidtovej siete. Metódy petrografickej a mikrofaciálnej mikroskopickej analýzy hornín využité pri výskume umožnili litostratigrafické zaradenie horninových komplexov, na ktoré sú jaskynné priestory viazané. Hlavnou metódou geofyzikálneho výskumu bola elektrická odporová tomografia (ERT). Hlavným princípom pri tomto meraní je použitie viacerých uzemnených elektród s rovnakou vzdialenosťou medzi nimi a ich následné pripojenie na viacžilový kábel (Griffiths a Barker, 1993). Merania sme realizovali aparatúrou ARES II (GF Instrument) s elektródovým usporiadaním dipól-dipól. Pri použití veľkého množstva nameraných dát sa dá relatívne celkom presne rekonštruovať horninové prostredie pomocou zobrazenia v odporovom reze (Loke a Barker, 1995, 1996; LaBrecque et al., 1996). Realizované geofyzikálne merania boli polohovo a výškovo zamerané aparatúrami Trimble GeoXR a Trimble M3. Na interpretáciu nameraných hodnôt sme použili program RES2DINV (Loke, 2010). Program vytvorí model, ktorého vypočítané

dáta sa čo najviac približujú k tým nameraným (Loke a Barker, 1996; Li a Oldenburg, 2000). Pri generovaní modelu vstupuje do procesu aj morfológia terénu.

JASKYNE SMOLENICKÉHO KRASU – VPLYV LITOLÓGIE A TEKTONIKY NA VZNIK JASKÝŇ

Jaskyňa Driny

Azda najtypickejším predstaviteľom Smolenického krasu je spolu s dolinou Hlboča nepochybne jaskyňa Driny (obr. 5). Dáva nám možnosť vytvoriť si obraz o vplyve krasovatenia a o procesoch vzniku podzemných priestorov v danom území. Jaskyňa Driny je lokalizovaná juhozápadne od Smoleníc. Vchod sa nachádza na západnom svahu vrchu Driny (434 m n. m.) vystupujúceho z juhozápadného úbočia Cejtachu (483 m n. m.). Sprístupnený vchod sa nachádza vo výške 399 m n. m. a pôvodný objavný komín vo výš-



ke 430 m n. m. Aktuálna dĺžka jaskyne je 680 m a vertikálne rozpätie 40 m. Jaskyňa Driny má puklinovo-korózny charakter (obr. 6) (Droppa, 1951). Vytvorená je v hnedosivých spodnokriedových rohovcových vápencoch vysockého typu (Michalík et al., 1992). V minulosti prevládala predstava vzniku jaskyne (Dosedla, 1947; Droppa, 1951 a 1952) koróznou i mechanickou činnosťou atmosférických vôd presakujúcich pozdĺž tektonických zlomov a puklín. Tento proces pretrváva viac-menej až do súčasnosti. Droppa (1951, 1952) tu opisuje suchú krasovú zónu bez stálych vodných zdrojníc, kde len občas presakuje zrážková voda. Počiatok vývoja jaskyne Driny predpokladá od pliocénu (hlavná fáza v starších štvrtohorách). Michalík et al. (1992) vo vzťahu k veku tektonických porúch, na ktoré je jaskyňa Driny

Obr. 5. Geologická skica jaskyne Driny. 1 – vrstvovité, nezreteľne hľuznaté silicifikované rohovcové vápence, 2–slienité, miestami bridličnaté vápence hlbočského súvrstvia, 3–lavicovité mikrobrekciovité vápence. Topografický podklad: Barca a Cebacauer, 1969. Zdroj: Michalík et al., 1992, upravené

Fig. 5. Geological sketch of the Driny Cave. 1 – bedded, indistinctly nodular, silicified, cherty limestones, 2 – marly occasionally shaly limestones of the Hlboča Fm., 3 – bedded limestones with microbreccia. Topographic source: Barca and Cebacauer, 1969. Source: Michalík et al., 1992, modified

viazaná, usudzujú, že od miocénu až do kvartéru mohla voda prenikať týmito poruchami a vytvárať podzemné dutiny. Na overenie predstavy vzniku jaskyne vo vadóznej zóne tu najnovšie výskumy realizoval Bella (2006). Jeho výskum potvrdzuje, že jaskyňa predstavuje typickú koróznu jaskyňu, ktorá vznikla rozšírením strmých tektonických porúch prevažne presakujúcimi vadóznymi zrážkovými vodami. Predpokladá, že hladinové zárezy a rúrovité diery vyhĺbené v skalných stenách poukazujú na krátkodobejšiu epifreatickú, resp. až freatickú zónu, ktorá sa však vytvorila vplyvom upchania spodných častí tektonických porúch.

Tektonicky je blok vrchu Drín od centrálnej časti Malých Karpát oddelený výrazným S-J zlomom. Je zaujímavé, že na tieto štruktúry sa neviažu väčšie podzemné priestory a nezohrávali veľkú úlohu pri vzniku jaskyne. Dominantne sú však zastúpené zlomové štruktúry SZ-JV smeru a SSV a JJV korešpondujúce s regionálnymi zlomami (Michalík et. al., 1992). Autori ďalej predpokladajú, že litológia – vrstevné plochy spadajúce mierne



Obr. 6. Korozívna chodba vstupnej časti. Foto: P. Staník

Fig. 6. Corrosive corridor of the entrance part. Photo: P. Staník

na SV a utesnené slienitými laminami – nemajú významnejší vplyv na vznik jaskynných chodieb. Naopak, autori uvádzajú, že najviac sú zastúpené zlomy SZ-JV ?dextrálnych posunov, skladajúcich sa zväčša z ťahových otvorených puklín. Iné chodby sledujú posuvné zlomy smeru SSV-JJZ, korešpondujúce so štruktúrami jahodníckeho zlomu.

Najaktuálnejšie výsledky z pohľadu recentnej tektoniky prináša práca Briestenský et al. (2011), ktorí použili na meranie relatívneho pohybu blokov v jaskyni niekoľko tenzometrov umiestnených v rokoch 2005 – 2010. Na základe výsledkov sa autori domnievajú, že v súčasnosti prichádza na štruktúrach SZ-JV k dextrálnym pohybom a na poruchách SSV-JJZ k sinistrálnym pohybom. Autori dedukujú, že súčasné napätie je kompresia SSZ-JJV. Vychádzajú z predstavy čistého strihu, kde poruchy SZ-JV a SV-JZ tvoria párový systém. To korešponduje s predstavou a mechanizmom recentného napätia v oblasti Malých Karpát (Kováč et al., 2002).

Diery v Zavesenej

Diery v Zavesenej sa nachádzajú na východnom svahu vápencového masívu Cejtach (483 m n. m.), približne 400 m na SV od jaskyne Driny (obr. 7A). Jaskyne sú vytvorené v padlovodskom súvrství, ktoré predstavuje sedimenty najvyššej jury až spodnej kriedy. Litologicky ide o hrubolavicovité, miestami doskovité až masívne sivé slienité vápence (Polák et al., 2012). Hneď prvá jaskyňa, dlhá 7,5 metra, je Diera v Zavesenej 1 (423 m n. m.) (obr. 8). Jaskyňa je puklinovo-korózna s pizolitovou výzdobou. Vznikla na križovaní hlavnej tektonickej poruchy SZ-JV A 308° a druhej tektonickej poruchy smeru SV-JZ. Pokračovanie je zasutinené. Pred jaskyňou sa nachádza vyťažená halda. Pracovali tu I. Vajsábel s J. Baničom a neskôr pri sprístupňovacích prácach v jaskyni Driny A. Droppa s J. Majkom. Predpokladali genetickú súvislosť jaskynných chodieb v Zavesenej s jaskyňou Driny (Droppa, 1951). Na JV od jaskýň by sa mali nachádzať 3 závrty a jedna depresia (Briestenský et al., 2011). Nad uvádzanou depresiou sme vykonali geofyzikálne meranie metódou ERT so zámerom potvrdiť, či depresia leží nad potenciálnou zlomovou štruktúrou, opísanou autormi. Naše výskumy nepotvrdili vzťah



Obr. 7. A – vykopaná halda pred Dierou v Zavesenej 1, dokazujúca intenzívne sondovacie práce v minulosti; B – puklina JZ smeru, na ktorej je založená Diera v Zavesenej 2; C – hlavná chodba na zlomovej štruktúre SV-JZ afinity (Puklina pod orechom); D – vodou zarezaný strop, vzniknutý pravdepodobne stagnujúcou vodou afinity (Puklina pod orechom); E – hlavná jaskynná chodba založená na tektonizovanej poruche SZ-JV smeru v jaskyni v Horštúnskych skalách 1; F – poloslepá dolina Hlboča; G – ostro zarezané severné svahy doliny; H – zachytená vyvieračka za bývalým pivovarom

Fig. 7. A – excavated heap in front of the Diera v Zavesenej 1 Cave proving an intensive probing works in the past; B – discontinuity of SW direction, on which the Diera v zavesnej 2 Cave was formed C – main passage created on the dicontinuity of NE-SW afinity (Puklina pod orechom Cave); D – cut ceiling probably formed by stagnant water (Puklina pod orechom Cave); E – main passage created by tectonized discontinuity of NW-SE direction in the Horštúnske skaly Cave 1; F – half-blind valley of the Hlboča; G – sharp cut of northern slopes of the valley; H – captured resurgence behind the former brewery

uvedenej depresie k zlomovej štruktúre. Je dokonca predpoklad, že depresia je antropogénneho pôvodu. Takýto pôvod môžu mať aj opisované závrty. Diera v Zavesenej 2 (obr. 9) sa nachádza v tom istom skalnom hrebienku ako Diera v Zavesenej 1, asi 30 metrov na severovýchod vo výške 430 m n. m. Ide o puklinovo--koróznu jaskyňu s dĺžkou 4 metre, ktorá smeruje pozdĺž hrebienka v smere A 219°, kde sa zúži do neprieleznej, 0,2 m širokej pukliny (obr. 7B). Puklina smeruje nadol k previsu, ktorý využívajú trampi. Na jaskyňu môže mať vplyv gravitačné rútenie jedného z blokov skalného hrebienka pozdĺž diskontinuity, na ktorú je jaskyňa viazaná. Nie je vylúčená genetická súvislosť s Dierou v Zavesenej 1.

Štruktúrne merania

Počas terénnych prác zameraných na zber štruktúrno-gelogických údajov v okolí jaskýň Pod Zavesenou (obr. 10) sme identifikovali 3 rozličné typy štruktúrnych dislokácií. Prvou je primárna vrstvovitosť S₀, ktorá je orientovaná SV--JZ smerom pod sklonom 50°. Prevrásnené plochy vrstvovitosti upadajúce na SV indikujú kompresnú udalosť v smere SV--JZ. Podobne prevrásnené horniny môžeme pozorovať na Dlhom vrchu v Kuchynskom-orešanskom krase (Potočný et al., 2016) či bežne inde v Malých Karpatoch. Nevýrazne je zastúpená diskontinuita S, orientovaná S-J smerom. Ďalším vyčleneným systémom je diskontinuita S₂ v smere SZ-JV a so sklonom 70 až 75°.

Puklina pod orechom

Jaskyňa leží v nadmorskej výške 360 m a dosahuje dĺžku 31 m (obr. 11). Významná je najmä jaskynnými chodbami, ktoré boli vytvorené krasovými vodami na



Obr. 8. Mapa jaskyne Diera v Zavesenej 1 Fig. 8. Map of the Diera v Zavesenej 1 Cave



Obr. 9. Mapa jaskyne Diera v Zavesenej 2 Fig. 9. Map of the Diera v Zavesenej 2 Cave

významnej zlomovej štruktúre, a zároveň polohou v blízkosti jaskyne Driny. Dá sa teda predpokladať aj vzťah podobných krasových činiteľov pôsobiacich na jaskyňu.

Jaskyňa je známa pravdepodobne oddávna (nálezy z neolitu). Prvý ju vo svojej práci spomenul Droppa (1952), ktorý sa počas speleologického prieskumu jaskyne Driny venoval aj výkopovým prácam na tejto lokalite. Jaskyňu považoval spolu so svojimi spolu-



Obr. 10. Tektonogram nameraných štruktúrnych dát na lokalite Pod Zavesenou Fig. 10. Tektonograms of structural data on the locality Pod Zavesenou



Obr. 11. Mapa jaskyne Puklina pod orechom Fig. 11. Map of the Puklina pod orechom Cave

pracovníkmi za perspektívnu z hľadiska objavenia voľných jaskynných priestorov. Pred jaskyňou sa nachádza halda vyťaženého sedimentu. Okrem Droppu, Majka či ešte starších prieskumníkov tu pracovali aj brigádnici z jaskyne Driny, ktorí nadviazali na práce z minulosti. Z geologického hľadiska sa jaskyňa nachádza v horninách fatrika, v karbonátoch trlenského súvrstvia (Polák et al, 2012). Ide o sivé až čierne krinoidové, rohovcové vápence sinemúrskeho veku.

Miestni jaskyniari z Trnavy tu vykonávajú sporadický speleologický prieskum približne od roku 2007 s pozitívnymi výsledkami (Lačný, 2010). Význam tejto jaskyne vo vzťahu k aktívnej

tektonike publikovali aj Briestenský et al. (2011). Autori opísali významné zlomové štruktúry SZ-JV smeru. Práve časť týchto štruktúr v kombinácií so SV-JZ smermi sa podieľala na vzniku jaskynných priesorov v tejto jaskyni. Hlavná porucha je v smere A 230° a na nej vytvorená chodba tu dosahuje výšku 2,5 metra a šírku 2 metre (obr. 7C). V najnižšom bode jaskyne je vyhĺbená pracovná sonda s citeľným prievanom. Jaskyňa je zväčša vyplnená červenou terra rossou. Pri sondážnych prácach sa nenašli známky alochtónneho sedimentu v podobe opracovaných obliakov. Významnú úlohu tu zohrala korozívna činnosť vôd na zlomové štruktúry SV-JZ a SZ-JV smerov. Nevylučujeme ani epizodické zaplavovanie priestorov v dôsledku upchania spodných častí jaskyne. Tomu môžu nasvedčovať stropné korozívne tvary a aj koróziou zarezaný strop nachádzajúci sa vo vstupnej časti jaskyne (obr. 7D).

Geofyzikálny prieskum Pukliny pod orechom

Na skúmanej lokalite sa v roku 2014 vykonali štyri paralelné profilové merania odporovou metódou ERT. Nad lokalitou boli realizované profily (ERT-P1 až ERT-P4) v smere JV-SZ (obr. 12). Všetky profilové merania mali jednotnú dĺžku 141 m s elektródovou vzdialenosťou 3 m. Vzájomná vzdialenosť medzi profilmi bola približne 11 m. Použitá bola aparatúra ARES (GF Instruments, Brno, ČR). Pri vlastnom meraní bolo použité usporiadanie dipól-dipól, ktoré je vhodné na lokalizáciu izometrických



Obr. 12. Situácia ERT meraní na lokalite Fig. 12. Orientation of ERT profiles at the study area

anomálnych telies v odporovom poli. Na jednotlivých profiloch sú prezentované vo forme 2D odporových rezov na obrázku 13. Profil ERT-P1 bol situovaný cca 10 m nad vchodom do jaskyne – v už známych jaskynných priestoroch (metráž 65 – 72 m). V odporovom reze je jaskynný priestor charakterizovaný anomáliou s vysokým merným odporom (nad 3000 Ω m). Na profile ERT-P2 sa anomália s vysokou hodnotou odporu rozdeľuje na dve časti, ľavá hlbšie pod povrchom a pravá bližšie k povrchu. Na profile ERT-P3 sa sledované anomálie zmenšujú a pod anomáliou na pravej strane sa objavuje prostredie s nižším merným odporom (cca 100 Ω m), čo môže predstavovať puklinu vyplnenú sedimentmi. Na profile ERT-P4 sa sledované anomálie s vysokým odporom spájajú a sú uložené blízko povrchu (obr. 13, metráž 55 – 75 m). Anomália s nižším odporom z predošlého profilu je viditeľná aj na tomto profile a na jej pravej strane sa objavuje ďalšia anomália s vysokým merným odporom (metráž 75 – 85 m). Môže ísť o ďalší prejav dutiny.



Obr. 13. 2D inverzné odporové rezy profilov ERT-P1 až ERT-P4 Fig. 13. 2D inverse resistances section of the profiles ERT-P1 to ERT-P4

Geofyzikálnym výskumom sa potvrdilo, že hlavná jaskynná chodba SV-JZ smeru pokračuje v blízkosti povrchu, no nesiaha významne po tektonickej štruktúre do hĺbky. Aj napriek umiestneniu anomálie v blízkosti povrchu neevidujeme tu žiadne povrchové depresie či významnú zmenu reliéfu. Nemožno vylúčiť, že jaskyňa je iba akýmsi reliktom jaskynného systému. To by potvrdili iba systematické výkopové práce. Nie však do hĺbky, ale horizontálne v smere realizácie geofyzikálnych profilov. Výkopové práce môžu byť úspešné vo vzťahu k objaveniu voľných jaskynných priestorov a nie je vylúčené ani napojenie na rozsiahlejší jaskynný systém.

Jaskyne v Horštúnskych skalách

Jaskyňa v Horštúnskych skalách 1 (Nad Bezkou 1), leží v nadmorskej výške 335 m (obr. 14). Dĺžka jaskyne v súčasnosti dosahuje 33 m. Otvor sa nachádza v skalnom masíve na Horštúnskych skalách, asi 150 metrov východne od rekreačného zariadenia Záruby. Jaskyňa pozostáva z rozsiahlejšej sienky, ktorá sa tiahne v SZ smere do masívu (obr. 7E). Na konci tejto sienky sa nachádzajú tri vyerodované kanály smerujúce na



Obr. 14. Mapa Jaskyne v Horštúnskych skalách 1 (Nad Bezkou 1) Fig. 14. Map of the Jaskyňa v Horštúnskych skalách 1 Cave (Nad Bezkou 1)

sever. V strednom z nich boli vykonané sondážne práce s výsledkom, že kanál sa zužuje do neprielezna, je tu však citeľný prievan. Samotná jaskyňa má až 3 vchody ústiace na povrch. Nad povrchom jaskyne vidno rozsadlinu, ktorá do nej ústi. Jaskyňa vznikla na križovaní tektonických porúch SZ-JV smeru a S-J smeru v karbonátoch padlovodského súvrstvia (titón – berias) vysockého príkrovu. Poruchy boli tektonizované, čo sa prejavuje zbridličnatením karbonátu. V hlavnej chodbe sa na strope vyskytujú erodované útvary oválneho tvaru. Vo vzťahu ku genéze vzniku jaskyne bol v roku 2013 v strede hlavnej chodby vyhotovený sedimentologický profil (A. Lačný, L. Brečka). Prvých 20 cm profil obsahoval čiernu zeminu s ostrohrannými úlomkami od 2 do 10 cm, humusom a recentným osteologickým materiálom. Pod touto vrstvou sa nachádzala vrstva ílovitej zeminy okrovej farby. V tejto časti už väčšie klasty nedominovali. Po 40 cm bolo dosiahnuté skalné dno jaskyne. Nepotvrdil sa výskyt obliakov ani riečneho sedimentu, čo by svedčilo o aktívnom vodnom toku, ktorý by sa zanáral do jaskyne. Mätúce sú v tomto prípade erozívne útvary na strope jaskyne či modelácia okolitých jaskýň (Jaskyne v Horštúnskych skalách 2 a 3). Nemožno jednoznačne určiť, či v tomto prípade ide o jaskyňu korozívnu, alebo fluviokrasovú.

Postupujúc od Jaskyne v Horštúnskych skalách 1 na juhovýchod sa asi po 100 metroch nachádza v skalách otvor do jaskyne v Horštúnskych skalách 2 (Nad Bezkou 2). Jaskyňa leží vo výške 320 m n. m. a dosahuje dĺžku 24 m (obr. 15). Je pravdepodobne fluviokrasového pôvodu a má dva vchody. Pôvod predikuje modelácia chodieb. Iba jedna z nich smeruje do masívu, avšak končí sa neprieleznou úžinou. Jaskyňa vznikla na poruchách SZ-JV, SV-JZ a S-J smeru. Jaskyňa v Horštúnskych skalách 3 (Nad Bezkou 3, 323 m n. m.; obr. 16) sa nachádza cca 6 metrov vľavo od Jaskyne v Horštúnskych skalách 2. Má dva otvory a možno sa domnievať, že má genetický súvis s vedľajšou jaskyňou. Dosahuje dĺžku 5 m.



Obr. 15. Mapa Jaskyne v Horštúnskych skalách 2 (Nad Bezkou 2) Fig. 15. Map of the Jaskyňa v Horštúnskych skalách 2 Cave (Nad Bezkou 2)



Obr. 16. Mapa Jaskyne v Horštúnskych skalách 3 (Nad Bezkou 3) Fig. 16. Map of the Jaskyňa v Horštúnskych skalách 3 Cave (Nad Bezkou 3)
Dolina Hlboča

Dolina Hlboča je najtypickejšou povrchovou formou Smolenického krasu. Je hlboká až 100 metrov a vznikla chemickou a mechanickou činnosťou tečúcej vodv (obr. 7F). Dolina oddeľuje masív Cejtachu (484 m n. m.) od Molpíra (354 m n. m.). Ide o typ subsekventného (priečneho) údolia vytvoreného v smere vápencových vrstiev (Droppa, 1951). Charakter údolia udáva tektonika. Južná strana údolia je vytvorená na sklone vrstiev, a preto je hladká a plochšia. Naopak, severným svahom dominujú skalné bralá vysoké niekoľko desiatok metrov, a to najmä povedľa vodopádu Padlá voda (obr. 7G). Občasný vodný tok dotovaný atmosférickými zrážkami pri topení snehu a výdatných dažďoch vytvára predovšetkým počas jari na skalnej stene 9 metrov vysoký vodopád. Vodopád Padlá voda, ktorý je vytvorený na padlovodských vápencoch (titón – berias), je jediným občasným vodopádom v Malých Karpatoch. Tesne nad vodopádom sa chemickým rozpúšťaním a mechanickým pohybom vody za pomoci kameňov, štrku a piesku, ktoré sem prináša občasný silnejší povrchový tok, vytvorili krútňavové hrnce nazývané aj kotlíky. Dosahujú priemer až 1.5 m. Vo vyššej časti jurského komplexu v doline Hlboča pribúda tmavých bridlíc a kremitých hornín. Jurský sled pod vodopádom Padlá voda sa končí červenkastými hľuznatými vápencami jaseninského súvrstvia (kimeridž – titón). Na nich spočívajú skalné steny tvorené spodnokriedovým súvrstvím Padlej vody, prekryté bridličnatými hlbočskými vápencami veku valangin – barém. V nich je vytvorený aj skalný zárez, z podstatnej časti umelo vysekaný. Práve názov vodopádu Padlá voda evokuje, že vody pod vodopádom sa po niekoľkých desiatkach metrov strácajú do podzemia. Droppa (1951) tu v ľavej stene vápencového masívu pod vodopádom opisuje opustený ponor, založený na pukline v smere A 342° so sklonom 49° na SV. Už pri jeho výskumoch bol zasypaný zvetraným povrchovým štrkom. Vodný tok sa vynára až v niekoľkých vyvieračkách v okolí Smoleníc, časť Prílohy a za bývalým pivovarom (obr. 7H).

Štruktúrne merania

Primárna vrstvovitosť Sosa nachádzala na všetkých nami nameraných odkryvoch. Má smer SV-JZ (obr. 17). Vrstvovitosť generálne upadá na sever, prípadne S-SZ so sklonom okolo $50 - 60^{\circ}$. Na primárnu vrstvovitosť kolmo nasadá ďalší systém porúch S, generálne S-J smeru. Všeobecne sa ukladajú na východ a vyznačujú sa pomerne širokým rozpätím sklonu v rozmedzí od 50 do 90°. Tento systém porúch sa nenachádza len v Smolenickom krase, ale aj v okolitých krasových oblastiach. S-J subvertikálne smery porúch sú významné z hľadiska tvorby jaskýň napríklad v Kuchynsko-orešanskom krase, pričom najviac jaskýň sa viaže práve na tieto diskontinuity (Lačný, 2013), ako aj v Plaveckom krase, kde sa na tento systém viaže napríklad Havranická jaskyňa (Lánczos et al., 2013). V Smolenickom krase však na tieto poruchy nie je viazaných veľa jaskynných priestorov. Diskontinuity súvisia so zlomami S-J afinity, ktoré spolu so zlomami SZ-JV smeru tvoria párový systém, ktorý bol spojený s pull-apart otváraním Viedenskej panvy (Marko a Jureňa, 1999). Ďalším vyčleneným systémom porúch sú S, diskontinuity (obr. 17), ktoré majú smer SZ-JV. Nemôžeme určiť jednoznačne generálny smer, kam upadajú, ale sú pomerne strmo sklonené (okolo 80°). Spočiatku sme si mysleli, že ide o štruktúry kliváže, čomu nasvedčovali zalomené vrásky. Neskôr po konzultácii (Plašienka pers. com, 2016) sme dospeli k záverom, že by mohlo ísť o reaktivizáciu starších extenzných systémov puklín v kompresnom režime. Preto sa najviac hodí na vyjadrenie pôvodu týchto štruktúr negenetické označenie "puklinová kliváž". Nevylučujeme, že môže ísť o dextrálne zlomové štruktúry SZ-JV smeru (Briestenský et al., 2011).



Obr. 17. Tektonogramy nameraných štruktúrnych dát v doline Hlboča Fig. 17. Tectonograms of the structural data from the Hlboča Valley

Geofyzikálny prieskum v doline Hlboča

V rámci geologického výskumu sa vykonali aj geofyzikálne merania s cieľom zistiť, kam odteká voda z vodopádu. Je zjavné, že vodný tok už po pár metroch úplne mizne v podzemí a nepreteká ďalej dolinou. Na začiatku doliny v obci Smolenice je zachytených niekoľo vyvieračiek, ktoré nám indikujú možnosť, že sa v tejto oblasti môže nachádzať podzemný vodný tok.

Roku 2015 sa v doline uskutočnili dve profilové merania (obr. 18) ERT-P1 a ERT-P2 v rovnakej dĺžke 161 metrov a elektródovej vzdialenosti 3 m v smere S-J a SV-JZ v nezávislej vzdialenosti od seba. Prvý profil bol vedený v blízkosti ponoru toku,



Obr. 18. Situácia ERT meraní na lokalite Fig. 18. Orientation of ERT profiles at the study area



Obr. 19. A – geofyzikálny profil ERT-1, B – geologická interpretácia profilu ERT-P1 Fig. 19. A – geophysical profile ERT-1, B – geological interpretation of profile ERT-P1

ktorý nám odhalil nízkoodporovú anomáliu širokú 10 m v rozpätí 83 – 93 m dĺžky profilu v hĺbke od 9 m (horný okraj anomálie). V geologicko-geofyzikálnom reze ERT-P1 (obr. 19A) je jasne definované odporové rozhranie medzi vápencami a miestom infiltrácie.

Táto anomália poukazuje na výskyt podzemného toku v doline. Zaujímavosťou je, že na druhom profile (ERT-P2), ktorý sme viedli o niekoľko sto metrov ďalej, bližšie k obci Smolenice, sa nepreukázalo pokračovanie anomálie ani iný anomálny prejav. Príčinou môže byť fakt, že štruktúra sa nachádza hlbšie ako nami realizované meranie.

Na základe tohto zistenia sa 26. októbra 2015 vykonalo druhé meranie ERT-P3 (obr. 20), pričom profil v dĺžke 220 m a elektródovej vzdialenosti 4 m sme situovali kolmo na prvý profil pozdĺž doliny. Toto meranie nám potvrdilo výskyt anomálie nameranej v prvom profile, ktorá pokračuje dolu pozdĺž údolia a končí sa vo vzdialenosti 120 m od tretieho profilu.



Obr. 20. Geofyzikálny profil ERT-3 so zachytenou anomáliou Fig. 20. Geophysical profile ERT-3 with the detected anomaly

Interpretácia anomálie nás doviedla k dvom hypotézam: ide buď o otvorenú jaskynnú dutinu, alebo len o priestor vyplnený zvodneným sedimentom. Druhá hypotéza o vyplnení zvodneným sedimentom sa nám javí ako pravdepodobnejšia. Otázka zostáva otvorená a môže byť predmetom ďalšieho výskumu v tejto oblasti, napríklad aj z dôvodu, že môže ísť o voľnú dutinu preplachovanú vodou, ktorá má zvodnené okraje, a preto preukazuje nízke odpory.

Na geologicko-geofyzikálnom reze ERT-P1 môžeme vidieť, že na severnom svahu karbonáty preukazujú vyššie odpory. Predpokladáme ich lepšiu kompaktnosť ako na južnom svahu. Navyše, može prichádzať po porušených plochách vrstvovitosti na južnom svahu k infiltrácii zrážových vôd, čo sa vo výslednom geofyzikálnom profile prejavuje nižšími odpormi. Južný svah je zároveň pokrytý vrstvou pôdneho horizontu so svahovými sutinami. Na dne doliny sa nachádza zvodnený sediment, ktorý sem bol transportovaný občasným vodným tokom (obr. 19B).

Mníchove diery

Všetky tri Mníchove diery sa nachádzajú v krasovej doline Hlboča, v jej severnom svahu. Puklinové otvory Mníchových dier ležia iba 10 metrov od plošinového vrcholu



Obr. 21. A – erodovaná vstupná jaskynná chodba Mníchovej diery 3 na subvertikálnej poruche; B – vodou vyerodovaná vstupná časť Mníchovej diery 1; C – odkryv s vyčlenenými poruchami nad kaplnkou; D – vchod do Mníchovej diery 1 s vyznačenou diskontinuitou; E – vstup do Mníchovej diery 2 s vyznačenou diskontinuitou; F – vstup do Mníchovej diery 3 s vyznačenou diskontinuitou

Fig. 21. A – eroded entry part of the Mníchova diera 3 Cave created on the subvertical discontinuity; B – entrance to the Mníchova diera 1 Cave created by water erosion; C – outcrop with allocated discontinuities above the chapel; D – entrance to the Mníchova diera 3 Cave with measured discontinuity; E – entrance to the Mníchova diera 2 Cave with measured discontinuity; F – entrance to the Mníchova diera 3 Cave with measured discontinuity;

Molpíra (354 m n. m.) a svojím charakterom predstavujú bývalé ponory niekdajšieho povrchového toku, ktorý vyerodoval terajšie suché údolie Hlboče (Droppa, 1952). Činnosť tohto toku netrvala pravdepodobne dostatočne dlhý čas na vytvorenie väčších jaskýň a tok pokračoval vo svojom zarezávaní do podložia. V súčasnosti sa preto jaskyne nachádzajú asi 80 m nad suchým údolím. Všetky tri jaskyne sú fluviokrasové a vytvorili sa na subvertikálnych zlomových štruktúrach SSV-JJZ smeru.

Mníchova diera 3 sa nachádza 60 metrov od Hlbočského vodopádu vo výške 350 m n. m. v ždiarskom súvrství, v sakokómovo-aptychových vápencoch. Z väčšieho jaskynného otvoru jaskyňa pokračuje úzkou puklinou v smere A 30°, širokou miestami iba cca 30 centimetrov do úplného zúženia (obr. 21A, F). I napriek tomu je na jej konci cítiť šíriaci sa prievan spod skál. Celá jaskyňa dosahuje dĺžku len 9,5 metra.

Mníchova diera 2 sa nachádza 750 metrov východne od Mníchovej diery 3 (obr. 21E) vo výške 339 m n. m. v trlenskom súvrství v spodnojurských čiernych a sivých krinoidovorohovcových vápencoch. Je najmenšia z troch jaskýň a dosahuje len 5 m. Steny zdobia pizolity a sú tu zastúpené aj erózne stropné formy. Jaskyňa smeruje do masívu v smere A 40° až do neprielezna. Z ľavej strany hlavnej chodby vybieha ďalšia malá chodbička, ktorá spolu s hlavnou mizne v masíve. Pri meraniach sme tu mali problém vyčleniť primárnu vrstvovitosť, pravdepodobne bola prepísaná neskoršou tektonickou aktivitou.

Ak budeme pokračovať ďalej na východ od Mníchovej diery 2, už po 50 metroch narazíme na Mníchovu dieru 1 v nadmorskej výške 365 m. Jej veľký vstupný vchod, ktorý pôsobí ako veľký krútňavový hrniec, pokračuje len v dvoch úzkych chodbičkách, pričom v jednej z nich cítiť šíriaci sa prievan (obr. 21B, D). Celá jaskyňa dosahuje dĺžku 10 m.

V južnom svahu doliny Hlboča nad kaplnkou evidujeme ešte jednu jaskyňu. Jaskyňa bola lokalizovaná okolo roku 2007 za pomoci lesníka M. Obúlaného zo Smoleníc. Od dĺžky 2 m je zasypaná sedimentom a 15 m v smere ku kaplnke sa nachádza ďalší jaskynný otvor na tektonickej poruche A 180°, ktorý je momentálne zasypaný. Podľa tvrdenia lesníka bol vchod v minulosti priechodnejší. Zároveň však môže ísť o torzo jaskyne, prípadne o zasypané abri. Jaskyňa dostala pomenovanie Jaskyňa nad kaplnkou v Hlboči. Leží v nadmorskej výške 385 m a v súčasnosti dosahuje dĺžku 2 m. Nad jaskyňou sa vykonali štruktúrne merania, ktoré potvrdili výskyt štruktúr identických ako v doline Hlboča (obr. 21C).

Štruktúrne merania

V okolí jaskýň Mníchové diery boli významne zastúpené štruktúry smeru SSV-JJZ; generálne sa ukladajú na juhovýchod a sú veľmi strmo uklonené v rozmedzí 80 až 90°(obr. 22, 23). Tieto štruktúry však pozorujeme len v okolí jaskýň a práve preto predpokladáme, že boli predispozíciou na vznik jaskynných priestorov. Smery štruktúr kopírujú smer Jahodníckeho zlomu, ktorý oddeľuje blok Drín od západnej časti Malých Karpát. Ide o systém porúch, ktoré tvoria spolu s dextrálnymi posunmi SZ-JV párový systém. Napríklad v jaskyni Driny či iných jaskyniach Smolenického krasu zohrávajú dôležitú funkciu pri ich genéze.

ZÁVER

Počas prác na území Smolenického krasu sa podarilo realizovať výskum v 11 jaskyniach z 12 jaskýň Smolenického krasu. Výskum neprebiehal iba v Malej jaskyni, lokalizovanej bezprostredne pri jaskyni Driny, kde predpokladáme genetický súvis s jaskyňou



Obr. 22. Mapa jaskýň Mníchove diery so štruktúrnymi meraniami Fig. 22. Map of the Mníchove diery caves with structural measurements



Obr. 23. Tektonogram nameraných štruktúrnych dát v okolí Mníchových dier Fig. 23. Tectonograms of structural data measured around Mníchove diery locality

Driny. Jaskyne vznikali vo vrchnojurských až spodnokriedových karbonátoch fatrika. Na základe štruktúrnych meraní v jaskyniach a blízkom okolí sa potvrdilo, že jaskynné priestory vznikali dominantne na tektonických poruchách SZ-JV a SV-JZ smerov. Tieto štruktúry vznikali v miocéne s ich reaktivizáciou až po súčasnosť. V jaskyni Driny prichádza k aktivite na týchto zlomových štruktúrach, resp. ich reaktivizácii (Briestenský et al., 2011) pri kompresii približne S-J smeru aj v súčasnosti. Vzniká tu preto problém, najmä v homogénnych karbonátoch bez markerov, definovať genetickú postupnosť vyčleňovaných štruktúr v celom Smolenickom krase. V modeli čistého strihu by malo prichádzať aj k vzniku, resp. reaktivizácii extenzných S-J štruktúr. Domnievame sa preto, že súčasná kompresia môže mať vplyv aj na staršie zlomové štruktúry S-J smeru. Je však zaujímavé, že tieto štruktúry nie sú významne zastúpené pri vzniku jaskynných priestorov. Na vzniku jaskynných chodieb sa malou mierou podieľala primárna vrstvovitosť. V kontexte veku vzniku jaskýň v Malých Karpatoch predpokladáme aj v Smolenickom krase hlavnú fázu krasovatenia v pliocénno-kvartérnom období. Na lokalite Puklina pod orechom sa realizovali geofyzikálne merania s cieľom zistiť možné pokračovanie jaskynných systémov. Na uvedenej lokalite bola premeraná 2D odporová tomografia. Tá potvrdila pokračovanie jaskynného telesa JZ smerom. Výskum doliny Hlboča zasa touto metódou potvrdil porušenie masívu a infiltráciu vôd od vodopádu Padlá voda do koncentrovanej štruktúry.

Poďakovanie: Príspevok bol vypracovaný s podporou projektov APVV-16-0146, APVV-0212-12 a APVV-0315-12.

LITERATÚRA

- Beidinger, A., Decker, K. 2011. 3D geometry and kinematics of the Lassee flower structure: Implications for segmentation and seismotectonics of the Vienna Basin strike-slip fault, Austria. Tectonophysics, 499, 22–40.
- Bella, P. 2006. Príspevok k morfológii a genéze jaskyne Driny. Aragonit, 11, 4-9.
- Briestenský, M., Stemberk, J., Michalík, J., Bella, P., Rowberry, M. 2011. The use of a karstic cave systems in a study of active tectonics: fault movements recorded at Driny cave, Malé Karpaty Mts. (Slovakia). Journal of Cave and Karst Studies, 73, 2, 114–123.
- Decker, K., Peresson, H., Hinsch, R. 2005. Active tectonics and Quaternary basin formation along the Vienna Basin Transform fault. Quaternary Science Reviews, 24, 307–322.
- Dosedla, J. 1947. Příspěvek k poznání krasu v Malých Karpatech. Sborník Československé společnosti zeměpisné, 52, 3–4, 88–91.
- Droppa, A. 1952. Kras na juhovýchodnej strane Malých Karpát. In Virsík, A. a kol.: Kras a jaskyne Malých Karpát. Sprievodca Slovakotouru. Tatran, Bratislava, 63–138.
- Droppa, A. 1951. Smolenický kras v Malých Karpatoch. Zemepisný sborník, 3, Bratislava, 7-52.
- Griffiths, D. H., Barker, R. D. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. Journal of Applied Geophysics, 29, 211–226.
- Hinsch, R., Decker, K. 2011. Seismic slip rates, potential subsurface rupture areas and seismic potential of the Vienna Basin Transfer Fault. International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau), 100, 1925–1935.
- Kováč, M., Bielik, M., Hók, J., Kronome, B., Labák, P., Moczo, P., Plašienka, D., Šefara, J., Šujan,
 M. 2002. Seismic activity and neotectonic evolution of the Western Carpathians (Slovakia):
 EGU Stephen Mueller Special Publication, Series 3, 167–184.
- Labrecque, D., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A., Owen, E. 1996. The effects of 'Occam' inversion of resistivity tomography data. Geophysics, 61, 538–548.
- Lačný, A. 2010. Neprístupné jaskyne Smolenického krasu. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 41, 3, 14–18.

- Lačný, A. 2013. Vplyv litológie a tektoniky na vznik jaskýň v Kuchynsko-orešanskom krase. Acta Geologica Slovaca, 5, 1, 97–105.
- Lánczos, T., Lačný, A., Jánošík, M., Feketeová Z. 2013. Speleogenéza Havranickej jaskyne ako významného fenoménu Plaveckého krasu (Malé Karpaty). Acta Geologica Slovaca, 5, 1, 83–96.
- Li, Y. G., Oldenburg, D. W. 2000. 3-D inversion of induced polarization data. Geophysics, 65, 1931–1945.
- Loke, M. H., Barker, R. D. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. Geophysics, 60, 1682–1690.
- Loke, M. H., Barker, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131–152.
- Loke, M. H. 2010. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.geoelectrical.com / downloads.php, 08.02.2011.
- Maheľ, M. 1986. Geologická stavba československých Karpát Paleoalpínske jednotky 1. Veda, Bratislava, 503 s.
- Marko, F., Jureňa, V. 1999. Zlomová tektonika východného okraja viedenskej panvy a hrastu Malých Karpát. Mineralia Slovaca, 31, 513–524.
- Mazúr, E., Lukniš, M. 1978. Regionálne geomorfologické členenie SSR. Geografický časopis, 30, 2, 101–124.
- Michalík, J. 1984. Some remarks on develomental and structural interpretation of the northwestern part of Malé Karpaty Mts. (West Carpathians). Geologica Carpathica, 35, 4, 481–507.
- Michalík, J., Reháková, D., Marko, F. 1992. Stratigrafia a tektonika spodnokriedovej vápencovej sekvencie v profile jaskyne Driny (vysocká jednotka, Malé Karpaty). Mineralia Slovaca, 24, 235–243.
- Minár, J., Bielik, M., Kováč, M., Plašienka, D., Barka, I., Stankoviansky, M., Zeyen, H. 2011. New morphostructural subdivision of the Western Carpathians: An approach integrating geodynamics into targeted morphometric analysis. Tectonophysics, 502, 158–174.
- Mitter, P. 1983. Geomorfologická rajonizácia krasu Malých Karpát. Slovenský kras, 21, 3-34.
- Plašienka, D. 1999. Tektochronológia a paleotektonický model jursko-kriedového vývoja Centrálnych Západných Karpát. Veda, Bratislava, 125 s.
- Plašienka, D., Grecula P., Putiš, M., Kováč, M., Hovorka, D. 1997. Evolution and structure of the Western Carpathians: an overview. In Grecula, P., Hovorka, D., Putiš, M. (Eds.): Geological evolution of the Western Carpathians. Mineralia Slovaca – Monograph, 1–24.
- Polák, M., Plašienka, D., Kohút, M., Putiš, M., Bezák, V., Filo, I., Olšavský, M., Havrila, M., Buček, S., Maglay, J., Elečko, M., Fordinál, K., Nagy, A., Hraško, Ľ., Németh, Z., Ivanička, J., Broska, I. 2011. Geologická mapa regiónu Malých Karpát 1 : 50 000. MŽP SR, ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Polák, M., Plašienka, D., Kohút, M., Putiš, M., Bezák, V., Maglay, J., Olšavský, M., Havrila, M., Buček, S., Elečko, M., Fordinál, K., Nagy, A., Hraško, Ľ., Németh, Z., Malík, P., Liščák, P., Madaras, J., Slavkay, M., Kubeš, P., Kucharič, Ľ., Boorová, D., Zlínska, A., Síráňová, Z., Žecová, K. 2012. Vysvetlivky ku geologickej mape regiónu Malé Karpaty 1 : 50 000. MŽP SR, ŠGÚDŠ, Bratislava, 309 s.
- Potočný, T., Csibri, T., Lačný, A. 2016. Genéza závrtov vplyvom tektoniky oblasť Dlhého vrchu (Malé Karpaty, Kuchynsko-orešanský kras). Slovenský kras, 54, 2, 109–118.
- Salaj, J., Began, A., Hanáček, J., Mello, J., Kullman, E., Čechová, A., Šucha, P., 1987: Vysvetlivky ku geologickej mape Myjavskej pahorkatiny, Brezovských a Čachtických Karpát 1 : 50 000. ŠGÚDŠ, Bratislava, 181 s.
- Stankoviansky, M. 1974. Príspevok k poznaniu krasu Bielych hôr v Malých Karpatoch. Geografický časopis, 26, 3, 241–257.

NEW SUMMARY OF KNOWLEDGE OF THE SMOLENICE KARST (MALÉ KARPATY MTS.)

Summary

During the field work in the Smolenice Karst area we carried out the research in 11 of 12 caves located in the Smolenice Karst area. The research was not realized in the Malá jaskyňa Cave located nearby the Driny Cave. This cave is probably is genetically related to the Driny Cave.

Studied caves were formed in Upper Jurassic to Lower Cretaceous carbonates of Fatric Unit. Based on structural measurements in the caves and closed areas, it has been confirmed that caves were formed predominantly on tectonic structures with NW-SE and NE-SW direction. These structures were formed in Miocene with its reactivation until present. In the Driny Cave, activity on these fault structures, or their reactivation (Briestenský et al., 2011), was influenced by the compression oriented approximately in N-S direction. In the model of simple shear, it should have commute even to emergence or reactivation of extensive N-S structures. Therefore, we assume that the present compression may have an influence on older fault structures of N-S direction. An interesting fact is that these structures are not significant for formation of caves. The primary bedding (S_0) affected the formation of the passages to a very small extent. In the context of karst formation in the Malé Karpaty Mts., we expect also in Smolenice karst area with main phase in the Plio-Quaternary period. In the vicinity the Puklina pod orechom Cave, geophysical measurements were realized with goal to determine the possible continuation of the cave system. During the measurement, 2D resistivity tomography was used. The result confirmed the continuation of cave towards SW. The geophysical studies (using the same method) in the Hlboča Valley confirmed the violation of massif and infiltration of water from the Padlá voda Waterfall into concentrated structure.

GEOMORFOLOGICKÉ ŠPECIFIKÁ RELIÉFU ZÁDIELSKEJ PLANINY V SLOVENSKOM KRASE

ALENA GESSERT¹ – TAMÁS TELBISZ²

- ¹ Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Jesenná 566/5, 040 01 Košice; alena.gessert@upjs.sk
- ² Eötvös Loránd University; Budapest, Egyetem tér 1-3, 1053; telbisztom@caesar.elte.hu

A. Gessert, T. Telbisz: Geomorphological particularities of the Zádiel Plateau relief in the Slovak Karst

Abstract: The Zádiel Plateau is one of the eastern plateaus of the Slovak Karst. As regards the geomorphological conditions and surface karst forms distribution, it is similar to the Jasov Plateau, also bordered by fluviokarstic gorges with the width of about 2 - 3 km, which influences intensity of karstification. The density of dolines is similar to the Jasov Plateau (6 dolines/km²), but the karren field located on the south slope of the plateau is the most developed in this part of the Slovak Karst. We mapped and morphometrically analyzed 57 dolines of the plateau. They are asymmetrical and elongated in the N-S, NE-SW and NW-SE direction. Furthermore, 3 uvalas with shallow dolines are situated in the north part. The line of the Rožňava Fault, leading from Miglinc Valley on the Jasov Plateau to the Čremošná Valley, is well recognizable in the relief by height difference between the northern and southern part, and vertical rock walls. We supposed that the karst water circulation along this fault led to different plateau karstification.

Key words: Slovak Karst, Zádiel Plateau, swath analyses, dolines morphometry, surface karst forms

ÚVOD

Aj napriek tomu, že Zádielska planina je predmetom výskumu karsológov aj speleológov, komplexná pozornosť sa jej dosiaľ nevenovala. V geografických či speleologických prácach sa spomína väčšinou iba ako podcelok geomorfologického celku Slovenský kras a informácie k nej podávajú prevažne súhrnné práce o Slovenskom krase napr. Mazúra (1971), Rozložníka a Karasovej (1994), Gaála (2008) a iných alebo práce speleologického charakteru. Geomorfologickú situáciu územia dokresľuje existujúca geomorfologická mapa Lišku (1994), ktorá v mierke 1 : 50 000 schematicky charakterizuje celé územie geomorfologického celku Slovenský kras. Dosiaľ najvyčerpávajúcejšie sa danej planine venoval Scholtz (1888), ktorý opísal povrch planín východnej časti Slovenského krasu, no najviac sa venoval práve Zádielskej planine, na ktorej vykonal aj speleologický prieskum vtedy známych lokalít. Z najnovších prác sa morfometrickej charakteristike planiny (a spolu s ňou aj planinám Jasovskej, Borčianskej a Hornému vrchu) venovali v dvoch prácach maďarskí kolegovia Telbisz a Ádám (2011) a Telbisz (2011) na základe topografických máp v mierke 1 : 10 000 a ich následnej digitalizácie. Modelovaniu reliéfu na základe laserového skenovania a digitálnej morfometrie sa na susednej Jasovskej planine venovali aj práce Barabas et al. (2010) a Gallay et al. (2013). Zjednodušenému geomorfologickému výskumu tejto planiny sa venovala v roku 2012 aj diplomantka Dr. Petrvalskej Kulčárová. Toto územie si však z hľadiska geomorfologického výskumu istotne zaslúži väčšiu pozornosť. Planina bola aj cieľom porovnávacej analýzy intenzity skrasovatenia (Hochmuth, 2004), intenzite skrasovatenia a hodnoteniu sa detailne na území susednej Jasovskej planiny venovala aj Petrvalská (2010).

Výskum tohto územia má významný potenciál aj na základe spomínanej absencie detailnejších výskumov, keďže doliny vo východnej časti Slovenského krasu disponujú skalnatým charakterom reliéfu a sú ťažšie prístupné. Aj preto neboli dosiaľ cieľom ucelenejšej štúdie (okrem speleologických inventarizácií ako Erdős, 1990; Kladiva, 1992; Lešinský, 2002).

Predkladaný príspevok podáva prehľad geomorfologických pomerov Zádielskej planiny a jej geomorfologické špecifiká, ktoré môžu poskytnúť základ pri ďalšom detailnejšom výskume daného územia či podklady na porovnávanie planín Slovenského krasu medzi sebou. Predložená štúdia je výsledkom podrobného geomorfologického terénneho mapovania v mierke 1 : 10 000 so zameraním na povrchové krasové formy.

CHARAKTERISTIKA SKÚMANÉHO ÚZEMIA

Planina svojou pozíciou vo východnej časti Slovenského krasu (obr. 1) a veľmi výrazným ohraničením od okolitých planín (Hájskou a Zádielskom dolinou) je výraznou jednotkou. Celé územie spolu so svahmi zaberá len čosi viac ako 16 km², čím ho rozlohou zaraďujeme medzi menšie planiny Slovenského krasu. V severnej časti dosahuje šírku viac ako 4 km, v južných iba čosi vyše 2 km. Táto malá šírka územia, a tým aj charakter odvodňovania jeho masívu (podobné južnej časti Jasovskej planiny) by mohli mať vplyv na dokázateľne menší výskyt krasových foriem na povrchu planiny. Južná hranica planiny je vedená v zmysle platného geomorfologického členenia (Mazúr, Lukniš, 1986) sedlom medzi samotnou planinou a kužeľom Turnianskeho hradného vrchu. Krasovými horninami tvorený severný svah takmer absentuje, je tvorený nekrasovými horninami



Obr. 1. Lokalizácia Zádielskej planiny. 1 – Jasovská planina, 2 – Horný vrch, 3 – Dolný vrch, 4 – Silická planina, 5 – Plešivecká planina, 6 – Koniarska planina Fig. 1. Location of the Zádiel Plateau. 1 – Jasov Plateau, 2 – Horný vrch Plateau, 3 – Dolný vrch Plateau, 4 – Silica Plateau, 5 – Plešivec Plateau, 6 – Koniar Plateau





v podobe pieskovcov a bridlíc štítnického súvrstvia mladšieho permu (Mello et al., 1997). Prevažná časť územia má vďaka výskytu wettersteinských vápencov vhodné podmienky na krasovatenie (obr. 2).

Plošinaté územie planiny sa rozkladá v nadmorských výškach od 500 m na juhu až po najvyšší vrch Grečov (891 m). Po rozdelení územia do 100-metrových výškových intervalov viac ako tretina územia leží v nadmorskej výške 700 – 800 m, čím ju možno zaradiť medzi najvyššie položené planiny Slovenského krasu (obr. 3). Úklon planiny je zhodný s generálnym úklonom Slovenského krasu od severu k juhu, konkrétne plošne sú najviac zastúpené územia uklonené k J, V, JV a JZ (obr. 4). Viac ako 50 % územia má sklon do 10°. Územia s najvyšším sklonom predstavujú svahy planiny, východné so sklonom viac ako 45°, a svahy Zádielskej tiesňavy majú na viacerých lokalitách charakter veľmi strmých až strmých stien (obr. 4). Vyšším sklonom územia sa vyznačuje aj spomínaná lokalita pozdĺž línie rožňavského zlomu, ktorá je charakteristická skalnatým reliéfom. Bližšie situáciu z hľadiska sklonu a orientácie voči svetovým stranám zobrazujú nižšie uvedené mapy 4 až 6.



Obr. 3,4,5,6. Hypsometria, sklon, orientácia reliéfu a smer odtoku Zádielskej planiny Fig. 3,4,5,6. Hypsometry, inclination, relief aspect, and flow direction of the Zádiel Plateau

Územie je prevažne tvorené triasovými wettersteinskými vápencami, iba na južných svahoch vystupujú steinalmské vápence a verfénske súvrstvie v podobe sinských vrstiev, ktoré sú tvorené prevažne bridlicami a slienitými vápencami (Mello et al., 1997).

Tektonicky je územie pomerne celistvé. Výrazná je iba línia rožňavského zlomu prechádzajúca stredom planiny v smere od východu a smerujúca na západ k súčasnej doline rieky Čremošná. Práve táto línia oddeľuje topograficky vyššie severne ležiace územia od nižších južných. Severné svahy planiny sú porušené zlomami v SZ-JV, resp. S-J smere, charakterom a smerom sú podobné tým na severnom svahu Jasovskej planiny. Východné aj západné ohraničenie planiny je vedené výraznými zlomami SJ smeru, pozdĺž ktorých Hájsky potok a Chotárny potok erodoval hlboké doliny s tiesňavovými úsekmi. Možno konštatovať, že z hľadiska reliéfu a jeho charakteru je planina príbuzná planine Jasovskej, čiastočne aj východným častiam planiny Horný vrch. V nasledujúcich riadkoch opisujeme najvýraznejšie typy geomorfologických foriem, ich polohu je možné bližšie lokalizovať na vloženej geomorfologickej mape.

METODIKA A PRIEBEH VÝSKUMU

Tento príspevok aj celý geomorfologický výskum Zádielskej planiny je postavený na základnom geomorfologickom mapovaní (výsledkom je geomorfologická mapa). Geomorfologická analýza sa vykonala kombináciou viacerých metód – analýzou topografických máp 1 : 10 000, digitálneho modelu reliéfu (vytvorený z vrstevníc v intervale 5 m) a lidarových snímok, ktorými disponuje Ústav geografie PF UPJŠ Košice. Ako základ na tieto analýzy však poslúžilo samotné terénne geomorfologické mapovanie do mapy mierky 1 : 10 000, počas ktorého boli formy nielen zamerané, ale aj morfometricky spracované (ide hlavne o krasové depresie). Pre tento účel sme používali turistické GPS Garmin HC a laserový diaľkomer so sklonomerom Disto X.

Všetky získané terénne informácie sme následne spracovali v prostredí ArcGIS 10.1 a vytvorili vyššie uvedené mapy (sklon, orientácia, topografia, smer odtoku). Na štatistické vyhodnotenie reliéfu planiny sme zvolili pásový profil (swath profil), ktorý vhodne charakterizuje vlastnosti reliéfu. Bližšie je táto metodika opísaná v práci Telbisz et al. (2013). Geomorfologická mapa, ktorú považujeme za kompaktný výsledok tohto výskumu, vznikla v programe Corel Draw X6.

POVRCHOVÉ KRASOVÉ FORMY

Zádielska planina sa vyznačuje planinovým typom krasu s dobre vyvinutým krasovým fenoménom. Vyskytujú sa tu typické krasové formy, ktoré svojím charakterom, dimenziou a morfometriou pripomínajú skôr formy na Jasovskej planine, a tým sa už pri počiatočnom prieskume územia značne odlišujú od foriem na západnejšie ležiacich planinách Slovenského krasu (podobnosť opisovaná Petrvalskou, 2014).

Špecifické typy **škráp** sa tu nevyskytujú. Môžeme tu pozorovať typické puklinové, studňovité, rúrovité, dierové, meandrovité, žliabkovité a ojedinele aj iné typy škráp. Veľkosťou ich zaraďujeme ku škrapám menších rozmerov. Škrapových polí je tu niekoľko, v južnej, centrálnej a severnej časti planiny, zaberajú spolu rozlohu okolo 0,83 km². Najvýznamnejšie škrapové pole (obr. 7, 8) sa rozprestiera na južnom svahu Zádielskej planiny (smerom do Turnianskej kotliny a k Turnianskemu hradnému vrchu) pozdĺž tzv. hradnej cesty. Prevažujú tu dierové a puklinové škrapy, často prerastené



Obr. 7, 8. Významné škrapové pole na južnom svahu (vľavo) a centrálnej časti planiny (vpravo). Foto: A. Gessert

Fig. 7, 8. Significant karren field on the south slope (left) and the central part of the plateau (right). Photo: A. Gessert

vegetáciou. Puklinové škrapy majú väčšinou smer SZ-JV, v menšej miere S-J. Výrazné je škrapové pole v strednej časti planiny v oblasti s lokálnym názvom Dolné lúky s rozlohou cca 30 ha. Tieto územia boli dlhodobo najintenzívnejšie využívané človekom už od 14. storočia (súvisí s Turnianskym hradom), čo malo výrazný vplyv na intenzitu ich odkrytia spod sedimentov a ich ďalší vývoj. Toto škrapové pole má zároveň kontakt s v teréne výraznou tektonickou líniou rožňavského zlomu, ktorý tu pokračuje z doliny Miglinc, Jasovskej planiny, Varútu (Varátu) v Hájskej doline a ďalej pokračuje cez Zádielsku tiesňavu do Čremošnej doliny.

V tomto príspevku prezentujeme aj inventarizáciu závrtov v území. Vo všeobecných prácach týkajúcich sa Slovenského krasu sa Zádielskej planine venuje pozornosť iba okrajovo. Aj napriek tomu boli vo viacerých príspevkoch a mapách uvedené počty závrtov a ich hustota v území. Telbisz a Ádám (2011) na základe digitálneho modelu reliéfu identifikovali spolu 14 závrtov, na geomorfologickej mape Lišku (1994) je ich zaznamenaných 31. Pri našom terénnom mapovaní bolo spolu identifikovaných 57 závrtov (obr. 2), čo predstavuje hustotu 6 závrtov na km². Toto číslo je blízke hustote na Jasovskej planine a poukazuje, ako sme už spomínali, na podobný charakter planín vo východnej časti Slovenského krasu. Na porovnanie – hustota závrtov v strednej, resp. západnej časti Slovenského krasu dosahuje 40 – 50 na km² (Hochmuth, 2004). Väčšina závrtov je vytvorených v dobre krasovatejúcich wettersteinských vápencoch, iba v najsevernejších častiach v steinalmských vápencoch. Vznikli koróznou činnosťou vody, a teda v zmysle členení závrtov ich všetky zaraďujeme ku koróznym závrtom (angl. solution dolines). Na základe tvaru možno konštatovať, že väčšina z nich má tanierový tvar (angl. plate shaped), ktorý je charakteristický pozvoľne klesajúcimi svahmi a rovným zasedimentovaným dnom. Pomer vonkajšieho obvodu závrtu a vnútorného obvodu dna je 2 : 1. Iba v malom počte závrtov bol identifikovaný misovitý tvar (angl. bowl shaped). Vzhľadom na pravidelnosť pôdorysu závrtov môžeme skonštatovať, že 2/3 závrtov sú skôr asymetrického pôdorysu s prevládajúcim smerom najdlhšej osi na S-J, SV-JZ, SZ-JV. Uvedený fakt súvisí, ako sme už konštatovali vyššie, so známymi aj predpokladanými zlomami a nami vykonanými mikrotektonickými pozorovaniami v strednej a severnej časti územia planiny. Veľkosťou ich zaraďujeme medzi stredne veľké závrty (v podmienkach Slovenského krasu), s priemerom od 36 do 178 m, hĺbkou od 5 do 23 m, v prípade silne zasedimentovaných depresií aj menej. Vek závrtov dosiaľ nie je vyriešený, uvažuje sa o ich

vrchnokriedovom veku (napr. Marschalko a Mello, 1993), o vzniku po exhumácii krasového reliéfu po období panónu (Jakál, 2001), no aj o kvartérnom až recentnom pôvode (Šmída, 2009). Závrty Zádielskej planiny sa javia ako inaktívne, iba v jednom prípade boli v centrálnej časti planiny na dne závrtu zaznamenané 2 hltače hlboké asi 1 meter (obr. 9) s už menej viditeľnými prívodnými ryhami. V recente sa pravdepodobne d'alej nevyvíjajú, aj počas viacerých mapovaní (za rôznych



Obr. 9. Hltače na dne závrtu v centrálnej časti planiny. Foto: A. Gessert

Fig. 9. Ponor on the doline bottom in the central part of the plateau. Photo: A. Gessert

poveternostných podmienok) sme ich aktivitu nezaznamenali. V tabuľke 1 sú uvedené základné vlastnosti závrtov v porovnaní so západnejšie ležiacimi planinami Slovenského krasu. Za východnú časť považujeme planiny Zádielsku a Jasovskú. Pravdepodobne po analýze súčasne prebiehajúceho výskumu bude možné k charakteru východne ležiacich planín priradiť aj Borčiansku planinu. Celková plocha, ktorú zaberajú závrty, je cca 0,31 km², čo z celkovej rozlohy planiny predstavuje iba 2 %.

Tab. 1. Porovnanie dimenzií závrtov medzi západnou a východnou časťou Slovenského krasu
Tab. 1. Comparison of dolines dimensions between the western and eastern parts of the Slovak
Karst

	Západná časť	Východná časť
hĺbka	do 50 m	do 25 m
priemer závrtu	do 300 – 400 m	do 150 – 200 m
pôdorys	kruh, elipsa	kruh, elipsa, nepravidelný
dno	lievikovité, misovité	misovité, ploché zasedimentované
hustota závrtov	40 – 55 na km ²	6 – 9 na km ²

Za **uvaly** tu možno považovať 3 uzavreté depresie (obr. 10), na dne ktorých sa nachádzajú menej výrazné závrty plytkého charakteru s menej výraznými priečkami. Tieto depresie sú lokalizované v severnej časti planiny a sú pretiahnuté v smere SZ-JV, pričom sa tento smer zhoduje so sledovanými tektonickými líniami v severnej časti planiny. Tieto uvaly sú pomerne nevýrazné, veľkých rozmerov, s dĺžkou viac ako 500 m, a nachádzajú sa v oblastiach pod lokálnym názvom vyskytujúcim sa na topografických mapách (južne od Kaplnky, Želiarske a Bábošov kút). Na ich dne lokalizované závrty sú plytké, s málo výraznými priečkami medzi nimi, čo je spôsobené buď ich postupnou eróziou



Obr. 10. Uvala v severnej časti Zádielskej planiny. Foto: A. Gessert Fig. 10. Uvala in the northern part of the Zádiel Plateau. Photo: A. Gessert

alebo vyplnením závrtov sedimentmi.

Práve Hájska aj Zádielska dolina (dolina Chotárneho potoka) sú významnými lokalitami travertínu či penovca v Slovenskom krase. Travertíny Hájskej doliny sa detailnejšie opisujú v publikácii Petrvalskej (2014). Tu sa vyskytujúce dolinné travertíny sú typické niekoľkými stupňami, na ktorých boli založené hrany Hájskych vodopádov. Ich tvar a výš-

ka je však ovplyvnená antropogénnou činnosťou človeka a ťažbou travertínu. Inou významnou lokalitou je svah pod Travertínovou jaskyňou; tá je typická svojím periodickým výverom. Menej známymi a opísanými lokalitami sú výskyty penovcov v hornej časti doliny Chotárneho potoka, kde asi najmohutnejšie akumulácie vytvára vyvieračka Vizavát.

SVAHOVÉ A GRAVITAČNÉ FORMY

Svahy rôzneho pôvodu a vývoja sú ohraničujúcim prvkom krasových planín, pričom výrazné formy sa vyskytujú aj na ich úpätiach v podobe sutín, resp. gravitačných kužeľov. Väčšina svahov po obvode Zádielskej planiny je erózno-denudačného pôvodu. Práve západné a východné svahy vznikli podtínaním a eróznou činnosťou vodných tokov. Výsledkom tento činnosti sú svahy strmé viac ako 45° a vďaka ďalším sekundárnym geomorfologickým procesom (gravitačným či kryogénnym) vznikli úseky tiesňavového typu a aj samostatné skalné útvary. Strmé skalné úseky sú typické pre Zádielsku tiesňavu a strednú časť Hájskej doliny. Po obvode úpätí týchto svahov sa vyskytujú mohutné deluviálne kužele tvorené nevytriedeným materiálom. Najvýraznejšie kužele nachádzame práve v južnej časti Zádielskej tiesňavy a v centrálnej časti Hájskej doliny. Za tektonicky postihnuté považujeme v tomto území južné a severné svahy. Južný svah je výrazne strmý a zostupuje do sedla pri Turnianskom hradnom vrchu, ktorý sa geomorfologicky už nepovažuje za súčasť Slovenského krasu. Severné svahy sú nekrasového charakteru a modelované fluviálnou činnosťou, výrazná je však línia V-Z smeru, ktorej priebeh kopíruje severná hrana územia.

INÉ VÝRAZNÉ GEOMORFOLOGICKÉ FORMY

Za formy typické pre oblasť Slovenského krasu možno považovať tzv. vrchy kužeľového tvaru, ktoré dosiaľ v literatúre boli mnohokrát spomínané. Podľa viacerých autorov tieto vrcholy kužeľovitého tvaru (v skorších prácach opisované ako kužeľový kras) vznikali za vhodných podmienok na krasovatenie vo vrchnej kriede (Liška, 1994; Činčura, 2002) alebo miocéne (Gaál, 2008). Práve Gaál (2008) uvažuje

vo svojej práci o príčinách absencie a menej výrazných vrcholcoch vo východnej časti Slovenského krasu, teda na Zádielskej a Jasovskej planine. Prisudzuje to nerovnakému stupňu erózneho zarovnávania v treťohorách a menšej intenzite erózie pretekajúcich tokov v tejto časti. O "kužeľových vrchoch" sa dozvedáme aj z publikácií Jakála (1975, 1983), ktorý ich identifikoval na Plešiveckej planine v podobe elevácií 50 – 100 m nad zarovnaným reliéfom. Keďže pozoroval polohu na severnom okraji Slovenského krasu (Hornom vrchu, Plešiveckej, Borčianskej, Zádielskej planine), uvažuje o súvislosti tejto polohy so zarovnávaním reliéfu a s ústupom svahov zo severu. Pôvod a vznik týchto vrcholov je stále v rovine polemík a nebol dosiaľ uspokojivo a jednoznačne vyriešený. Takéto formy sa však vyskytujú aj na Zádielskej planine, a to v severnej časti a na severnom okraji planiny. Najvýraznejší z nich je zároveň najvyšší vrch planiny Grečov (891 m) a Bujačí vrch (835 m) (obr. 11). Podobne aj na východne ležiacej Jasovskej planine sa vrcholy podobnej morfológie nachádzajú na jej severnom okraji. Na uvedenom území sa Petrvalská v práci z roku 2014 prikláňa k eróznemu pôvodu, vznikli teda zvýšenou



Obr. 11. Prevýšený výškový profil v smere SZ-JV vrcholmi Grečov a Bujačí vrch Fig. 11. Exaggerated vertical profile in the NW-SE direction through Grečov and Bujačí vrch hills

eróziou na tektonických líniách oddeľujúcich tieto vrcholy v recente pozdĺž výrazných sediel.

V reliéfe je veľmi významná a dobre viditeľná **tektonická línia rožňavského zlomu**, ktorý v dĺžke 2,3 km pretína Zádielsku planinu v smere V-Z. Povrchový prejav tejto línie predstavuje depresiu, ktorá na planinu stúpa z Hájskej doliny pozdĺž tzv. doliny Varút, prechádza planinou v podobe lineárnej depresie obmedzenej strmými skalnými stenami a vstupuje do Zádielskej doliny naproti Baksovej. Varút je najvýraznejšou súčasťou tejto línie, dolina je široká až 200 – 250 m a hlboká do 100 metrov. Svahy sú skalnaté, s vysokou sklonitosťou. Dnom doliny v minulosti viedla jedna z hlavných dopravných tepien v Slovenskom krase, a preto na dne badať premodelovanie človekom v podobe spevnenia a úpravy cesty.

Okrem vyššie menovaných krasových foriem sú tu ľahko identifikovateľné aj mnohopočetné **antropogénne formy**, ktoré súvisia s činnosťou človeka na planine. Jamy, ktoré svojím tvarom a dimenziami pripomínajú mladé závrty, sa v literatúre zvyknú označovať ako tzv. vápenné jamy. Vznikli po odťažení škráp alebo priamom pálení kvalitného vápenca s cieľom získať vápno pre stavbu domov. Rovnaké formy sme vo zvýšenej miere pozorovali a zmapovali aj na východne ležiacej Jasovskej planine a publikovali v roku 2010. Najviac týchto foriem sme zaznamenali medzi oblasťou Okrúhleho lazu a južnými svahmi planiny. Najvýraznejšou antropogénnou formou je historický val vedúci smerom V-Z, súvisiaci s Turnianskym hradom. Dosahuje výšku 1 - 1,5 m a aj napriek svojmu veku je v teréne dobre viditeľný.

GEOMORFOLOGICKÉ ŠPECIFIKÁ ZÁDIELSKEJ PLANINY

Na základe geomorfologických a morfometrických analýz reliéfu v prostredí GIS a na základe terénneho mapovania sme dospeli k viacerým záverom. Na získanie nasledujúcich výsledkov samého zarovnaného povrchu planiny boli z analýz vyňaté obvodové svahy planiny, za ktoré sa považovali plochy po obvode planiny strmšie ako 12°.

Sama planina netvorí geomorfologicky homogénny celok. Na základe vyššie opísaných vlastností sme planinu rozdelili na tri logické časti (regióny), ktoré sa vyznačujú podobnými znakmi na základe geologického podkladu, nadmorskej výšky, orientácie a sklonu reliéfu a charakteru povrchových krasových foriem. Toto členenie používame aj vo všetkých nasledujúcich analýzach reliéfu. Ide o nasledujúce regióny:

- Severná časť planiny s plochou 5,22 km², rozpätím nadmorských výšok 680 až 891 m (s priemernou hodnotou 788 m) a sklonom do max. 32,8° (priemerne 7°).
- 2. Centrálna (stupňovitá časť planiny) s plochou 1,28 km², rozpätím nadmorských výšok 564 až 781 m a sklonom do max. 36,3° (priemerne 9,7°). Strednou časťou tohto geomorfologického regiónu prechádza spomínaný rožňavský zlom.



Obr. 12. Výškový histogram geomorfologických regiónov Zádielskej planiny

Fig. 12. Elevation histogram of the geomorphological regions of the Zádiel Plateau

3. Južná časť planiny – s plochou 1,74 km², rozpätím nadmorských výšok 535 až 600 m (s priemernou hodnotou 569 m) a sklonom do max. 26° (priemerne 5,7°).

Na základe uvedeného členenia sme vykonali aj analýzu kategórií nadmorských výšok Zádielskej planiny, ktorej výsledky sú prezentované v histograme na obrázku 12. Vzhľadom na už spomínaný generálny úklon od S k J (resp. JV), najvyššie položené územia sa nachádzajú v severnom geomorfologickom regióne s plošne najrozsiahlejšími areálmi v nadmorskej výške 760 – 790 m. Naproti tomu stupňovitá centrálna časť planiny sa vyznačuje rovnomerným klesaním územia. Južná časť je podľa analýz najlepšie zarovnaná a nadmorská výška týchto rozsiahlych plôch sa nachádza v rozpätí 560 - 580 m.

Pre planinu bol vytvorený topografický pásový profil (angl. swath



Obr. 13. Schematický pásový profil územím Zádielskej planiny (Z_Mean – stredná hodnota, Z_Min – minimálna hodnota, Z_Q1 – dolný kvartil, Z_Med – medián, Z_Q3 – horný kvartil, Z_Max – maximálna hodnota)

Fig. 13. Schematic swath profile of the Zádiel Plateau area ($Z_Mean - mean, Z_Min - minimum, Z_Q1 - first quartile, Z_Med - median, Z_Q3 - third quartile, Z_Max - maximum)$

profile) (obr. 13), ktorý slúži na štatistické vyhodnotenie špecifických vlastností reliéfu, ktoré by neboli odhalené klasickým topografickým profilom. Hodnoty sú na grafe vizualizované ako funkcia vzdialenosti bodov od profilovej (SWATH) čiary. Profil nezahŕňa svahy planiny. Uhol medzi profilovou čiarou a rovinou je 162°, čo predstavuje SSZ--JJV. Metodika je bližšie opísaná v príspevku Telbisza et al. (2013). SWATH analýza zreteľne demonštruje rozdiely medzi vyššie vyčlenenými regiónmi Zádielskej planiny. Severná časť má mierny profil s homogénnym sklonom v hodnote asi 2°. Vyhraničenie centrálnej časti planiny je zjavné, prevládajúci sklon tu dosahuje 7,5°, pričom južná časť je takmer horizontálna. Rozdiel teda nie je len v nadmorskej výške daných regiónov, ale aj v ich prevládajúcej sklonitosti. Oba sledované parametre naznačujú, že tektonika spôsobila rozdiely v ukláňaní jednotlivých blokov. Rožňavský zlom je v teréne jasne viditeľný. Nehovoríme iba o vzniku a existencii zlomu s výrazným prejavom v reliéfe, ale aj o následnom oslabení horninového podkladu pozdĺž neho a ich zrýchlenej erózii, čím sa na tejto tektonickej línii vytvára výrazná zníženina pretiahnutého tvaru. Rozdiely v nadmorskej výške rovnako demonštruje histogram, ktorý znázorňuje frekvenciu nadmorských výšok v každom regióne. Rozdiel vo frekvencii maximálnych výšok severnej a južnej časti planiny činí 210 m.

V porovnaní s inými planinami Slovenského krasu boli aj na Plešiveckej planine v reliéfe analyzované 3 stupne (podobné ako v centrálnej časti Zádielskej planiny), ktorých morfometrická a morfologická analýza je obsiahnutá v príspevku Telbisza et al. (2009).

Bližšie sme sa venovali aj analýze najcharakteristickejších povrchových krasových foriem – závrtov. V počte, hustote, ploche, sklone a orientácii hlavných osí závrtov sú tiež viditeľné rozdiely medzi jednotlivými geomorfologickými rajónmi, ktorých prehľad uvádzame v nasledujúcej tabuľke. Je logické, že v centrálnej časti (2) je najmenší absolútny počet závrtov, a tým aj hustota a plocha závrtov. Táto oblasť je špecifická svojím sklonom a aj malou plochou, závrty sa najlepšie vyvíjajú na územiach s minimálnym

sklonom (ako je to v severnej a južnej časti územia). Zaujímavosťou je, že hustota závrtov je oveľa vyššia v južnom, plochou menšom a zároveň šírkovo užšom regióne ako v severnom regióne. Vzhľadom na parametre však tieto závrty vyzerajú mladšie, dôvody tohto rozdielu sa však na tomto mieste vysvetliť nedajú. Obe územia sú budované rovnakými wettersteinskými vápencami, nie sú výrazné rozdiely v hustote tektonických línií v oblasti. Rozdiel je iba v sklonitosti regiónov (južný má menší sklon), ale to nepovažujeme za základný dôvod rozdielnej hustoty závrtov.

Región	Plocha	Počet	Hustota závrtov	Ploo	cha závrtov	r (m²)
	(km²)	závrtov	na km ²	min.	max.	stredná
Severný (1)	5,22	29	5,6	956	13878	6935
Centrálny (2)	1,28	5	3,9	1909	8825	3789
Južný (3)	1,74	23	13,2	589	20469	4617

Tab. 2. Prehľad regiónov a parametrov závrtov Tab. 2. Overview of the regions and doline parameters

Orientácia svahov, na ktorých sa vyskytujú závrty, je charakteristická a očakávaná. V severnom regióne prevláda orientácia od východu k juhu, v centrálnom regióne JV až JJV smer. Trošku prekvapivá je situácia v južnom regióne, kde prevláda V až VSV smer a mierne sa ukláňa k depresii rožňavského zlomu. Orientácia hlavných osí závrtov je v jednotlivých regiónoch viac-menej náhodná, neprejavuje sa tu preferencia smeru, iba v južnom regióne možno pozorovať prevládajúci smer osí závrtov k SSZ-JJV. Pri analýzach smeru susedných závrtov sa takisto neprejavuje závislosť, avšak S-J smer je mierne preferovaný a východný smer je výraznejší v južnom regióne. Súvisí to primárne s generálnym úklonom planiny a polohou závrtov v suchých dolinách, ktoré sledujú rovnaký smer. Graficky sú tieto skutočnosti zobrazené v diagramoch. Poloha týchto troch regiónov je uvedená na obrázku 2.



Obr. 14. Orientácia najdlhšej osi závrtu voči svetovým stranám Fig. 14. Orientatiton of the longest axis of dolines

ZÁVER

Zádielsku planinu na základe vykonaného geomorfologického výskumu a morfometrickej analýzy reliéfu je možné prirovnať k Jasovskej planine, na základe výsledkov mapovania k planinám tzv. východnej časti Slovenského krasu, ktoré majú podobný charakter. Charakter povrchového krasu územia, ako napr. hustota a typ krasových depresií, je podobný Jasovskej planine, dalo by sa teda uvažovať o spoločnom geomorfologickom vývoji týchto planín (podobne ako dolín, ktoré ich oddeľujú od ďalších planín). Planina je v exponovaných častiach pokrytá rozsiahlymi škrapovými poliami, najvýznamnejšie z nich je na južnom svahu – hrebeni pokračujúcom k Turnianskemu hradnému vrchu. Na povrchu planiny bolo zmapovaných a zinventarizovaných spolu 57 závrtov, čo vzhľadom na plochu územia predstavuje hustotu cca 6 závrtov na km², čo je hustota podobná Jasovskej planine (Petrvalská, 2014). Sú väčšinou asymetrické s najdlhšími líniami v smere S-J, SV-JZ, SZ-JV, pričom tieto osi sú zhodné s tektonickými líniami sledovaného územia. Identifikované tu boli aj krasové geomorfologické makroformy v podobe troch uval v severnej časti planiny. Patria však medzi menej výrazné formy vzhľadom na svoju rozľahlosť a dĺžku až do 500 m. Územie sme na základe spoločných znakov rozdelili do troch geomorfologických regiónov, ktoré sú navzájom odlišné nadmorskými výškami, sklonom, orientáciou reliéfu, ale aj hustotou krasových foriem. Ako najvýznamnejšia forma sa javí rožňavská tektonická línia s výrazným prejavom na povrchu reliéfu. Úklon severného aj južného regiónu smerom k tejto línii naznačuje hlbšiu cirkuláciu vody v tomto masíve práve pozdĺž nej. Povrchový odtok (ak existuje) je tiež orientovaný k okraju planiny do občas aktívnych svahových dolín. Priebeh tohto zlomu rozčlenil územie na vizuálne odlišné celky.

Vyššie položené severné časti Zádielskej planiny sú totožné so severnými územiami Jasovskej planiny či Borčianskej planiny, možno ich podľa nášho názoru považovať za zvyšky vrcholového systému povrchov, južnejšie ležiace územia sú typickou stredohorskou rovňou s výskytom dobre vyvinutých krasových foriem.

Predkladaný príspevok prezentuje výsledky rozsiahleho terénneho geomorfologického mapovania, ktorého výsledky sme spracovali pomocou GIS nástrojov. Možno ho využiť na ďalšie detailné morfometrické či morfologické spracovanie foriem planiny, ale zároveň predstavuje prvú komplexnú detailnú geomorfologickú mapu územia.

Poďakovanie: Tento príspevok vznikol za podpory výskumných projektov APVV SK--CN-2015-0030 "Comparative study on the karst carbon cycle and carbon sink coupling with the ecological rehabilitation under China subtropic and Slovakia temperate zones".

LITERATÚRA

- Barabas, D., Gallay, M., Petrvalská, A. 2010. Digitálna morfometria závrtov v lokalite Palanta (Jasovská planina). Slovenský kras 48, 2, 253–261.
- Činčura, J. 2002. Krasový reliéf pripovrchových príkrovov centrálnych Západných Karpát: vývoj a paleotektonické línie. Slovenský kras, 40, 7–17.
- Erdős, M. 1990. Súpis krasových javov v CHKO Slovenský kras. Manuscript. MVOP Liptovský Mikuláš. Košice, 68 s.
- Gaál, Ľ. 2008. Geodynamika a vývoj jaskýň Slovenského krasu. Speleologia Slovaca, 1, ŠOP SR, Správa slovenských jaskýň, Liptovský Mikuláš, 166 s.
- Gallay, M., Kaňuk, J., Petrvalská, A., Hochmuth, Z. 2013. Využitie údajov leteckého laserového skenovania vo výskume krasovej krajiny na príklade východnej časti Slovenského krasu. Slovenský kras, 51, 1, 99–108.

- Hochmuth, Z. 2004. Rozdiely v intenzite povrchového skrasovatenia na jednotlivých planinách Slovenského krasu. Geomorphologia Slovaca, 4, 2, 30–35.
- Jakál, J. 1975. Kras Silickej planiny. Osveta, Martin, 152 s.
- Jakál, J. 1983. Krasový reliéf a jeho význam v geomorfologickom obraze Západných Karpát. Geografický časopis, 35, 2, 160–183.
- Jakál, J. 2001. Porovnávacia analýza krasových planín Západných Karpát. Geografický časopis, 53, 1, 3–20.
- Kladiva, E. 1992. ŠPR Zádielska tiesňava. Speleologický inventarizačný výskum. SSS, OS Košice-Jasov, 62 s.
- Kulčárová, K. 2012. Krasové pomery Zádielskej planiny. Diplomová práca, Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta UPJŠ, 87 s.
- Lešinský, G. 2002. Inventarizačný výskum krasu Zádielskej planiny v Slovenskom krase. Záverečná správa. SMOPaJ, Liptovský Mikuláš, 73 s.
- Liška, M. 1994. Povrch. In Rozložník, M., Karasová, E. (Eds.): Chránená krajinná oblasť biosférická rezervácia Slovenský kras. Slovenská agentúra životného prostredia, pobočka Košice, Správa CHKO biosférickej rezervácie Slovenský kras v Brzotíne, 9–11.
- Marchalko, R., Mello, J. 1993. Turbidites as filings of cavities in Triassic limestones of the Silica nappe (Western Carpathians, Plešivec Karst Plateau). Geologica Carpatica, 44, 1, 35–42.
- Mazúr, E., Lukniš, M. 1986. Geomorfologické členenie SSR a ČSSR (mapa). Slovenská kartografia, Bratislava.
- Mazúr, E., Tarábek, K., Bučko, Š., Krippel, E., Repka, P., Jakál, J., Kollár, A. 1971. Slovenský kras. Regionálna fyzicko-geografická analýza. Geografické práce, 2. SPN, Bratislava, 155 s.
- Mello, J., Elečko, M., Pristaš, J., Reichwalder, P., Snopko, L., Vass, D., Vozárová, A., Gaál, Ľ., Hanzel, V., Hók, J., Kováč, P., Slavkay, M., Steiner, A. 1997. Vysvetlivky ku geologickej mape Slovenského krasu 1 : 50 000. Bratislava (Vydavateľstvo Dionýza Štúra), 255 s.
- Petrvalská, A. 2010. Morfometrická analýza závrtov na príklade Jasovskej planiny (Slovenský kras). Geomorphologia Slovaca et Bohemica, 1, 33–44.
- Petrvalská, A. 2014. Reliéf Jasovskej planiny v Slovenskom krase. UPJŠ Košice, 112 s.
- Rozložník, V., Karasová, E. (Eds). 1994. Chránená krajinná oblasť biosférická rezervácia Slovenský kras. Slovenská agentúra životného prostredia, pobočka Košice, Správa CHKO – biosférickej rezervácie Slovenský kras v Brzotíne, 480 s.
- Scholtz, A. 1888. A tornai plato es kornyeke, Pest, 1-34.
- Telbisz, T. 2011. Large-scale relief of the Slovak Karst and Aggtelek Karst (Gömör Torna/Gemer-Turňa Karst) – a DEM-based study. Hungarian Geographical Bulletin (Földrajzi Értesítő), 60, 4, 379–396.
- Telbisz, T., Ádám, E. 2011. A Felső-hegy, a Mészkő-tető, a Barkai- és a Szádelőifennsík Domborzati és töbör-morfometriai Elemzése térinformatikai eszközökkel. Karsztfejlődés, XVI, 87–102.
- Telbisz, T., Kovács, G., Székely, B., Szabó, J. 2013. Topographic swath profile analysis: a generalization and sensitivity evaluation of a digital terrain analysis tool. Zeitschrift für Geomorphologie, 57, 4, 488–513.
- Telbisz, T., Móga, J., Kósik, SZ. 2009. A Pelsőci-fennsík digitális domborzatelemzése és töbörmorfometriai jellemzése (Digital terrain analysis and doline morphometry of Plešivská planina). Karsztfejlődés, XIV, 121–138.

CHEMICKÉ ZLOŽENIE A KVALITA VÔD JASKYNE ZÁPOĽNÁ (KOZIE CHRBTY)

61 - 80

DAGMAR HAVIAROVÁ

Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš; dagmar.haviarova@ssj.sk

D. Haviarová: Chemical composition and water quality in the Zápoľná Cave (Kozie chrbty Mts.)

Abstract: The Zápoľná Cave is located in the south-western part of the Kozie chrbty Mts., on the right side of the Čierny Váh River Valley. The current known length of the cave is 1,870 m. Some parts of the cave are located lower than the current riverbed of the Čierny Váh River, causing their occasional flooding. The cave has several siphons as well as parts with seepage, however but underground stream is not present. This paper provides results of hydrochemical research (12/2014 – 6/2015) in the cave that was focused on the seepage and siphons' water. For comparison, the sampling from the cave was expanded to Čierny Váh River in front of the cave. The cave water represents the types with carbonate mineralisation: Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃. The chemical composition of cave water is relatively stable. The total dissolved solids ranged from 280 to 403 mg·l⁻¹ with higher values in seepage water. Calcium and carbonates are dominant ions in the water. Siphon waters are in equilibrium with calcite and dolomite. Seepage water has different forms of saturation for calcite and dolomite depending on place and time. Water quality is good with no indication of significant contamination.

Key words: Zápoľná Cave, Čierny Váh River, siphon, seepage water, water quality, water chemistry

ÚVOD

Národná prírodná pamiatka jaskyňa Zápoľná predstavuje 1870 m dlhú, 59 m hlbokú jaskyňu nachádzajúcu sa v JZ časti Kozích chrbtov, na pravom brehu Čierneho Váhu. Podľa administratívneho členenia je súčasťou Žilinského kraja, okresu Liptovský Mikuláš, katastra obce Východná. Vchod do jaskyne je situovaný približne 50 m nad dnom doliny Čierneho Váhu, vo výške 755 m n. m. (obr. 1, 2 a 3).

Jaskyňu Zápoľná podľa Holúbeka (1998) objavili pri stavbe vodnej nádrže na Čiernom Váhu v rokoch 1939 – 1941, keď sa jej vchod odkryl po narazení kaverny počas vrtných prác. Prvý stručný opis vchodu a priestorov Zápoľnej "priepasti" podal Droppa (1962a,b), podľa ktorého sa vývoj priepasti udial súčasne s prehlbovaním doliny Čierneho Váhu. Speleologický prieskum jaskyne je spojený hlavne s obdobím od druhej polovice 90. rokov minulého storočia (Holúbek, 1998; Holúbek a Kráľ, 2001), keď boli v jaskyni postupne objavované nové priestory. Jaskyňa je považovaná za typický príklad koróznej jaskyne vytvorenej v hlbšej freatickej zóne, bez znakov modelácie podzemného vodného toku (Bella a Holúbek, 2002). Predstavuje vertikálno-horizontálnu, viacnásobnú rozvetvenú jaskyňu s výskytom skalných okien a paralelných chodieb, ktoré sú od



Obr. 1. Situačná mapka okolia jaskyne Zápoľná. Spracoval P. Gažík Fig. 1. Situation map of the vicinity of the Zápoľná Cave. Compiled by P. Gažík

seba oddelené len niekoľko centimetrov hrubou skalnou stenou (Bella a Holúbek, 2002). Článok prináša výsledky účelového hydrochemického výskumu, ktorý sa v jaskyni začal realizovať koncom roku 2014 spolu s ďalšími výskumnými úlohami v rámci prípravy programu starostlivosti pre jaskyňu Zápoľná. Výskum bol súčasťou projektu ŠF s názvom "Vypracovanie programov starostlivosti o vybrané jaskyne" realizovaného v období 9/2013 – 12/2015, spolufinancovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja v rámci Operačného programu Životné prostredie, prioritnej osi Ochrana a regenerácia prírodného prostredia a krajiny. Riešiteľom úlohy, ako aj realizujúcou organizáciou celého projektu bola Štátna ochrana prírody SR, Správa slovenských jaskýň v Liptovskom Mikuláši. Cieľom úlohy bolo získať základnú informáciu o chemickom zložení a kvalite vôd v jaskyni Zápoľná, keďže sa v nej dovtedy nerobili žiadne odbery vôd, ani neboli bližšie opisované ich fyzikálno-chemické vlastnosti.

PRÍRODNÉ POMERY

Jaskyňa Zápoľná patrí spolu so svojím okolím podľa geomorfologického členenia Slovenska do Fatransko-tatranskej oblasti, celku Kozie chrbty. Okolie jaskyne sa radí do mierne chladného, veľmi vlhkého okrsku s priemernou ročnou teplotou vzduchu 4 - 6 °C (Lapin et al., 2002). Z hydrologického hľadiska patrí územie do povodia Čierneho Váhu. Čierny Váh pramení na svahu Kráľovej hole v Nízkych Tatrách, odkiaľ tečie smerom na západ. Jeho vody pretekajú údolím, ktoré oddeľuje geomorfologické celky Nízke Tatry na juhu a Kozie chrbty na severe. Je zaradený medzi toky II. rádu. Koryto Čierneho Váhu tvorí najnižšiu časť – eróznu bázu územia (obr. 4). Táto skutočnosť vo veľkej miere ovplyvňuje pohyb podzemných vôd. Približne 2,5 km od jaskyne sa nachádza nádrž prečerpávacej vodnej elektrárne Čierny Váh.



Obr. 2. Mapa jaskyne s odbernými miestami vzoriek vody Fig. 2. Map of the cave with water sampling places

Geologické pomery okolia jaskyne približuje geologická mapa Nízkych Tatier v mierke 1 : 50 000 (Biely et al., 1992) a vysvetlivky k nej (Biely et al., 1997). Podľa Droppu (1962a,b) je prevažná časť jaskyne vytvorená v tmavosivých gutensteinských vápencoch stredného triasu, ktoré patria do bielovážskej série chočského príkrovu (Biely, 1960). Novšie geologické poznatky z okolia jaskyne, ako aj priamo z jej podzemných priestorov prináša Littva et al. (2017). Podľa Littvu et al. (2017) sa vchod do jaskyne na-



Obr. 3. Vchod jaskyne. Foto: D. Haviarová Fig. 3. Cave entrance. Photo: D. Haviarová



Obr. 4. Koryto Čierneho Váhu pod jaskyňou. Foto: D. Haviarová

Fig. 4. Čierny Váh riverbed below the cave. Photo: D. Haviarová chádza na bazálnej formácii svarínskeho príkrovu patriaceho k hroniku (chočský príkrov), ktorého horniny sa spolu s horninami jeho ďalších dvoch čiastkových príkrovov (malužinský a bociansky sensu Havrila, 2011) objavujú v okolí jaskyne. Samotná jaskyňa je podľa autorov článku situovaná v strednotriasových vápencoch a dolomitoch gutensteinského súvrstvia hronika. V jaskyni sa nachádzajú tmavosivé vápence, vápence s prímesou dolomitovej zložky, ako aj dolomity s nižším obsahom MgO (do 18 %). Dolomity sú často brekciovité, tektonicky porušené, vyhojené kalcitovými žilkami. Obsahujú malé zrniečka kremeňa, príležitostne sa tu nachádza aj pyrit a hydroxidy železa. V niektorých prípadoch sa pri dolomitoch identifikovali aj vyššie obsahy SiO₂ (2,08 až 7,11 %). V jaskyni sa zistili aj polohy pieskovcov, značne netypické pre karbonátovú gutensteinskú formáciu.

HYDROGEOLOGICKÉ POMERY

Podľa hydrogeologickej rajonizácie Slovenska (Šuba et al., 1984) je územie v okolí jaskyne Zápoľná súčasťou rajónu M 010 Mezozoikum chočského príkrovu SV svahov Nízkych Tatier a Kozích chrbtov. V rámci útvarov podzemných vôd sa radí k útvaru podzemných vôd predkvartérnych hornín SK200340KF (Útvar s dominantnými krasovo-puklinovými podzemnými vodami severovýchodnej časti Nízkych Tatier oblasti povodia Váhu) (Kuníková et al., 2005).

Z hydrogeologického hľadiska spadá okolie jaskyne do važecko-svarínskeho

karbonátového komplexu ležiaceho medzi Čiernym a Bielym Váhom, siahajúceho od Važca po Svarín. Ide o jednu z piatich čiastkových hydrogeologických štruktúr, na ktoré sa vzhľadom na zložitú vnútornú stavbu delia karbonáty chočského príkrovu severovýchodných svahov Nízkych Tatier (Hanzel, 1977). Režim a obeh podzemných vôd je v rámci komplexu ovplyvnený priepustnosťou horninového prostredia, ktorá je funkciou stupňa skrasovatenia a puklinovitosti. Stupeň skrasovatenia v rámci komplexu ovplyv-ňuje hlavne chemický charakter hornín a ich tektonické porušenie. Krasové systémy sú väčšinou vyvinuté nad miestnou eróznou bázou alebo v malej hĺbke pod ňou. V údolí Čierneho Váhu však vertikálne skrasovatenie často siaha aj do väčších hĺbok. S hĺbkou sa postupne krasové dutiny a pukliny vytrácajú a obeh podzemných vôd sa viaže na puklinový systém a zóny intenzívneho tektonického porušenia (Hanzel, 1977). Časť puklinovo-krasových vôd v údolí Čierneho Váhu sa v rámci štruktúry zachytila prieskumnými vrtmi s artézskym prietokom, ďalšia časť vôd je odvádzaná po obvode karbonátového komplexu prameňmi na styku s nepriepustnými lunzskými vrstvami, resp. flyšovými sedimentmi paleogénu vo forme bariérových prameňov v údolí Bieleho Váhu. Odvodňovanie komplexu sa deje aj lokálnymi skrytými prestupmi do Bieleho a Čierneho Váhu (Vozár et al., 1984). Doplňovanie zásob podzemných vôd v štruktúre je prevažne zo zrážok, ale aj z vodných tokov v povodí, ktoré ovplyvňujú režim podzemných vôd komplexu.

V bezprostrednej blízkosti jaskyne sa nenachádzajú žiadne pramene. Z hydrogeologického hľadiska je v blízkosti jaskyne zaujímavá tiesňava epigeneticky zarezaného koryta Čierneho Váhu (východne od Svarína), ktorá v dĺžke 2,0 km prerezáva pruh skrasovatených strednotriasových vápencov a dolomitov. Opakovanými hydrometrovacími meraniami sa v nej na povrchovom toku Čierneho Váhu zistili straty vody do predpokladaných podzemných krasových priestorov. V rokoch 1967 – 1969 sa tieto straty pohybovali od 115 do 588 l·s⁻¹ (Hanzel, 1977). V rokoch 1979 – 1983 boli v hornej časti tiesňavy zistené straty v objeme 75 – 170 l·s⁻¹. Nie je presne známe, kde tieto vody vystupujú znovu na povrch. Je predpoklad, že časť podzemných vôd prestupuje do kvartérnych sedimentov Čierneho Váhu pod tiesňavou. Tento predpoklad podporili aj výsledky z hydrometrovaní v dolnej časti tiesňavy v rokoch 1979 – 1983. Najväčšie prírastky do toku sa zistili v úseku cca 1,5 km pod merným objektom Čierny Váh – Svarín, a to 109 – 336 l·s⁻¹ (Šalaga et al., 1985).

Z hydrologického hľadiska je jaskyňa Zápoľná zaujímavá prítomnosťou viacerých vodných sifónov v spodných častiach jaskyne, v ktorých dochádza k postupnému kolísaniu vodnej hladiny. Vzájomná hydraulická závislosť medzi sifónmi zatiaľ nebola potvrdená, ale ani vyvrátená. Podľa Bellu a Holúbeka (2002) sa najspodnejšie známe časti jaskyne nachádzajú približne 20 m pod úrovňou koryta Čierneho Váhu. Tieto časti bývajú občasne zaplavované, pričom podľa autorov hladina podzemných jazier výškovo nesúvisí so zmenami hladiny povrchového toku Čierneho Váhu. V blízkom okolí jaskyne sa nenachádza žiaden významný nižšie položený prameň, ktorý by poukazoval na efektívne odvodňovanie masívu vzhľadom na spomínanú hladinu podzemných vôd v jaskyni. Na občasné zaplavovanie spodných častí jaskyne (miestne pomenovanie Tatrovka) poukazujú viaceré morfologické tvary. Jaskyňou nepreteká žiadny podzemný tok. Na viacerých miestach sa v jaskyni objavujú občasné priesaky rôznej intenzity. V priestoroch Hornej chodby sú viditeľné zvyšky menších sintrových jazierok, ktoré sa občasne zapĺňajú priesakovou vodou.

METODIKA

Hydrochemický výskum v jaskyni Zápoľná pozostával metodicky z viacerých etáp. V rámci prvej etapy sa vykonala rekognoskácia jaskyne s následným výberom odberných miest. Tie boli vyberané s prihliadnutím na rôznorodosť vodnej zložky v jaskyni a dostupnosť niektorých častí jaskynných priestorov. Preto sa napríklad do pravidelných odberov nezaradili občasne zaplavované spodné časti priepasti Tatrovka. Limitujúcim faktorom počtu odberných miest bol aj obmedzený rozpočet úlohy. Medzi odberné miesta v jaskyni sa vybral sifón Ce-ru-wei-nan-si-ka (ďalej označovaný ako sifón 1), sifón v blízkosti meračského bodu 19 (sifón 2) a dve miesta priesakových vôd v Hornej chod-

be, ktorá je považovaná za najväčšiu chodbu jaskyne, ležiacu vo výške cca 735 m n. m. (obr. 2). Odberné miesta v jaskyni dopĺňal odber vôd z Čierneho Váhu pred jaskyňou. Vody Čierneho Váhu sa zvolili na odber hlavne pre možnosť porovnania ich chemického zloženia a kvality s jaskynnými vodami v sifónoch, keďže už V. Hanzel (1977) poukazoval na možnosť prenikania vôd z povrchového riečiska Čierneho Váhu do podzemných dutín neďaleko jaskyne Zápoľná.

V ďalšej etape prác prebiehali vlastné terénne práce (odbery), realizované priebežne v období od decembra 2014 do júna 2015 za rôznych klimatických pomeroy. Takto zvolený harmonogram odberov v pomerne krátkom období sledovania bol vynútený časovou viazanosťou projektu, z ktorého bol hydrochemický výskum v jaskyni financovaný. Celkovo sa počas tohto obdobia vykonalo 6 odberných výjazdov (3. 12. 2014, 9. 2. 2015, 18. 3. 2015, 22. 4. 2015, 20. 5. 2015, 22. 6. 2015), v rámci ktorých sa odobralo 24 vzoriek vôd. Pri každom odbere sa robili terénne merania základných fyzikálno-chemických parametrov, a to teploty vody, elektrickej vodivosti (EC), pH a oxido-redukčného potenciálu (E_{ij}) . Teplota vody a elektrická vodivosť sa stanovili prenosným prístrojom firmy WTW LF 323 s elektródou TetraCon^R325, prenosným prístrojom WTW Multi 3430 s elektródou SenTix^R940 sa merala hodnota pH a rovnakým prístrojom so sondou SenTix^RORP 900 sa stanovili hodnoty oxidačno-redukčného potenciálu (E_{ij}) , ktoré sa prepočítali na štandardnú vodíkovú elektródu. V prípade priesakových vôd sa pri odbere stanovila aj intenzita priesaku. Chemické analýzy vôd sa vykonali subdodávateľsky v akreditovanom skúšobnom laboratóriu LL, s.r.o. v Liptovskom Mikuláši štandardnými metodikami v rozsahu Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Fe, Mn, NH₄⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁻²⁻, HCO₃⁻, KNK_{4.5}, HPO², CHSK_{Ma}, BSK₅, Mikrobiologické ukazovatele sa sledovali vo vodách v rozsahu termotolerantné koliformné baktérie, Escherichia coli, koliformné baktérie, enterokoky, kultivovateľné mikroorganizmy pri 22 °C, kultivovateľné mikroorganizmy pri 36 °C. V rámci dvoch cyklov odberov sa vo vodách stanovili aj obsahy vybraných kovov (Si, Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Zn) a hodnoty celkového organického uhlíka (TOC) a nepolárnych extrahovateľných látok (NEL₁₁₁). Všetky odbery sa vykonali do špeciálnych odberných nádob, ktoré pre tieto potreby poskytlo príslušné laboratórium.

Po laboratórnych prácach nasledovala etapa spracovania a vyhodnotenia údajov. Chemické analýzy vôd sa komplexne zhodnotili (výpočet látkových koncentrácií, ekvivalentových koncentrácií, aktivít a pod.), graficky a štatisticky spracovali. V rámci hodnotenia vôd z obidvoch sifónov sa spracovali a použili aj výsledky z kontinuálnych meraní teploty a režimu vôd, ktoré boli získané z výsledkov meraní hlbkových sond nainštalovaných na tento účel pred vlastnými odbermi priamo v sifónoch. Pri klasifikácii chemického zloženia vôd sa použila klasifikácia založená na princípe prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek nad 25 c·z % a Gazdova genetická klasifikácia chemického zloženia vôd (Gazda, 1974). Vypočítané boli aj vybrané charakterizačné koeficienty, napr. rMg/rCa, rSO₄/rM. V rámci špeciačného modelovania v programe PHREEQC-2 (Parkhurst, Appelo, 1999) sa prepočítali saturačné indexy hlavných karbonátových minerálov a posúdila sa schopnosť vody tvoriť novú sintrovú výzdobu. Hodnota $E_{\rm H}$ sa v rámci prepočtov nahradila hodnotou pe, kde pe = $E_{\rm H}$ (mV)·0,01695. Nasýtenie vôd voči hlavným karbonátovým minerálom sa prepočítalo aj na základe klasických výpočtov (Fľaková et al., 2010). Pri hodnotení stupňa nasýtenia sa za rovnovážny stav považovala hodnota $I = \pm 5\% \log K$ (Deutsch et al., 1982). V rámci porovnania a zhodnotenia vzájomnej závislosti chemického zloženia vôd medzi jednotlivými odbernými miestami sa prepočítali príslušné korelačné koeficienty. Kvalita jaskynných vôd bola posúdená v zmysle Nariadenia vlády SR č. 8/2016 Z. z., ktorým sa mení a dopĺňa Nariadenie vlády SR č. 354/2006 Z. z., ktorým sa ustanovujú požiadavky na vodu určenú na ľudskú spotrebu a kontrolu kvality vody určenej na ľudskú spotrebu v znení nariadenia vlády SR č. 496/2010 Z. z, ako aj z hľadiska Nariadenia vlády SR č. 282/2010 Z. z., ktorým sa ustanovujú prahové hodnoty a zoznam útvarov podzemných vôd pre vybrané ukazovatele, ktoré sa v jaskynných vodách sledovali (As, Cd, Pb, Hg, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, Fe, Mn, Cr, Cu).

CHEMICKÉ ZLOŽENIE JASKYNNÝCH VÔD

Priesakové vody

Chemické zloženie priesakových vôd sa v jaskyni sledovalo na dvoch miestach a ich celkové hodnotenie sa vykonalo na základe 11 chemických analýz. Prvým odberným miestom (priesak 1) bol stály a pomerne vyrovnaný priesak v Hornej chodbe, kde sa v porovnaní s ostatnými časťami jaskyne vyskytuje aj bohatšia sintrová výzdoba. Sledovaný priesak situovaný v ľavej časti chodby dopadá na podlahu jaskynnej chodby, ktorú pokrýva sinter. Miestami sa na podlahe nachádzajú aj nízke stalagmity. Pri pravom okraji chodby sú jemné sintrové hrádzky s malými plytkými jazierkami, ktoré občasne napĺňajú stekajúce priesakové vody (obr. 5). Suché hrádzky sa na malej ploche vyskytujú aj pri pravom okraji chodby. V stropnej časti je jemná výzdoba hlavne vo forme brčiek a krátkych záclon, ktoré sa tvoria prevažne na puklinách, ktorými sa do jaskynnej chodby dostáva voda. Druhé odberné miesto s intenzívnejším priesakom (priesak 2) sa nachádzalo rovnako v Hornej chodbe. Priesaková voda sa tu po dopade na zem tratí v sutine.

Priesakové vody mali v obidvoch prípadoch veľmi podobné a pomerne vyrovnané chemické zloženie (tab. 1). Celková mineralizácia priesakových vôd bola v rozpätí 319 až 403 mg·l⁻¹, čo radí tieto vody medzi stredne mineralizované prírodné vody. Medzi mineralizáciou a intenzitou priesaku sa zistila pomerne dobrá priama závislosť. Najmenej boli mineralizované priesakové vody z aprílového odberu pri najvyššej intenzite priesaku. Hodnoty pH priesakových vôd boli dosť nevyrovnané a pohybovali sa od 6,6 do 8,3, s priemernou hodnotou 7,7 a mediánom 8,0. Teplotné pomery boli vyrovnanejšie a bliž-

šie teplote vzduchu v prípade priesaku 1, s priemernou teplotou 7,3 °C pri intenzite priesaku 15 až 50 ml za 10 minút. Intenzívnejší priesak 2 (intenzita 25 až 110 ml za 10 minút) mal priemernú teplotu 7,9 °C, a to hlavne vďaka teplejším vodám počas májového a júnového odberu. V katiónovom zložení priesakových vôd dominoval vápnik v koncentráciách 59 mg·l-1 až 76 mg·l-1, s priemernou hodnotou 68,3 mg·l⁻¹ pre priesak 1 a 64,0 mg·l⁻¹ pre priesak 2. Druhým najviac zastúpeným katiónom vo vodách bol horčík s koncentráciami od 10 mg·l-1 do



Obr. 5. Občasné malé sintrové jazierka v Hornej chodbe dopĺňané priesakovou vodou. Foto: P. Staník Fig. 5. Sporadic small rimstone dams in Horná chodba Passage refilled with seepage water. Photo: P. Staník

Tab. 1. Prehľad vybraných ukazovateľov chemického zloženia jaskynných vôd, obdobie 12/2014-6/2015

Tab. 1. Overview of selected cher	nical parameters of the cave wat	er, period 12/2014 - 6/2015
-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------

voľný CO ₂ (mg.l ⁻¹)		4,0	28,1	5,2	8,9		4,0	50,8	5,6	16,2		6,0	15,4	11,5	10,4		4,4
agresívny CO ₂ (mg.l ⁻¹)		0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	17,0	0,0	3,4		0,0	3,6	0,1	0,9		0,0
HCO ₃ (mg.l ⁻¹)		227,0	289,0	262,3	261,3		227,0	284,0	254,4	253,9		198,0	252,0	208,4	219,8		186,0
SO ²⁻ 4 (mg.l ⁻¹)		8,3	9,5	9,0	8,9		7,4	8,7	7,8	7,9		17,2	18,1	17,8	17,7		17,6
NO ₃ - (mg.l ⁻¹)		5,00	5,00	5,00	5,00		5,00	5,00	5,00	5,00		5,00	5,08	5,00	5,01		5,00
CI ⁻ (mg.l ⁻¹)		0,47	0,77	0,58	0,59		0,32	0,41	0,33	0,35		1,01	2,07	1,18	1,31		1,06
K* (mg.l ⁻¹)		0,33	0,85	0,38	0,45		0,27	0,50	0,31	0,34		0,62	2,00	0,74	0,96		0,70
Na ⁺ (mg.l ^{-l})		0,51	1,50	0,71	0,81		0,44	0,79	0,51	0,55		0,97	1,80	1,35	1,35		1,30
\mathbf{NH}_{4}^{+} (mg.l ⁻¹)		0,050	0,050	0,050	0,050		0,050	0,050	0,050	0,050		0,050	0,100	0,050	0,058		0,050
${\rm Mg^{2^+}}$ (mg.l ⁻¹)		10,0	18,0	13,0	13,3		10,0	14,0	12,0	11,8		14,0	19,0	14,5	15,2		16,0
Ca ²⁺ (mg.l ⁻¹)		64,0	76,0	67,0	68,3		59,0	69,0	64,0	64,0		47,0	58,0	54,0	53,7		45,0
CHSK _{Mn} (mg.l ⁻¹)		0,50	1,70	0,50	0,82		0,50	2,00	1,50	1,22		0,50	0,80	0,50	0,55		0,50
EC (µS.cm ⁻¹)		377,0	419,0	400,0	398,7		365,0	390,0	376,0	378,8		361,0	379,0	368,0	368,8		335,0
Hq	- 6)	6,6	8,3	8,10	7,7	- 5)	7,1	8,3	8,0	7,8	(9	7,7	7,9	7,70	7,7		7,9
t vody (°C)	očet analýz∍	6,9	7,7	7,2	7,3	očet analýz	7,3	9,0	7,9	7,9	et analýz – t	6,8	7,2	6,9	7,0	et analýz –	6,7
	Priesak 1, Zápoľná jaskyňa (po	Min.	Max.	Medián	Priemer	Priesak 2, Zápoľná jaskyňa (pc	Min.	Max.	Medián	Priemer	Sifón 2, Zápoľná jaskyňa (poč	Min.	Max.	Medián	Priemer	Sifón 1, Zápoľná jaskyňa (poče	3. 12. 2014

Tab. 2. Charakterizačné koeficienty a Palmer-Gazdove charakteristiky jaskynných vôd, obdobie12/2014-6/2015

	W	Ch	ıarakterizač	śné koeficien	ty				Palmer-Gaz	dove charak	teristiky			
		om/ د اس	Mu/oWu	W/ Oar	r(Na+K)/	S ₁ (NO3)	S _I (CI)	$S_1(SO_4)$	S ₂ (NO ₃)	S ₂ (CI)	$S_2(SO_4)$	A,	\mathbf{A}_2	\mathbf{A}_3
	(mg·l ^{-l})	INB/ICa		w/hoer	r(Ca+Mg)	(% z.3)	(0% Z.3)	(% z.3)	(% Z.3)	(0% z.3)	(% z.)	(% z.3)	(% z.3)	(% z.3)
Priesak 1, Zápoľná jaskyňa	(počet analý2	z – 6)												
Min.	323	0,25	2,28	0,02	0,01	0,74	0,00	0,00	0,00	0,27	3,52	0,00	93,17	0,04
Max.	403	0,39	3,94	0,02	0,02	1,73	0,19	0,00	1,20	0,39	4,43	0,00	94,50	0,06
Medián	361	0,32	2,92	0,02	0,01	0,94	0,00	0,00	0,83	0,34	4,11	0,00	93,67	0,05
Priemer	362	0,32	3,09	0,02	0,01	1,05	0,03	0,00	0,73	0,33	4,08	0,00	93,73	0,05
Priesak 2, Zápoľná jaskyňa	(počet analýz	z – 5)												
Min.	319	0,24	2,58	0,02	0,01	0,69	0,00	0,00	0,56	0,20	3,31	0,00	93,58	0,04
Max.	381	0,39	3,17	0,02	0,01	1,18	0,00	0,00	1,34	0,23	4,26	0,00	94,76	0,05
Medián	354	0,31	2,69	0,02	0,01	0,80	0,00	0,00	0,98	0,22	3,52	0,00	94,47	0,05
Priemer	350	0,31	2,77	0,02	0,01	0,84	0,00	0,00	0,98	0,22	3,72	0,00	94,19	0,05
Sifón 2, Zápoľná jaskyňa (p	očet analýz –	(9 -												
Min.	301	0,40	1,19	0,04	0,01	1,45	0,00	0,00	0,00	0,35	7,91	0,00	86,35	0,11
Max.	357	0,67	3,55	0,05	0,03	2,09	0,81	0,00	0,33	0,90	10,03	0,00	89,58	0,29
Medián	309	0,44	2,88	0,05	0,02	1,99	0,06	0,00	0,00	0,67	9,36	0,00	87,52	0,16
Priemer	322	0,47	2,71	0,05	0,02	1,89	0,26	0,00	0,10	0,66	9,08	0,00	87,84	0,17
Sifón 1, Zápoľná jaskyňa (p	očet analýz –	(1)												
3. 12. 2014	280	0,59	3,16	0,05	0,02	2,12	0,00	0,00	0,17	0,85	10,39	0,00	86,27	0,00

Tab. 2. Characterization indices and Palmer-Gazda characteristics of the cave water, period 12/2014-6/2015

18 mg·l⁻¹, s priemernou hodnotou 13,3 mg·l⁻¹ pre priesak 1 a 11,8 mg·l⁻¹ pre priesak 2. Priemerná hodnota charakterizačného koeficienta rMg/rCa bola pre obidva priesaky 0,3, čo indikuje prítomnosť dolomitovej zložky v miestach prestupu zrážkovej vody cez horninový masív až do vlastných priestorov jaskyne. Z aniónov dominovali v priesakových vodách hydrogénuhličitany v koncentráciách od 227 mg·l⁻¹ do 289 mg·l⁻¹, s priemernou hodnotou 261,3 mg·l⁻¹ pre priesak 1 a 256,3 mg·l⁻¹ pre priesak 2. Koncentrácie síranov sa pohybovali do 10 mg·l⁻¹. Hodnota charakterizačného koeficienta rSO₄/rM bola vo všetkých prípadoch nižšia ako 0,1 (tab. 2), čo vylučuje sulfatogénny pôvod síranov vo vodách. Koncentrácie ostatných iónov vo vode boli nízke. Podľa klasifikácie prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek väčším ako 25 c·z % boli vody Ca-HCO₃, respektíve Ca-Mg-HCO₃ typu. Ca-Mg-HCO₃ typ bol častejší v prípade priesaku 1. Podľa Gazdovej klasifikácie boli sledované priesakové vody výlučne základného výrazného Ca-HCO₃ typu s najvyšším zastúpením A₂ zložky s priemernou hodnotou 94 c·z % (tab. 2). Koncentrácie kovov boli v priesakových vodách nízke, žiaden zo stanovených kovov nemal zvýšené hodnoty (tab. 3).

		Si	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Sb	Ni	Pb	Zn	Fe	Mn
								mg·l ⁻¹						
nniocols 1	4.12.2014	1,3	<0,001	<0,0003	<0,002	<0,001	<0,003	<0,0001	<0,001	<0,005	<0,001	<0,01	<0,04	0,021
priesak i	20.5.2015	1,3	<0,001	<0,0003	<0,002	<0,001	<0,003	<0,0001	<0,001	<0,005	<0,01	<0,01	<0,04	0,014
priesak 2	20.5.2015	1,1	<0,001	<0,0003	<0,002	<0,001	<0,003	<0,0001	<0,001	<0,005	<0,01	<0,01	<0,04	0,014
sifón 1	4.12.2014	2,5	0,001	<0,0003	<0,002	<0,001	<0,003	<0,0001	<0,001	<0,005	0,0024	0,018	0,08	0,123
-: 6(2	4.12.2014	3,5	0,0014	<0,0003	<0,002	<0,001	0,0047	<0,0001	<0,001	<0,005	0,0042	0,022	0,11	0,205
\$11011 2	20.5.2015	2,1	<0,001	<0,0003	<0,002	<0,001	<0,003	<0,0001	<0,001	<0,005	<0,01	<0,01	<0,04	0,073
Čioravi Váh	4.12.2014	2,4	<0,001	<0,0003	<0,002	<0,001	<0,003	<0,0001	<0,001	<0,005	<0,001	<0,01	<0,04	0,033
Clerny van	20.5.2015	2,0	<0,001	<0,0003	<0,002	<0,001	<0,003	<0,0001	<0,001	<0,005	<0,01	<0,01	<0,04	0,061

Tab. 3. Obsah stopových prvkov vo vzorkovaných vodách Tab. 3. Content of trace elements in the sampled waters

Vody jaskynných sifónov

Chemické zloženie vôd z jaskynných sifónov môžeme opísať na základe výsledkov 7 chemických analýz, z toho 1 analýza pochádzala zo vzorky odobratej zo sifónu 1, zvyšných 6 zo vzoriek odobratých zo sifónu 2 (obr. 6). Zo sifónu 1 sa vzorky neodoberali pravidelne pre jeho zlú dostupnosť. Vo vzťahu k sledovanému režimu hladín podzemných vôd v obidvoch sifónoch môžeme konštatovať, že odbery zachytili nižšie aj vyššie stavy vody s výnimkou tých najnižších, ktoré sa v sifónoch objavili až po vzorkovacom období (t. j. po júni 2015) (obr. 7).

Alkalické vody sifónu 2 majú podľa kontinuálnych meraní vyrovnaný teplotný režim. Teplota vody sa podľa týchto meraní pohybuje od 6,8 do 6,9 °C. Ich celková mineralizácia bola stanovená na 301 až 357 mg·l⁻¹, s priemernou hodnotou 322 mg·l⁻¹. Koncentrácia vápnika ako hlavného katiónu vo vodách bola v rozpätí 47 až 58 mg·l⁻¹. Rovnako ako pri priesakových vodách mal pri katiónoch v poradí druhé zastúpenie horčík s koncentráciami od 14 do 19 mg·l⁻¹. Prepočítaná hodnota rMg/rCa sa v prípade týchto jaskynných vôd pohybovala od 0,40 do 0,67 s priemernou hodnotou 0,47, čo rovnako ako v prípade priesakových vôd indikuje pohyb vody v prostredí dolomitických vápencov, prípadne môže ísť o zmiešaný obeh v dolomitoch aj vápencoch. Koncentrácie ostatných katiónov boli vo vodách jaskynného sifónu nízke. Aniónové zloženie vôd malo svoje zastúpenie v poradí $HCO_3^- > SO_4^{-2} > NO_3^- > Cl^-$ > HPO_4^{-2} (tab. 1). Koncentrácie



Obr. 6. Odber vzorky vody zo sifónu 2. Foto: D. Haviarová Fig. 6. Taking water samples from the siphon no. 2. Photo: D. Haviarová



Obr. 7. Časový priebeh hladín a teplôt podzemnej vody v sifóne 1 a 2 za obdobie 11/2014 - 12/2015Fig. 7. Time course of groundwater level and water temperature in the siphons no. 1 and 2 during 11/2014 - 12/2015

hydrogénuhličitanov ako hlavného aniónu vo vode sa pohybovali od 198 do 252 mg·l⁻¹, s priemernou hodnotou 220 mg·l⁻¹. Koncentrácie síranov boli stanovené v rozpätí 17,2 až 18,1 mg·l⁻¹. V prípade dusičnanov išlo o koncentrácie nižšie ako 5,1 mg·l⁻¹.

3. 12. 2014 sa odber vykonal súčasne z obidvoch sifónov. Chemické zloženie vôd bolo relatívne podobné, hodnota koeficienta korelácie mala hodnotu 0,99. V sifóne 1 bola voda o niečo menej mineralizovaná (o necelých 30 mg·l⁻¹), čo súviselo s nepatrne nižšími koncentráciami hlavných iónov vo vode. Jediným väčším rozdielom bolo, že voda z tohto sifónu na rozdiel od sifónu 2 neobsahovala agresívne CO_2 . Rovnako obsah voľného CO_2 bol počas tohto odberu nižší o 11 mg·l⁻¹. Teplota vody v sifóne 2 sa podľa kontinuálnych meraní pohybovala od 6,6 do 6,8 °C (obr. 7).

Podľa klasifikácie prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek väčším ako 25 c·z % boli vody z obidvoch sifónov vo všetkých vzorkách Ca-Mg-HCO₃ typu. Podľa Gazdovej klasifikácie boli vody väčšinou základného výrazného Ca-HCO₃

typu, v dvoch prípadoch (sifón 1 pri odbere 3. 12. 2014 a sifón 2 pri odbere 22. 6. 2015) základného výrazného Ca-Mg-HCO₃. Z Palmerových charakteristík mala pri vodách z obidvoch lokalít najvyššie zastúpenie A_2 zložka s priemernou hodnotou 87 c z % (tab. 2). Podľa charakterizačného koeficienta r(Na+K) / r(Ca+Mg) pochádzajú vody zo sifónov z čistých karbonátov (hodnota mediánu 0,02).

Chemické zloženie vôd Čierneho Váhu

Vody Čierneho Váhu sa na rozdiel od jaskynných vôd vyznačujú nižšou mineralizáciou; tá sa v čase odberov pohybovala od 158 do 227 mg·l⁻¹. pH vôd merané v teréne kolísalo od 8,2 do 8,4, čo radí tieto vody medzi silno alkalické. Teplota vody bola ovplyvnená teplotou vzduchu, jej hodnoty v čase odberov kolísali od 0,2 do 14,5 °C. Majoritným katiónom vo vodách bol vápnik s koncentráciami od 24 do 40 mg·l⁻¹. Priemerná koncentrácia horčíka (6,9 mg·l⁻¹) bola o polovičku nižšia ako pri vodách z jaskynných sifónov. Koncentrácie sodíka (od 1,5 do 2 mg·l⁻¹) a draslíka (od 0,6 do 1,7 mg·l⁻¹) boli nízke, porovnateľné s koncentráciami vo vodách jaskynných sifónov. Podobne to platí aj pre koncentrácie amónnych iónov, ktoré boli vo všetkých vzorkách do $0.05 \text{ mg} \cdot 1^{-1}$ (tab. 4). Hydrogénuhličitany boli rovnako ako v prípade jaskynných vôd hlavným aniónom vôd. Ich koncentrácie v rozpätí 92 až 147 mg·l⁻¹ boli v priemere o polovicu nižšie ako v prípade sledovaných jaskynných vôd, t. j. priesakových vôd aj vôd z jaskynných sifónov. S vodami jaskynných sifónov mali vody Čierneho Váhu porovnateľné koncentrácie síranov (hodnoty vo vodách Čierneho Váhu kolísali od 12,7 do 19,1 mg·l⁻¹), chloridov (od 0,8 do 2,2 mg·l⁻¹) a dusičnanov (koncentrácie do 5,7 mg·l⁻¹). O podobnosti koncentrácií s vodami jaskynných sifónov môžeme hovoriť aj v prípade kovov vrátane Si. V porovnaní s priesakovými vodami boli jeho hodnoty cca o 1 mg·l⁻¹vyššie. Podľa klasifikácie prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek väčším ako 25 c·z % boli vody Čierneho Váhu striedavo Ca-HCO3, respektíve Ca-Mg-HCO3 typu. Podľa Gazdovej klasifikácie boli sledované priesakové vody základného výrazného Ca-HCO, typu, prípadne základného výrazného Ca-Mg-HCO, typu. Rovnako ako v prípade jaskynných vôd aj tu z Palmerových charakteristík prevládala A, zložka s priemernou hodnotou 82 c·z % (tab. 5).

Tab. 4. Prehľad vybraných ukazovateľov chemického zloženia vôd Čierneho Váhu, obdobie 12/2014 – 6/2015

Tab. 4. Overview of selected parameters of chemical composition of the Čierny Váh River water, period 12/2014 - 6/2015

	t _{vody} (°C) F		ЕС (µS.cm ⁻¹)	CHSK _{Mn}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ⁺	Na*	K*	Cŀ	NO ₃ -	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ -	agresívny CO ₂	voľný CO ₂
				(mg.l ⁻¹)											
Čierny Vál	n (počet	analýz	-6)												
Min.	0,1	8,2	187,0	0,50	24,0	1,1	0,05	1,50	0,60	0,81	5,00	12,7	92,0	0,0	2,0
Max.	14,5	8,4	255,0	1,60	40,0	10,0	0,05	2,00	1,70	2,23	5,68	19,1	147,0	1,2	4,0
Medián	6,2	8,3	226,7	0,93	32,3	8,0	0,05	1,60	0,63	1,05	5,00	15,6	120,4	0,5	2,2
Priemer	6,7	8,3	226,7	0,93	32,3	6,9	0,05	1,63	0,82	1,23	5,11	15,6	120,4	0,5	2,7
Cha	ırakterizačné	koeficienty				Pa	Imer-Gazdove	charakteristi	ky						
--------	----------------------	-----------------------------------	--	---	--	---	--	---	--	---	---	--			
1.00 P	An/ vNv	W/ Oar	r(Na+K)/	S ₁ (NO ₃)	S ₁ (CI)	$S_1(SO_4)$	$S_2(NO_3)$	S ₂ (CI)	$S_2(SO_4)$	\mathbf{A}_1	A2	Α3			
ugi Ca		w toet	r(Ca+Mg)				(c.z)	(0)							
0,06	1,60	0,07	0,03	2,76	0,00	0,00	0,00	0,00	11,59	0,00	78,98	0,11			
0,55	4,66	0,07	0,05	4,05	1,56	0,82	1,05	1,55	14,52	0,00	82,94	0,21			
0,42	4,25	0,07	0,04	3,35	0,78	0,00	0,00	0,68	13,44	0,00	81,68	0,13			
0,36	3,89	0,07	0,04	3,35	0,74	0,14	0,18	0,67	13,32	0,00	81,48	0,15			
	0,55 0,42 0,36	0.55 4.66 0,42 4,25 0,36 3,89	0,55 4,66 0.07 0,42 4,25 0,07 0,36 3,89 0,07	0,55 4,66 0,07 0,05 0,42 4,25 0,07 0,04 0,36 3,89 0,07 0,04	0,55 4,66 0,07 0,05 4,05 0,42 4,25 0,07 0,04 3,35 0,36 3,89 0,07 0,04 3,35	0,55 4,66 0,07 0,05 4,05 1,56 0,42 4,25 0,07 0,04 3,35 0,78 0,36 3,89 0,07 0,04 3,35 0,74	0,55 4,66 0,07 0,05 4,05 1,56 0,82 0,42 4,25 0,07 0,04 3,35 0,78 0,00 0,36 3,89 0,07 0,04 3,35 0,74 0,14	0,55 4,66 0,07 0,05 4,05 1,56 0,82 1,05 0,42 4,25 0,07 0,04 3,35 0,78 0,00 0,00 0,36 3,89 0,07 0,04 3,35 0,74 0,14 0,18	0,55 4,66 0,07 0,05 4,05 1,56 0,82 1,05 1,55 0,42 4,25 0,07 0,04 3,35 0,78 0,00 0,068 0,36 3,89 0,07 0,04 3,35 0,74 0,14 0,18 0,67	0,55 4,66 0,07 0,05 4,05 1,56 0,82 1,05 1,55 14,52 0,42 4,25 0,07 0,04 3,35 0,78 0,00 0,06 13,44 0,36 3,89 0,07 0,04 3,35 0,74 0,14 0,18 0,67 13,32	0,55 4,66 0,07 0,05 4,05 1,56 0,82 1,55 14,52 0,00 0,42 4,25 0,07 0,04 3,35 0,78 0,00 0,68 13,44 0,00 0,36 3,89 0,07 0,04 3,35 0,74 0,14 0,18 0,67 13,32 0,00	0,55 4,66 0,07 0,05 4,05 1,56 0,82 1,05 1,52 14,52 0,00 82,94 0,42 4,25 0,07 0,04 3,35 0,78 0,00 0,68 13,44 0,00 81,68 0,36 3,89 0,07 0,04 3,35 0,74 0,14 0,18 0,57 13,32 0,00 81,68			

Tab. 5. Characterization indexes and Palmer-Gazda characteristics of the Cierny Váh River water, period 12/2014 - 6/2015 Tab. 5. Charakterizačné koeficienty a Palmer-Gazdove charakteristiky vôd Čierneho Váhu, obdobie 12/2014 - 6/2015

HODNOTENIE KARBONÁTOVÝCH ROVNOVÁH JASKYNNÝCH VÔD

V rámci spracovania chemických analýz sa vykonalo aj hodnotenie stupňa nasýtenia jaskynných vôd voči hlavným karbonátovým minerálom. Vzhľadom na zistené chemické zloženie sa pri hodnotení sústredila pozornosť hlavne na nasýtenie vôd voči kalcitu a dolomitu. Nasýtenie sa hodnotilo na základe výsledkov špeciačného modelovania v programe PHREEQC-2, ako aj na základe klasických výpočtov používaných pri chemických rovnováhach.

Pri priesakových vodách bolo nasýtenie voči kalcitu premenlivé (obr. 8). Kým v prípade priesaku 1 prevládalo presýtenie vôd voči kalcitu okrem dvoch odberov, keď boli vody nedosýtené voči tomuto minerálu, v prípade priesaku 2 prevládal rovnovážny stav. Rovnako premenlivé bolo aj nasýtenie voči dolomitu, kde sa na obidvoch odberných miestach striedali všetky tri formy nasýtenia – nedosýtenie, presýtenie aj rovnovážny stav. Najčastejšie bol pritom podľa výpočtov zachytený rovnovážny stav. V prípade priesaku 1 sa preukázala vyššia korelácia medzi indexom nerovnovážnosti pre kalcit a dolomit a jeho celkovou mineralizáciou. Korelácia medzi indexom nerovnovážnosti pre kalcit a dolomit a intenzitou priesaku bola rozdielna pre jednotlivé odberné miesta. Kým v prípade prvého priesaku bola pre tieto premenné vypočítaná vyššia kladná korelácia (hodnota korelačného koeficienta 0,8), v prípade priesaku 2 sa zistila záporná korelácia (hodnota korelačného koeficienta -0,5). Na porovnanie boli pre všetky vzorky vypočítané aj indexy nasýtenia voči sadrovcu, ktoré potvrdili vysoké nedosýtenie voči tomuto minerálu (hodnoty I pre sadrovec sa pohybovali od -2,67 do -2,53).

Vody z jaskynných sifónov boli z hľadiska termodynamických rovnováh v rovnovážnom stave voči kalcitu (obr. 8). Priemerná hodnota indexu nerovnovážnosti pre kalcit bola 0,1. Rovnako to bolo aj v prípade dolomitu, pri ktorom hodnoty indexu nerovnovážnosti boli



Obr. 8. Graf nasýtenia jaskynných vôd voči kalcitu a dolomitu Fig. 8. Diagram of cave water saturation with respect to calcite and dolomite

posunuté viac do záporných hodnôt. Priemerná hodnota $I_{dolomit}$ predstavovala -0,3. Voči sadrovcu boli vody rovnako ako v prípade priesakových vôd výrazne nedosýtené.

KVALITA VÔD

Jaskynné vody

Všetky získané chemické analýzy jaskynných vôd boli účelovo spracované tak, aby sa dala hodnotiť ich kvalita. Vzhľadom na polohu jaskyne a využívanie územia v jej okolí nebol predpoklad výraznejšieho znečistenia jaskynných vôd. V okolí jaskyne sa nenachádzajú žiadne veľké mestské aglomerácie, výraznejšie priemyselné zdroje ani poľnohospodársky aktívne územia. Za potenciálny zdroj znečistenia môžeme v okolí jaskyne považovať hlavne v blízkosti ležiacu cestnú komunikáciu a s ňou spojenú dopravu, ako aj lesohospodársku činnosť.

V rámci hodnotenia kvality vody podľa Nariadenia vlády SR č. 8/2016 Z. z. vyhovovali všetky vzorky jaskynnej vody vo svojom stanovenom rozsahu s výnimkou Mn medzným hodnotám fyzikálnych a chemických ukazovateľov nariadeniu vlády. V rámci organických ukazovateľov bola stanovená len hodnota celkového organického uhlíka (TOC), ktorá nepresiahla hodnotu 2,8 mg·l⁻¹. Hodnoty TOC ako ukazovateľa skupinového stanovenia organických látok vo vode boli vyššie v prípade priesakových vôd ako vo vodách jaskynných sifónov. Rovnako to platí aj pri ďalšom ukazovateli skupinového stanovenia organických látok vo vode – CHSK_{Mn}, čo pravdepodobne súvisí s prestupom infiltrujúcich vôd cez pôdne nadložie obsahujúce vyšší podiel organických látok. Z ukazovateľov, ktoré môžu nepriaznivo ovplyvniť senzorickú kvalitu vody v zmysle nariadenia vlády, boli vo všetkých vzorkách okrem jednej prekročené medzné hodnoty koncentrácie mangánu pri vodách z jaskynných sifónov. Ostatné ukazovatele vyhovovali medzným hodnotám nariadenia, vrátane už spomínaných hodnôt CHSK_{Mn}.

Podľa Nariadenia vlády SR č. 282/2010 Z. z. sa zistilo v rámci prahových hodnôt pre útvar podzemných vôd SK200340KF ich prekročenie len v ukazovateli Mn.

Pomerne krátke monitorovacie obdobie v trvaní siedmich mesiacov len naznačilo kvalitatívne vlastnosti jaskynných vôd. Z hľadiska reprezentatívnosti výsledkov a posúdenia časových zmien kvality jaskynných vôd by bolo vhodné získané výsledky v budúcnosti doplniť o ďalší monitoring.

Mikrobiologické vlastnosti a kvalita vôd

Základný mikrobiálny profil jaskynných vôd bol opísaný na základe determinácie šiestich vybraných mikrobiologických ukazovateľov, ktoré môžu okrem iného upozorniť na prípadný výskyt zdroja fekálnej kontaminácie. V odoberaných vzorkách vôd sa determinovali termotolerantné koliformné baktérie (TKB), Escherichia coli (EC), koliformné baktérie (KB), enterokoky (EK), kultivovateľné mikroorganizmy pri 22 °C (KM22) a kultivovateľné mikroorganizmy pri 36 °C (KM36) (tab. 6). Na všetkých odberných miestach sa vo vodách zistilo vyššie zastúpenie psychrofilnej zložky nad mezofilnou, vrátane vôd Čierneho Váhu (tab. 6, 7). Vyššie oživenie kultivovateľných mikroorganizmov pri 22 °C a 36 °C bolo pri priesakových vodách v porovnaní s vodami jaskynných sifónov. Medzi vodami z jaskynných sifónov a vodami Čierneho Váhu sa v rámci týchto zložiek nezistila žiadna významnejšia korelácia. V poradí tretím ukazovateľom z hľadiska priemernej početnosti boli vo vodách zastúpené koliformné baktérie. V ich prípade sa početnosti menili v rôznom pomere raz v prospech priesakových vôd, inokedy v prospech vôd z jaskynného sifónu. Pri tomto ukazovateli sa zistilo aj vyššie zastúpenie v povrchových vodách Čierneho Váhu. Zároveň pre tento ukazovateľ platila relatívne vysoká korelácia medzi vodami z jaskynného sifónu a vodami Čierneho Váhu. Hodnoty termotolerantných koliformných baktérií a enterokokov ako jedny z najvýznamnejších mikrobiálnych ukazovateľov fekálnej kontaminácie boli v jaskynných vodách vo väčšine prípadov nízke. Vyššie oživenie bolo identifikované pri povrchových vodách Čierneho Váhu, rovnako ako aj pri determinácii Escherichia coli. Početnosti Escherichia coli v jaskynných vodách boli väčšinou nulové.

Podľa Nariadenia vlády SR č. 8/2016 Z. z. sa z mikrobiologických ukazovateľov pri jaskynných vodách zaznamenali najvyššie prekročenia medzných hodnôt pri priesakových vodách v ukazovateli kultivovateľné mikroorganizmy pri 22 °C (limit podľa nariadenia vlády 200 KTJ v 1 ml). Prekročenie sa týkalo až 91 % vzoriek s maximálne stanoveným počtom 6150 KTJ na 1 ml. Tieto ukazovatele boli prekročené aj pri vodách z jaskynných sifónov, aj keď nie v takých množstvách a pri takej početnosti vzoriek. 91 % početnosť prekročenia sa zaznamenala aj v prípade koliformných baktérií priesakových vôd. Koliformné baktérie mali v sifónoch prekročené hodnoty pri 71 % všetkých vzoriek. V prípade priesakových vôd bola naopak dobrá kvalita pri ukazovateľoch enterokoky a *Escherichia coli* (podľa nariadenia vlády zodpovedajú limity najvyššej medznej hodnote v prípade enterokokov aj Escherichia coli 0 KTJ v 100 ml). Prekročenie normových hodnôt bolo len v prípade 2 vzoriek, čo zodpovedalo 18 % všetkých vzoriek. V jaskynných sifónoch bola dobrá kvalita pri ukazovateli Escherichia coli (prekročenie normových hodnôt len v prípade 1 vzorky, čo zodpovedalo 14 % všetkých vzoriek). Koliformné baktérie, enterokoky, Escherichia coli mali v prípade vôd Čierneho Váhu prekročené medzné hodnoty počas všetkých odberov. Vyššie hodnoty týchto ukazovateľov spolu s vyššími hodnotami termotolerantných koliformných baktérií môžu súvisieť s miernym fekálnym znečistením, ktoré sa v podzemnej vode jaskyne prejavuje minimálne.

v jaskynných vodách	f the cave water
6. Mikrobiologické ukazovatele v	6. Microbiological parameters of
Tab.	Tab.

		1	1	l .	1	r			r			-		1
22.06.15		1950	1025	74	5	0	0		1775	850	260	70	4	35
20.05.15		6150	875	8	48	0	0		135	55	0	0	0	0
22.04.15	ak 2	1190	10	1	0	0	0	n 2	1080	300	10	×	45	0
18.03.15	Pries	85	14	26	5	32	22	Sifé	110	4	16	1	2	0
09.02.15		530	18	ŝ	0	0	0		38	3	13	9	0	0
04.12.14									205	77	65	45	2	0
22.06.15		2500	19	85	4	0	3			1	ı		ı	
20.05.15		208	33	110	0	0	0							
22.04.15	sak 1	1150	49	7	0	0	0	in 1		-	-		-	
18.03.15	Pries	910	6	14	0	2	2	Sifé			ı			
09.02.15		880	28	0	0	0	0							
04.12.14		12.70	440	06	96	0	0		840	343	0	20	10	0
		(KTJ·ml ⁻¹)	(KTJ·ml ⁻¹)	(KTJ·100 ml ⁻¹)		(KTJ·ml ⁻¹)	(KTJ·ml ⁻ⁱ)	(KTJ·100 ml ⁻¹)						
		KM22	KM36	KB	TKB	EK	EC		KM22	KM36	KB	TKB	EK	EC

Tab. 7. Mikrobiologické ukazovatele vôd Čierneho Váhu Tab. 7. Microbiological parameters of the Čierny Váh River water

		04.12.14	09.02.15	18.03.15	22.04.15	20.05.15	22.06.15
KM22	(KTJ·ml ⁻¹)	211	485	390	390	183	290
KM36	(KTJ·ml ⁻¹)	65	52	23	27	17	33
КВ	(KTJ·100 ml ⁻¹)	140	195	30	12	8	2500
ТКВ	(KTJ·100 ml-1)	105	70	12	6	8	34
EK	(KTJ·100 ml-1)	20	38	8	7	1	16
EC	(KTJ·100 ml-1)	42	50	10	8	8	29

ZÁVER

Cieľom článku bolo priniesť nové informácie o chemickom zložení vôd v jaskyni Zápoľná, priblížiť ich základnú charakteristiku, ktorá dopĺňa obraz o hydrogeochemických pomeroch juhozápadnej časti važecko-svarínskeho karbonátového komplexu. Základom hodnotenia bolo účelové spracovanie 24 chemických a mikrobiologických analýz vôd, ktoré poslúžili ako vhodný podklad na prezentovanie hydrochemických a kvalitatívnych vlastností jaskynných vôd.

Jaskyňa Zápoľná je z hydrologického hľadiska zaujímavá prítomnosťou niekoľkých vodných sifónov, pri ktorých sa dá predpokladať ich vzájomné hydraulické prepojenie. Vodnú zložku v rámci vadóznej zóny jaskyne zastupujú aj priesakové vody. Ich množstvo však neradí jaskyňu medzi významnejšie lokality z hľadiska výskytu takéhoto typu vôd v jaskynnom prostredí.

Chemické zloženie jaskynných vôd koreluje s mineralogicko-petrografickým charakterom horninového prostredia a dĺžkou ich interakcie s horninami. Variabilita chemického zloženia jaskynných vôd je rovnako aj funkciou teploty, tlaku a primárneho zloženia vstupujúcich vôd. V zmysle genetického členenia podzemných vôd Západných Karpát (Gazda, 1974) patria vody v jaskyni k podzemným vodám s karbonátogénnou mineralizáciou s viazanosťou na horninové prostredie mezozoických karbonátov. Vody z jaskynných sifónov sú základného výrazného Ca-HCO₃, respektíve Ca-Mg-HCO₃ typu s najvyšším zastúpením A2 zložky prevyšujúcej hodnotu 86 c·z %. Priesakové vody charakterizuje základný výrazný Ca-HCO, typ s rovnako najvyšším zastúpením A, zložky s hodnotou prekračujúcou 93 c·z %. Hlavným procesom tvorby chemického zloženia jaskynných vôd je proces rozpúšťania karbonátov, ktorý určuje distribúciu hlavných iónov vo vode. Tými je v prípade katiónov vápnik, v prípade aniónov sú to hydrogénuhličitany. Druhým najrozšírenejším katiónom v jaskynných vodách je horčík (obr. 9). Hodnota charakterizačného koeficienta rMg/rCa zodpovedala hodnotám od 0,2 do 0,7, čo indikuje pohyb vody v prostredí dolomitických vápencov, prípadne môže ísť o zmiešaný obeh v dolomitoch aj vápencoch. Vyššie hodnoty boli prepočítané pre vody jaskynných sifónov, pri priesakových vodách aj napriek ich rozdielnej polohe boli hodnoty tohto koeficienta podobné. Celková mineralizácia jaskynných vôd bola od 280 do 403 mg·l⁻¹, čo radí tieto vody do kategórie stredne mineralizovaných vôd. Podľa priemernej mine-



Obr. 9. Piperov graf chemického zloženia monitorovaných vôd Fig. 9. Piper diagram of monitored water chemical composition



Obr. 10. Časová variabilita mineralizácie monitorovaných vôd Fig. 10. Temporal variability of monitored water mineralization

ralizácie sú vyššie mineralizované priesakové vody v porovnaní s vodami jaskynných sifónov (obr. 10). Medzi mineralizáciou priesakových vôd z rozdielnych odberných miest existuje veľmi dobrá korelácia s hodnotou korelačného koeficienta blízkeho 1. Rovnako vysoká korelácia existuje v prípade vôd z jaskynného sifónu 2 s vodami Čierneho Váhu, čo môže indikovať ich prípadné hydraulické prepojenie. Vyrovnané teplotné pomery vôd v jaskynných sifónoch však naznačujú, že prípadná priama komunikácia prebieha len pozvoľna alebo dostatočne ďaleko od vlastných sifónov. Predpoklad hydraulickej komunikácie medzi vodami v jaskynných sifónoch s vodami Čierneho Váhu bude v blízkej budúcnosti overovaný ďalším monitoringom kolísania hladiny podzemnej vody v jaskyni s následným sledovaním vzťahov s povrchovými a ďalšími podzemnými vodami v okolí jaskyne. Mineralizácia jaskynných vôd počas roka kolíše, doterajšie odbery však nepreukázali jej extrémnejšie výkyvy. Získané výsledky mineralizácie jaskynných vôd korešpondujú s hodnotami mineralizácie podzemných vôd triasových karbonátov chočského príkrovu važecko-svarínskej štruktúry, ktoré sa podľa Vozára et al. (1984) pohybujú od 300 do 500 mg·l⁻¹. Sezónne zmeny v chemickom zložení jaskvnných vôd nie je možné hodnotiť, keďže odbery nepokryli celú ročnú periódu. Koncentrácie stopových prvkov v jaskynných vodách boli nízke, zodpovedajúce prirodzeným podmienkam vzniku a obehu podzemných vôd.

Výsledky špeciačného modelovania poukázali na rôznorodosť nasýtenia jaskynných vôd voči kalcitu a dolomitu, ktoré sa mení v priestore aj v čase. Pri priesakových vodách bola dokázaná čiastočná schopnosť tvorby recentnej jaskynnej výzdoby.

Vody v jaskyni Zápoľná môžeme na základe doterajších výsledkov z chemickej stránky charakterizovať ako podzemné vody dobrej kvality, ktoré v stanovených ukazovateľoch s výnimkou Mn vyhovovali medzným hodnotám Nariadenia vlády č. 8/2016. Nadlimitné koncentrácie chemických zložiek indikujúcich vo vode antropogénne znečistenie sa nezistili; koncentrácie dusičnanov, amónnych iónov, chloridov aj síranov boli v jaskynných vodách nízke. Na stanovenie prípadných trendov zmien chemického zloženia jaskynných vôd, ako aj koncentrácií potenciálnych znečisťujúcich látok v jaskynných vodách je potrebné v jaskyni realizovať ďalší podrobnejší monitoring.

Výsledky dosiaľ vykonaných rozborov v rámci mikrobiologických ukazovateľov preukázali mikrobiologické oživenie jaskynných vôd s prevahou kultivovateľných mikroorganizmov pri 22 °C. Mikrobiologické oživenie sa zistilo pri priesakových vodách aj vodách jaskynných sifónov. V prípade vôd z jaskynných sifónov bolo najvyššie mikrobiologické oživenie v čase zvýšených hladín podzemných vôd. V porovnaní s vodami Čierneho Váhu mali jaskynné vody vyššie počty kultivovateľných mikroorganizmov pri 22 a 36 °C. Mikrobiologické ukazovatele spojené s možnou fekálnou kontamináciou boli v jaskynnom prostredí v porovnaní s vodami Čierneho Váhu viditeľne nižšie, čo môže byť spojené s filtračnými účinkami okolitého horninového prostredia, pozitívne pôsobiaceho na samočistiace pochody podzemných vôd.

LITERATÚRA

- Bella, P., Holúbek, P. 2002. Základné morfologické a genetické znaky jaskyne Zápoľná v doline Čierneho Váhu. Slovenský kras, 40, 31–40.
- Biely, A., Bezák, V., Bujnovský, A., Vozárová, A., Klinec, A., Miko, O., Halouzka, R., Vozár, J., Beňuška, P., Hanzel, V., Kubeš, P., Liščák, P., Lukáčik, E., Maglay, J., Molák, B., Pulec, M., Putiš, M., Slavkay, M. 1997. Vysvetlivky ku geologickej mape Nízkych Tatier 1 : 50 000. GS SR, Vydavateľstvo Dionýza Štúra, Bratislava, 323 s.

- Biely, A., Beňuška, P., Bezák, V., Bujnovský, A., Halouzka, R., Ivanička, J., Kohút, M., Klinec, A., Lukáčik, E., Maglay, J., Miko, O., Pulec, M., Putiš, M., Vozár, J. 1992. Geologická mapa Nízkych Tatier.1 : 50 000. GÚDŠ, Bratislava.
- Biely, A. 1960. Chočský príkrov na severných svahoch Nízkych Tatier. Geologické práce, Správy 20, 127–134.
- Deutsch, W. J., Jenne, E. A., Krupka, A. M. 1982. Solubility equilibria in basalt aquifers; the Columbia Plateau, Eastern Washington, USA. Chemical Geology, 36, 1–2, 15–34.
- Droppa, A. 1962a. Speleologický výskum Važeckého krasu. Geografický časopis, 14, 4, 264-293.

Droppa, A. 1962b. Važecká jaskyňa a krasové javy v okolí. Šport, Bratislava, 95 s.

- Fľaková, R., Ženišová, Z., Seman, M. 2010. Chemická analýza vody v hydrogeológii. Bratislava, Slovenská asociácia hydrogeológov, 166 s.
- Gazda, S. 1974. Chemizmus podzemných vôd Západných Karpát a jeho genetická klasifikácia. In Leško, B. (Ed.): Materiály z III. celoslovenskej geologickej konferencie, II. časť. Bratislava, Slovenský geologický úrad, 43–50.
- Hanzel, V. 1977. Puklinovo-krasové vody severovýchodných svahov Nízkych Tatier a vplyv skrasovatenia na ich režim. Slovenský kras, 15, 31–52.
- Havrila, M. 2011. Hronikum: paleogeografia (vrchný pelsón tuval), štrukturalizácia príkrovu a stavba. Geologické práce, Správy, 117, Bratislava, 7–103.
- Holúbek, P., Kráľ, I. 2001. Čo nového v Zápoľnej? Spravodaj SSS, 32, 2, 24-27.
- Holúbek, P. 1998. Objavy v zabudnutej lokalite Zápoľná. Spravodaj SSS, 29, 3,10-15.
- Kuníková, E., Hucko, P., Adámková, J., Makovinská, J., Borušovič, Š., Chriašteľ, R., Kullman, E., Vodný, J. 2005. Správa Slovenskej republiky o stave implementácie Rámcovej smernice o vode spracovaná pre Európsku komisiu v súlade s článkom 5, prílohy II a prílohy IIIa článkom 6, prílohy IV RSV. Manuskript – MŽP SR, VÚVH, SHMÚ, SVP, 207 s.
- Lapin, M., Faško, P., Melo, M., Šťastný, P., Tomlain, J. 2002. Klimatické oblasti. In Atlas krajiny Slovenskej republiky, IV. Prvotná krajinná štruktúra, mapa č. 27 (1 : 1 000 000.), s. 95. Bratislava – Ministerstvo životného prostredia SR, Banská Bystrica – Slovenská agentúra životného prostredia.
- Littva, J., Bella, P., Gaál, Ľ., Holúbek, P., Hók, J. 2017. Extraordinary geology and fault-controlled phreatic origin of the Zápoľná Cave (Kozie chrbty Mountains, Slovakia). Acta Geologica Slovaca, 9, 1, 25–34.
- Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 282/2010 Z. z., ktorým sa ustanovujú prahové hodnoty a zoznam útvarov podzemných vôd.
- Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 8/2016 Z. z., ktorým sa mení a dopĺňa Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 354/2006 Z. z., ktorým sa ustanovujú požiadavky na vodu určenú na ľudskú spotrebu a kontrolu kvality vody určenej na ľudskú spotrebu v znení Nariadenia vlády Slovenskej republiky č. 496/2010 Z. z.
- Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J. 1999. User's guide to PHREEQ-C (version 2) a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 99-4259, 312 p.
- Šalaga, I., Šalagová, V., Kazmuková, M., Šinková, M., Tyleček, B. 1985. Mezozoikum Nízkych Tatier – SV časť. Záverečná správa z vyhľadávacieho HGP s ocenením zásob podzemných vôd ku dňu 31. 10. 1983. Manuskript, Geofond Bratislava, 146 s. + 182 príloh.
- Šuba, J., Bujalka, P., Cibuľka, Ľ., Frankovič, J., Hanzel, V., Kullman, E., Porubský, A., Popsíšil, P., Škvarka, L., Šubová, A., Tkáčik, P., Zakovič, M. 1984. Hydrogeologická rajonizácia Slovenska. SHMÚ, Bratislava, 310 s.
- Vozár, J., Bujnovský, A., Vozárová, A., Pristaš, J., Šucha, P., Hanzel, V., Malík, P., Kohút, M., Hanáček, J., Stankovič, J. 1984. Vysvetlivky ku geologickej mape 1 : 25 000, list 36 – 222 (Malužinská – 2). Čiastková záverečná správa za rok 1981 – 1984, Manuskript Geofond Bratislava, 108 s. + 11 príloh.

PRIESTOROVÉ ZMENY DISTRIBÚCIE MIKROKLIMATICKÝCH PARAMETROV POČAS LETNÉHO REŽIMU PRÚDENIA VZDUCHU V KRÁSNOHORSKEJ JASKYNI

ERIKA KOVÁČOVÁ – PETER MALÍK – JAROMÍR ŠVASTA – NATÁLIA BAHNOVÁ – ALEXANDRA PAŽICKÁ – PETER BAJTOŠ – ZUZANA GROLMUSOVÁ

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra; oddelenie hydrogeológie a geotermálnej energie, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava 11; erika.kovacova@geology.sk; peter.malik@geology.sk; jaromir.svasta geology.sk; natalia.bahnova@geology.sk; alexandra.pazicka@geology.sk; peter.bajtos@geology.sk; makrelaz@gmail.com

E. Kováčová, P. Malík, J. Švasta, N. Bahnová, A. Pažická, P. Bajtoš, Z. Grolmusová: Spatial changes in distribution of microclimatic parameters during the summer ventilation mode in the Krásnohorská Cave (Slovak Karst, Slovakia)

Abstract: The short-term measurements of microclimatic parameters were performed in the Krásnohorská Cave (Slovak Karst, Slovakia) during 2013 and 2016 summer ventilation mode. Air temperature, vapor pressure, air humidity, and carbon dioxide values were obtained from three vertical levels above the cave surface in total length of 550 m within the cave. The highest air temperature were observed in the back end of the cave, where the main airflow enters the cave from the second upper entrance. Air temperature decrease, air humidity and CO₂ incease, and almost constant values of vapor pressure were observed in the direction from the end of the cave to the lower entrance of the Krásnohorská Cave, and thus summer ventilation mode were confirmed. Vertical changes measured in 1 m, 1.5 m and 2 m above the cave bottom showed increase of air temperature and vapor pressure within a hight of 1 m and decrease of air humidity and CO₂ concentration with increasing height. External values of CO₂ concentrations measured in front of the entrance to the Krásnohorská Cave showed mixing of cave air with outside air within 10 m and more downhill of the Krásnohorská Cave entrance and no affect in area uphill above the cave entrance. Horizontal extent of cave air was reaching 70 - 100 m in front of the cave measured on the cave access road. Area of the cave road continuing behind the cave, in direction to the Pod kapličkou Spring, showed 40 m extent of mixing cave and outside air depending on prevailing wind direction.

Key words: microclimatic parameters, air temperature, vapor pressure, air humidity, carbon dioxide, summer ventilation mode, Krásnohorská Cave, Slovak Karst

ÚVOD

Mikroklimatický režim jaskýň predstavuje meteorologický režim malých atmosférických priestorov, ktoré sú ovplyvňované vonkajšími atmosférickými faktormi. Medzi základné mikroklimatické parametre jaskynných systémov patrí teplota vzduchu, barometrický tlak vzduchu, relatívna vlhkosť vzduchu a koncentrácia atmosférického CO_2 v jaskynných priestoroch (Abonyi et al., 1982; Faimon et al., 2006; Fairchild et al., 2006; Luetscher et al., 2008). Najnovšie výskumy mikroklimatických parametrov jaskynných systémov vyvracajú dlho prijímaný predpoklad, že mikroklíma jaskýň je

konštantná a statická v celom svojom jaskynnom priestore (Faimon et al., 2012). Takýto predpoklad sa dá aplikovať len na jaskynné priestory veľkých rozmerov alebo časti jaskýň dostatočne vzdialených od hlavných otvorov alebo mimo hlavného toku prúdenia vzduchu (Gamble et. al., 2000).

Zmeny mikroklimatických parametrov v jaskynných priestoroch sú prejavom zmeny prúdenia vzduchu na zemskom povrchu. Hlavným mechanizmom zmeny prúdenia vzduchu na povrchu, ako i v jaskynných priestoroch je zmena tlakového gradientu vyplývajúca z rozdielnej hustoty vzduchu v atmosfére (Wigley a Brown, 1971, 1976; De Freitas et al., 1982; Faimon et al., 2012). V menšej miere mikroklimatické vlastnosti jaskynných priestorov ovplyvňuje radónová aktivita, intenzita kvapkania vody v jaskyni a voda prítomná v podzemnom hydrologickom systéme jaskyne (Fairchild a Baker, 2012).

Na Slovensku sa výskumu mikroklimatických parametrov jaskýň venovalo viacero autorov. Speleoklimatický monitoring jaskyne Driny realizovaný Zelinkom od 1. 4. 1998 do 31. 3. 1999 bol zameraný na spoznanie ročného priebehu teplôt a relatívnej vlhkosti vzduchu a posúdenie vplyvu návštevnosti na jaskynné prostredie (Zelinka, 2000). Podobný monitoring zameraný na posúdenie mikroklimatického režimu sa realizoval v Ochtinskej aragonitovej jaskyni (Klaučo et al., 1997; Bobro et al., 2002; Zelinka, 2004). Dobšinskej ľadovej jaskvni (Bobro et al., 1995; Piasecki et al., 2004; Korzystka-Muskala et al., 2014), vo Važeckej jaskyni (Zelinka, 2002a), v jaskyni Domica (Zelinka, 2003) a v Brestovskej jaskyni (Zelinka, 2008). Prehľad mikroklimatických výskumov v slovenských sprístupnených jaskyniach je zosumarizovaný v publikácii Zelinku (2002b). V rámci projektu LIFE+ 11 ENV SK 1023 KrasCave, ktorého cieľom je zavedenie trvaloudržateľného využívania podzemnej vody v podzemnom krasovom systéme Krásnohorskej jaskyne, prebieha momentálne dlhodobý monitoring mikroklimatických parametrov Krásnohorskej jaskyne, ktorý v budúcnosti pomôže spresniť dynamiku podzemného priestoru tejto jaskyne. Dosiaľ boli v rámci tejto úlohy interpretované merania teploty a mernej elektrickej vodivosti v profile podzemného toku Krásnohorskej jaskyne (Malík et al., 2011), kvantitatívna charakteristika prirodzených výstupov podzemnej vody v oblasti Krásnohorskej Dlhej Lúky (Malík et al., 2014a), ako i stupeň skrasovatenia horninového prostredia Silickej planiny analýzou výtokových čiar prameňov (Malík et al., 2014b).

Uvedený príspevok analyzuje výsledky jednorazových meraní základných mikroklimatických parametrov nameraných v Krásnohorskej jaskyni počas letných režimov prúdenia vzduchu v rokoch 2013 a 2016. Merania teploty vzduchu, barometrického tlaku vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu a koncentrácie CO_2 vykonali pracovníci Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra pozdĺž podzemného vodného toku Krásnohorskej jaskyne v celkovej dĺžke 550 m. Získané hodnoty mikroklimatických parametrov sa následne analyzovali v troch vertikálnych výškových profiloch, vo výške 1 m nad povrchom terénu, 1,5 m nad povrchom terénu a vo výške 2 m nad povrchom terénu. Cieľom príspevku je charakterizovať priestorové zmeny distribúcie mikroklimatických parametrov počas letného režimu prúdenia vzduchu v Krásnohorskej jaskyni.

CHARAKTERISTIKA LOKALITY

Krásnohorská jaskyňa je lokalizovaná na severnom úpätí Silickej planiny, juhovýchodne od obce Krásnohorská Dlhá Lúka. Zdokumentovaný rozsah známych priestorov jaskyne predstavuje dosiaľ 1355 m (Stankovič, Cílek et al., 2005), pričom jaskyňa je od roku 2004 turisticky sprístupnená pre verejnosť v dĺžke 450 m.



Obr. 1. Mapa Krásnohorskej jaskyne podľa Stankoviča (2003) s vyznačením meraného úseku mikroklimatických parametrov

Fig. 1. Map of the Krásnohorská jaskyňa Cave according to Stankovič (2003) with marking of measured profile of the microclimatic parameters

Krásnohorská jaskyňa predstavuje výverovú fluviokrasovú jaskyňu so stálym vodným tokom, vyúsťujúcim na povrch v blízkosti vchodu do jaskyne v podobe významného krasového prameňa Buzgó. V rámci podzemných priestorov jaskyne má hlavný tok Krásnohorskej jaskyne dva významnejšie stále prítoky, jeden občasný prítok a viacero prietokových jazier.

Z termodynamického hľadiska predstavuje Krásnohorská jaskyňa (obr. 1) dynamický jaskynný systém s dvomi vchodmi s veľkým rozdielom v nadmorských výškach (Stankovič, Cílek et al., 2005). Prvý (dolný) vchod je situovaný na severnom svahu Silickej planiny a predstavuje vstup do jaskyne a tiež miesto výveru prameňa Buzgó. Druhý (horný) vchod sa doteraz objaviť nepodarilo. Jeho poloha sa predpokladá vo svahu planiny smerom ku Krásnohorskej Dlhej Lúke alebo niekde na priľahlom povrchu planiny ZJZ od vchodu do jaskyne, kde je pravdepodobne nateraz schovaný pod nánosom svahových sutín. Existencia druhého vchodu jaskyne sa predpokladá na základe hlavného prievanu, vyskytujúceho sa v mieste najvýznamnejšieho bočného prítoku do jaskyne (bočný prítok

z Heliktitového dómu), tesne pred vstupom do Veľkej siene. Výškový rozdiel dostupnej časti tohto prítoku je viac ako 5 m, pričom posledný úsek, pre množstvo sutín nedostupný, prudko stúpa (Stankovič, Cílek et al., 2005).

Charakteristika dynamického jaskynného systému

Princíp dynamického jaskynného systému spočíva vo vyrovnávacích pohyboch vzduchových hmôt vonkajšieho a vnútorného (jaskynného) vzduchu v dôsledku ich rozdielnej hustoty. Aby nastal jednosmerný tok vzduchovej hmoty v jaskyni, musí existovať určitý výškový rozdiel medzi vchodmi a teplotný rozdiel medzi vonkajším a jaskynným vzduchom. Intenzita prúdenia vzduchových hmôt je priamo závislá od veľkosti výškového rozdielu medzi vchodmi. Čím väčší je výškový rozdiel medzi vchodmi, tým je intenzita prúdenia vzduchu v jaskyni väčšia (De Freitas et al., 1982). Pretože teplota vonkajšieho vzduchu sa v priebehu roku periodicky mení, dochádza k zmenám smeru prúdenia vzduchových hmôt aj v jaskynných priestoroch s viacerými vchodmi. Na základe smeru prúdenia vzduchu rozlišuje Hipman (1989) v dynamických jaskyniach letný, zimný a prechodný režim prúdenia (obr. 2).



Obr. 2. Model dynamického jaskynného systému a jeho režimy: A – letný, B – zimný, C – prechodný (Hipman, 1989)



Letný režim prúdenia vzduchu nastáva v letnom období, keď je vonkajšia teplota vzduchu vyššia ako teplota vzduchu v jaskyni. Smer prúdenia vzduchu prebieha od vyššie situovaného otvoru k nižšiemu. Ochladený, a tým hustejší jaskynný vzduch klesá vplyvom gravitácie dole a vyteká spodným otvorom jaskyne. Tento proces je podľa Faimona et al. (2012, 2013) v zahraničnej literatúre nazývaný aj ako DAF mód (downward airflow mode).

Zimný režim prúdenia vzduchu nastáva v zimnom období, keď pri nižšej vonkajšej teplote prúdi vzduch od spodného otvoru k hornému otvoru. Tento proces poháňaný konvekciou Faimon et al. (2012, 2013) nazýva aj ako UAF mód (upward airflow mode).

Prechodný režim prúdenia vzduchu – tento statický stav nastáva v prípade, že teplota vzduchu v okolí jaskyne má rovnakú alebo takmer rovnakú hodnotu (±2 až 3 °C) ako vzduch v jaskyni. Vzhľadom na vyrovnané hustoty oboch vzduchových hmôt prúdenie vzduchu v jaskyni takmer ustáva alebo je možné pozorovať len nevýrazné a nepravidelné závany prúdenia vzduchu. Pri rozdiele teploty väčšom ako 5 °C je prúdenie vzduchu výrazne jednosmerné a intenzívne. Zastaviť ho môže v ojedinelých prípadoch vedľajší tlakový činiteľ, a to výrazný nápor vetra (Hipman, 1989; Holúbek a Kortman, 2009).

Geologická charakteristika Krásnohorskej jaskyne

Krásnohorská jaskyňa sa nachádza na severnom úpätí Silickej planiny, v geologickom prostredí gutensteinských vápencov a dolomitov silického príkrovu. Podľa predošlých geologických výskumov Slovenského krasu (Mello et al., 1996, 1997) sa na stavbe silického príkrovu podieľali triasové členy spodného, stredného a len spodnej časti (karn) vrchného triasu. Na základe posledného geologického mapovania Silickej planiny pri Krásnohorskej Dlhej Lúke, realizovaného v rokoch 2013 a 2014 v rámci úlohy LIFE+ 11 ENV SK 1023 KrasCave, sa zistilo, že v blízkom okolí Krásnohorskej jaskyne sa vyskytujú všetky spodno- a strednotriasové súvrstvia, ako i veľká časť vrchnotriasového sledu silicika (Kronome a Boorová, 2016).

Najspodnejším zisteným členom vrstevného sledu silického príkrovu na povrchu v okolí jaskyne je spodnotriasový pieskovcovo-bridličnatý súbor, tzv. verfénske súvrstvie. (Mello et al., 1996, 1997). Dominantnú zložku verfénskeho súvrstvia tu tvoria szinské vrstvy (szinské súvrstvie) ako súbor sivých slienitých bridlíc, ílovcov a ílovitých vápencov (Kronome a Boorová, 2016). Vo vnútorných priestoroch Krásnohorskej jaskyne však horniny szinského súvrstvia neboli zistené. Toto súvrstvie tvorí bezprostredné a pre vodu menej priepustné stratigrafické podložie skrasovatených stredno- až vrchnotriasových vápencov silického príkrovu. K výverom krasových vôd tak v prevažnej miere dochádza na úpätí planiny, na styku vápencov s podložným verfénskym (szinským) súvrstvím. Sústredené vývery podzemných krasových vôd sa nachádzajú najmä na západnom úpätí Silickej planiny, kde v poradí od severu na juh vyviera Hradná vyvieračka, vyvieračka Pod Veľkou skalou, Pstružia vyvieračka a Biela vyvieračka. Na severnom úpätí planiny je to práve prameň Buzgó – miesto výveru potoka z Krásnohorskej jaskyne. Ďalšia časť krasových vôd vystupuje na styku verfénskeho (szinského) súvrstvia a vápencov aj vyššie na svahu (napr. na južnom svahu planiny sú to vyvieračky Eveteš a Vápenná) a časť krasových vôd sa dostáva aj hlbším obehom do aluviálnej výplne povrchových tokov (Gaál in Stankovič, Cílek et al., 2005).

Najspodnejším členom vrstvového sledu silického príkrovu zisteným v Krásnohorskej jaskyni sú gutensteinské vápence a dolomity (gutensteinské súvrstvie), stratigraficky zaradené do spodnej časti stredného triasu (Mello et al., 1996). Gutensteinské vápence a dolomity tvoria podstatnú časť podzemných priestorov jaskyne, prakticky od vchodu až po Sieň obrov, pričom jednoznačne prevládajú dolomity nad vápencami. Vápence tvoria sporadické polohy v dolomitoch, napr. na konci vstupnej štôlne. Ďalej, v oblasti výraznej priečnej poruchy s bočnou chodbou Slepé črevo a v Perejovom dóme sú na jaskynnej stene miestami obnažené sivé gutensteinské dolomity s polohami vápencov a dolomitických vápencov. Výraznú puklinovitú chodbu v celej dĺžke Veľkého kaňonu tvoria gutensteinské dolomity, miestami s polohami dolomitických vápencov. V prostrednej časti sú sivé gutensteinské dolomity aj výrazne zvrstvené. Dolomity pokračujú aj za Veľkým kaňonom. Na začiatku Abonyiho dómu sú na stenách obnažené sivé, miestami slabo ružovkasté dolomity. Na konci Abonyiho dómu sú dolomity svetlejšie. Pre nasledujúce časti jaskyne, najmä pre Sieň obrov, je príznačná poruchová zóna s brekciami, ktoré sa vytvorili mohutným rútením priestoru v minulosti. Úlomky brekcií sú tvorené sivými dolomitmi a sivohnedými vápencami. Zadné časti jaskyne za Sieňou obrov, najmä Chodbu perál, Veľkú sieň a Zrkadlovú sieň, tvoria svetlosivé masívne steinalmské vápence vrchnoaniského veku. Prítomnosť steinalmských vápencov sa nápadne prejavuje v Chodbe perál. Táto časť vyniká bohatosťou koróznych tvarov, výčnelkov, vírových jamiek a pod., ktoré sa vytvorili ľahším rozpúšťaním vápenca na rozdiel od dolomitov predchádzajúcich úsekov. Dosiaľ chýbajú geologické údaje z ďalších častí jaskyne za sifónom Marikinho jazera (Sutinový dóm a riečisko). Z hľadiska generálneho úklonu vápencov $30^{\circ} - 40^{\circ}$ k juhu je však pravdepodobné, že aj tieto úseky sú vytvorené v steinalmských vápencoch (Mello et al., 1996, 1997; Gaál in Stankovič, Cílek et al., 2005).

Stratigraficky vyššie časti silického príkrovu, reprezentované wettersteinskými vápencami nie sú v podzemných priestoroch jaskyne prítomné. Tieto biele, bielosivé a masívne vápence vystupujú na povrch v širšom okolí jaskyne, podobne ako biogénne vápence tisoveckého, dachsteinského, resp. furmaneckého súvrstvia vrchného triasu.

Tektonické pomery

Jaskyňa sa nachádza v tektonicky značne postihnutej oblasti severných svahov Silickej planiny, kde sú spodnejšie členy silického príkrovu vytlačené zlomami smeru SZ--JV na sever. Horniny verfénskeho súvrstvia sa tu preto nachádzajú pod mladšími sedimentmi Rožňavskej kotliny a gutensteinské karbonáty len pod povrchom. Na povrchu dominujúce zlomy smeru SZ-JV sa prejavujú v jaskyni iba nevýrazne. Podľa nich je vytvorená len úzka a nízka Objavná chodba a následný extrémny úsek Materine muky. Oveľa výraznejšie sa v jaskyni prejavuje vertikálne zlomové pásmo smeru SV-JZ, presnejšie $40^{\circ} - 220^{\circ}$ alebo až $45^{\circ} - 225^{\circ}$. Ide o niekoľko paralelných zlomov vedľa seba, podľa ktorých je vytvorená krátka chodba Slepé črevo, Perejový dóm a najcharakteristickejšia zlomová chodba jaskyne - Veľký kaňon. Na tomto úseku sa ukážkovo prejavuje úloha tektonickej poruchy v tvorbe podzemných priestorov. Puklinová chodba je dlhá 170 m s výškou 12 m a s priemernou šírkou 2,5 m, mierne rozšírenie priestorov je len na miestach závalov. Predpokladá sa, že najmä poruchy tohto smeru hrali úlohu aj v zrútení ďalších častí jaskyne, ktoré vyústili do tvorby veľkých dómov za Veľkým kaňonom. Dokonalou ukážkou šikmej dislokačnej línie je tektonické zrkadlo medzi Veľkou zákrutou a Abonyiho dómom (Gaál in Stankovič, Cílek et al., 2005).

METODIKA

V rámci projektu LIFE+ (KRASCAVE) boli v Krásnohorskej jaskyni, okrem v súčasnosti prebiehajúceho dlhodobého monitoringu, vykonané krátkodobé merania teploty vzduchu, barometrického tlaku vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu a koncentrácie atmosférického CO_2 s cieľom spresniť termodynamické procesy prebiehajúce v jaskynných priestoroch. Prvé jednorazové meranie s meraním teploty vzduchu, tlaku vzduchu, vlhkosti vzduchu a koncentrácie CO_2 vo vzduchu sa vykonalo 23. 8. 2013 prístrojom TESTO 435 vo výške 1,5 m nad povrchom terénu. Nasledujúce jednorazové meranie s nameraním tých istých parametrov sa uskutočnilo 3. 8. 2016 prístrojom TESTO 435 vo výške 1 m nad povrchom terénu a súčasne prístrojom TESTO 435 vo výške 2 m nad povrchom terénu. Samostatné meranie teploty vzduchu sa vykonalo 23. 10. 2013 konduktomerom WTW 340i/SET vo výške 1 m nad povrchom terénu a súčasne konduktomerom WTW 325A/SET vo výške 2 m nad povrchom terénu.

Celková dĺžka meraného úseku predstavovala 550 m, pričom začiatok merania bol situovaný na konci jaskyne, v oblasti spodného brehu Marikinho jazera. Meranie prebiehalo od konca jaskyne (bod 0 metrov = Zrkadlová sieň, spodný breh Marikinho jazera) smerom k jej východu, pričom posledný meraný bod bola vstupná mreža do jaskyne (bod 550 m = vstup do Krásnohorskej jaskyne) (tab. 1). Vlastnému meraniu predchádza-lo manuálne natiahnutie metrážneho pásma v celom reálne merateľnom úseku jaskyne.

Hodnoty teploty vzduchu, barometrického tlaku vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu a atmosférického CO_2 sa následne merali a zaznamenávali každých 10 metrov dĺžky na celkovej dĺžke 550 m. Časový interval merania bol 2 až 5 minút, v závislosti od náročnosti terénu.

Tab. 1. Overview of m jaskyňa Cave	easured sections	and their footage	in the main	parts of the	Krásnohors	ská

Tab. 1. Prehľad meraných úsekov a metráž v hlavných častiach Krásnohorskej jaskyne

Metráž	Miesto
0 m	Marikino jazero – Zrkadlová sieň
20 m	Veľká sieň
38 m	ľavostranný prítok z Heliktitového dómu
100 m	Sieň obrov
130 – 150 m	Abonyiho dóm
160 m	vrchol závalu (pod Abonyiho dómom)
200 – 360 m	Veľký kaňon
364 – 377 m	traverz ponad Prvé jazero
460 – 550 m	razený tunel
550 m	vchod do Krásnohorskej jaskyne

V prípade jesenných meraní teplôt vzduchu v roku 2013 (v úrovni 2 m nad povrchom terénu) sa pre odlišnú kalibráciu prístroja WTW 340i/SET urobila korekcia nameraných hodnôt teplôt vzduchu. Pôvodné, nekorigované dáta vykazovali v úrovni 2 m nad povrchom terénu oproti hodnotám v úrovni 1 m nad povrchom zníženie teploty vzduchu v celom meranom profile, čo je z hľadiska termodynamických procesov nereálne. Namerané hodnoty teploty vzduchu zo dňa 23. 10. 2013 v úrovni 2 m nad povrchom terénu boli preto zvýšené o odchýlku meraní (+0,3 °C) zistenú oboma prístrojmi na tom istom mieste.

VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV A DISKUSIA

Teplota vzduchu

Teplota vzduchu v jaskyni je podmienená teplotnými zmenami na povrchu a intenzitou prúdenia vzduchu v jaskyni, pričom prúdenie nemusí byť konštantné v celom priestore jaskyne, ale môže sa meniť v závislosti od vnútorných podmienok jaskyne (napr. priestorové a výškové rozloženie jaskynného systému) (Faimon et al., 2012). Pre dynamické jaskyne s dvomi vchodmi s rôznou nadmorskou výškou je v letnom období charakteristické zvyšovanie teploty, ohrievanie okolitej horniny a zvyšovanie relatívnej vlhkosti vzduchu. V zimnom období, keď nastáva opačné prúdenie vzduchu do jaskyne, sa v jaskyni znižuje teplota, ochladzuje sa okolitá hornina a znižuje sa relatívna vlhkosť vzduchu (Forbes,1998). Vo väčšine prípadov sa teplota vzduchu v jaskyni blíži priemernej ročnej povrchovej teplote a kolíše len niekoľko stupňov počas sezóny (Moore a Sullivan, 1997).

V zimnom období sa tento teplotný gradient prejavuje intenzívnym nasávaním studeného vzduchu do jaskyne. Podľa Stankoviča a Cíleka et al., (2005) sa vplyv vonkajšieho vzduchu prejavuje až po začiatok Prvého jazera, kde aj pri veľkých mrazoch

dosahuje teplota vzduchu hodnotu 9,2 °C, čo je viac-menej stála celoročná teplota v jaskyni a predstavuje ustálenú teplotu horninového masívu, v ktorom je jaskyňa vytvorená. Prievan je v rozmerných chodbách pomerne ťažko zistiteľný. Hlavný prúd však jednoznačne smeruje do plazivky nad bočným prítokom pod Veľkou sieňou. Táto časť jaskyne smeruje zatiaľ von z planiny a prudko stúpa. Pokiaľ vonkajšia teplota vzduchu stúpne nad 9 °C, prievan sa otočí a smeruje z jaskyne von. V teplých letných dňoch je citeľné ochladenie aj niekoľko metrov pred vchodom do jaskyne. Jaskyňa je teda veľmi dobre vetraná a pri dostatočnom gradiente sa vzduch v jaskyni v priebehu dvoch dní vymení (Stankovič, Cílek et al., 2005).

Z celkového priebehu teplôt vzduchu nameraných v pozdĺžnom profile Krásnohorskej jaskyne možno pozorovať postupné veľmi mierne klesanie teploty vzduchu od konca jaskyne smerom k jej vchodu (obr. 3). Vyššia teplota vzduchu v závere jaskyne je zapríčinená cirkuláciou vzduchových hmôt v letnom období, keď je teplý vonkajší vzduch nasávaný predpokladaným, vyššie položeným otvorom jaskyne (UAF mód) v mieste prítoku z Heliktitového dómu. Postupne smerom k východu z jaskyne je teplota vzduchu ovplyvňovaná okolitou teplotou horninového masívu a mierne klesá. Najvýraznejšie kolísanie teplôt je pozorovateľné v zadnej časti jaskyne, v oblasti veľkých dómov (Sieň obrov, Abonyiho dóm), v úseku Veľkého kaňonu a v oblasti lanového traverzu ponad Prvé jazero. Teploty preukazujú plynulejší priebeh až v blízkosti vchodu do jaskyne (úsek posledných 150 m), kde vplyvom letnej ventilácie vzduchu a vyrovnávania sa teploty vzduchu s teplotou horninového masívu pomerne plynule klesajú.



Obr. 3. Pozdĺžna distribúcia teplôt vzduchu v Krásnohorskej jaskyni v dňoch 23. 10. 2013 a 3. 8. 2016

Fig. 3. Longitudinal distribution of air temperatures in the Krásnohorská jaskyňa Cave in 23. 10. 2013 and 3. 8. 2016

Z detailnejšieho merania teploty vzduchu vo dvoch výškových úrovniach (1 m a 2 m) nad terénom pozorovať podobné zmeny teplôt v roku 2013 aj v roku 2016, a teda postupný pokles teplôt vzduchu smerom von z jaskyne, v smere prúdenia vzduchových hmôt v letnom období (obr. 1). Vo výške 1 m nad terénom dosiahla 23. 10. 2013 teplota vzduchu priemernú hodnotu 9,3 °C a 3. 8. 2016 bola priemerná teplota vzduchu v tej istej výške 9,6 °C, čo odzrkadľuje zmeny vonkajšej teploty vzduchu v danom období

(tab. 2). Vo výške 2 m nad terénom (tab. 2) dosiahla 23. 10. 2013 teplota vzduchu priemernú hodnotu 9,4 °C a 3. 8. 2016 bola priemerná teplota vzduchu v tej istej výške 10,1 °C. Letné merania z roku 2016 vykazujú väčší rozptyl hodnôt, čo odzrkadľuje väčšie teplotné rozdiely medzi vonkajšou teplotou vzduchu a teplotou v jaskyni. Kým pri meraní v auguste 2016 nastalo zvýšenie teploty vzduchu v úrovni 2 m nad terénom priemerne o 0,5 °C, pri novembrovom meraní v roku 2013, keď boli vonkajšie teploty nižšie, ale stále pomerne vysoké (15,3 °C), sa v tej istej úrovni zvýšila teplota priemerne o 0,1 °C (tab. 2).

Tab. 2. Zmeny v minimálnych, maximálnych a priemerných hodnotách teplôt vzduchu v úrovni 1 m a 2 m nad dnom jaskyne nameraných 23. 10. 2013 a 3. 8. 2016

Tab. 2. Changes in minimal, maximal and average values of air temperature at levels of 1.0 m and 2.0 m above the ground surface measured on 23. 10. 2013 and 3. 8. 2016.

	23.10	. 2013 (*2	23. 8. 2013)		3. 8. 201	6
Krásnohorská jaskyňa	T min [°C]	T max [°C]	T priem. [°C]	T min [°C]	T max [°C]	T priem. [°C]
2 m nad povrchom terénu	8,8	9,9	9,4	9,4	12,6	10,1
1,5 m nad porchom terénu*	9,3	10,9	9,9	_	_	_
1 m nad povrchom terénu	8,6	9,7	9,3	9,1	10,2	9,6

Vertikálne zmeny v priemerných hodnotách všetkých meraných mikroklimatických ukazovateľov v úrovni 1 m a 2 m nad terénom zo dňa 3. 8. 2016 poukazujú na mierny nárast teploty a tlaku a pokles vlhkosti vzduchu, ako i koncentrácie CO_2 s nárastom výšky o 1 m (tab. 3). Teplota vzduchu sa vo výške 2 m nad terénom zvýšila o 0,5 °C, vzostup tlaku vzduchu s výškou je len nepatrný (+4,7 hPa). K slabému, takmer nepatrnému poklesu vo výške 2 m nad terénom došlo v prípade vlhkosti vzduchu (-4,3 %) i koncentrácie CO_2 (-32 ppm). Na presné odpozorovanie zmeny prúdenia vzduchových hmôt v jaskynnom systéme, a tým presnejšie stanovenie termodynamických procesov v Krásnohorskej jaskyni by bolo vhodné monitorovať vonkajšiu teplotu vzduchu, ako i koncentráciu atmosférického CO_2 v okolí jaskyne (približne v polovičnej výške medzi nadmorskou výškou dolného a predpokladaného horného otvoru).

Tab. 3. Priemerné hodnoty všetkých nameraných mikroklimatických parametrov v úrovni 1 m a 2 m nad povrchom terénu nameraných 3. 8. 2016

Tab. 3. Average values of all measured microclimatic parameters at levels of 1.0 m and 2.0 m above the ground surface measured on 3. 8. 2016

Krásnohorská jaskyňa 3. 8. 2016	Teplota vzduchu [°C]	Tlak vzduchu [hPa]	Vlhkosť vzduchu [%]	CO ₂ [ppm]
rozdiel (+ nárast, - pokles)	+0,5	+4,7	-4,3	-32
2 m nad povrchom terénu	10,1	980,3	98,6	4754
1 m nad povrchom terénu	9,6	975,6	99,9	4786

Koncentrácia atmosférického CO,

Koncentrácia atmosférického CO_2 v jaskynných priestoroch je ovplyvňovaná prúdením vzduchu a ventiláciou jaskynného systému. Prúdenie vzduchu v jaskyni primárne ovplyvňujú povrchová teplota vzduchu a zmeny barometrického tlaku vzduchu (Fairchild et al., 2006). Medzi ďalšie faktory vplývajúce na prúdenie vzduchu v jaskynných systémoch patrí aj geometria jaskynného systému a prevládajúci smer vetra (Bourges et al., 2001; Baldini et al., 2006 in Cowan et al., 2013). Vo všeobecnosti nastáva silnejšie prúdenie vzduchu v blízkosti vstupu do jaskyne a v oblastiach bez zúžených priestorov (Bourges et al., 2006 in Cowan et al., 2013). V miestach, kde je prúdenie ovplyvnené zúžením priestorov, alebo vo väčších vzdialenostiach od vstupu do jaskyne môžu byť hodnoty CO, relatívne konštantné (Cowan et al., 2013).

Z celkového priebehu obsahu atmosférického CO_2 v Krásnohorskej jaskyni pozorovať mierny vzostup koncentrácie CO_2 v smere od konca jaskyne k jej vchodu (obr. 4). Postupné zvyšovanie je možné pripísať sezónnej (letnej) ventilácii jaskynného vzduchu, zvyšovaniu prietoku podzemných vôd vplyvom bočných prítokov a následnému uvoľňovaniu CO_2 z podzemného toku jaskyne. Najvýraznejšie výkyvy v koncentráciách CO_2 možno pozorovať v oblasti bočných prítokov podzemných vôd a v priestoroch veľkých dómov nachádzajúcich sa v zadnej časti Krásnohorskej jaskyne. Tieto priestorovo objemné priestory spôsobujú náhle zmeny tlaku vzduchu a obsahu CO_2 na relatívne krátkych úsekoch. V morfologicky užších stredných (Veľký kaňon) a začiatočných častiach jaskyne je priebeh vzostupu CO_2 plynulý, bez výraznejšieho kolísania koncentrácií CO_2 .

Podrobnejším sledovaním priebehu CO_2 v rámci vnútorných priestorov jaskyne pozorovať zvýšenie CO_2 v oblasti bočného prítoku z Heliktitového dómu, kde hodnota CO_2 vystúpila z 3310 ppm na 4343 ppm, čo svedčí o uvoľňovaní CO_2 z pritekajúcich podzemných vôd. Postupné zvýšenie obsahu atmosférického CO_2 je evidentné aj v nasledujúcom úseku hlavného toku jaskyne, v celkovej dĺžke 80 m, až po úsek výstupu do Siene obrov (obr. 4). Sieň obrov je priestor s pôdorysom 36 × 25 m, kde maximálna dosiahnutá výška v priestore nad najväčším Kvapľom rožňavských jaskyniarov je takmer 45 m nad hladinou vody na dne dómu (Stankovič, Cílek et al., 2005). V tomto výrazne vyššie položenom podzemnom priestore, čiastočne izolovanom od hlavného toku, hlavného prievanu, ako aj od okolitých priestorov jaskyne, nastalo výrazné zníženie



Obr. 4. Pozdĺžna distribúcia koncentrácie atmosférického CO_2 v Krásnohorskej jaskyni v úrovni 1 m, 1,5 m a 2 m nad povrchom terénu počas letného režimu prúdenia vzduchu v rokoch 2013 a 2016

Fig. 4. Longitudinal distribution of atmospheric CO_2 in the Krásnohorská jaskyňa Cave at levels of 1.0 m, 1.5 m and 2,0 m above the ground surface during the summer ventilation mode in 2013 and 2016

všetkých meraných parametrov. Je možné, že ide o statickú časť jaskyne, s individuálnymi termodynamickými procesmi, kde nedochádza k vzájomnej komunikácii vzduchových hmôt s hlavnou, nižšie položenou osou jaskyne, prebiehajúceho dlhodobého monitoringu mikroklimatických parametrov v tejto časti jaskyne pomôžu spresniť termodynamické podmienky tohto priestoru. S návratom k hlavnému toku sa obsah CO_2 postupne mierne znižuje (obr. 4), čo je zapríčinené pravdepodobne zväčšením priestorov (priemerná výška 12 m), a tým rozptýlením CO_2 v oblasti Abonyiho dómu. Nasleduje užší úsek Veľkého kaňonu s postupným miernym vzostupom koncentrácie CO_2 na celkovom úseku 170 m. Vzostup koncentrácie CO_2 odzrkadľuje kumuláciu CO_2 v úzkych priestoroch kaňonu, tesne nad hladinou podzemného toku. Tento vzostup je viditeľný aj v mieste lanového traverzu nad Prvým jazerom, kde dochádza k uvoľňovaniu CO_2 z väčšej plochy jazera. V poslednom úseku smerom k vchodu do jaskyne (150 m) nastáva postupný mierny pokles obsahu CO_2 . Najnižšie hodnoty (2674 ppm) však boli namerané 23. 8. 2013 v závere jaskyne v oblasti Veľkej siene.

Z hľadiska vertikálnej distribúcie koncentrácií CO, možno pozorovať veľmi podobné obsahy CO, vo výške 1 m a 2 m nad úrovňou terénu a podobný trend vývoja ich hodnôt (obr. 4, tab. 4). Výraznejšie kolísanie hodnôt CO, je pozorovateľné v úrovni 1 m nad dnom jaskyne, v bližšej vzdialenosti k povrchového toku. Hodnoty atmosférického CO, od konca jaskyne (3652 ppm) smerom k východu (4849 ppm) postupne stúpajú, pričom priemerná hodnota CO, vo výške 1 m nad terénom je 4786 ppm (tab. 4). V úrovni 1,5 m nad jaskynným dnom sú hodnoty CO, na celom pozorovanom úseku jaskyne nižšie. Priemerná hodnota CO, vo výške 1,5 m nad terénom je vzhľadom na nižšie vonkajšie teploty vzduchu, ako i nižšiu teplotu vzduchu v jaskyni v danom období nižšia (3790 ppm). V úrovni 2 m nad terénom pozorovať rovnaký trend vývoja hodnôt. Smerom od konca jaskyne (3548 ppm) k jej východu koncentrácia CO, mierne vzrastá (5004 ppm). Priemerná hodnota CO, vo výške 2 m je 4754 ppm. Oproti výške 1 m nad povrchom terénu nastal vo výške 2 m nad terénom len nepatrný pokles obsahu CO₂ (-32 ppm). V úrovni 2 m nad povrchom terénu je priebeh zmien miernejší a plynulejší, čo naznačuje postupné ustálenie miešania vzduchových hmôt so stúpajúcou nadmorskou výškou.

Tab. 4. Zmeny v minimálnych, maximálnych a priemerných koncentráciách atmosférického CO_2 v úrovni 1 m, 1,5 m a 2 m nad povrchom terénu nameraných 23. 8. 2013 a 3. 8. 2016

Tab. 4. Changes in minimal, maximal and average values of atmospheric CO_2 at levels of 1.0 m and 2.0 m above the ground surface measured on 23. 10. 2013 and 3. 8. 2016

		23. 8. 2013			3. 8. 2016	
Krásnohorská jaskyňa	CO ₂ min [ppm]	CO ₂ max [ppm]	CO ₂ priemer [ppm]	CO ₂ min [ppm]	CO ₂ max [ppm]	CO ₂ priemer [ppm]
2 m nad povrchom terénu	_	-	_	5604	5697	4754
1,5 m nad povrchom terénu	2674	4803	3790	_	_	-
1 m nad povrchom terénu	-	-	_	3380	3450	4786

Tlak vzduchu

Zmeny tlaku vzduchu v jaskynných systémoch sú priamo závislé od zmien tlaku a teploty vzduchu na zemskom povrchu. V prípade slnečného počasia, keď je tlak vzduchu vysoký, nastáva prúdenie vzduchu do jaskyne, čím sa zároveň zvyšuje tlak

vzduchu v jaskyni. Naopak, v prípade nízkeho tlaku vzduchu v okolí jaskyne prúdi vzduch s vyšším tlakom z jaskyne smerom von, aby sa dosiahol rovnovážny, nízky tlak vzduchu v jaskyni. Tlak vzduchových hmôt v jaskyni ovplyvňuje aj zmena hustoty vzduchu, výškový rozdiel medzi dolným a horným vchodom, ako i sklon prechodného klimatického pásma, ktorým vonkajší vzduch vniká do jaskyne. Minimálny tlak vzduchu v jaskyni vzniká vtedy, keď prechodné pásmo horného vchodu klesá do najhlbšieho miesta jaskynného systému, pričom nezáleží na sklone prechodného pásma druhého, spodného vchodu (Hipman, 1989). Výrazný vplvv na zmeny tlaku vzduchu v jaskynných systémoch má, ako vedľajší činiteľ, nápor vetra v oblasti vchodov. Ak je jaskynný vchod situovaný na náveternej strane a je vystavený čelnému náporu vetra, vzniká v oblasti vchodu pretlak. Ak je jaskynný vchod situovaný za horským hrebeňom, na záveternej strane, môže vietor v oblasti vchodu spôsobiť podtlak. Celkový účinok vetra môže zdvojnásobiť alebo naopak úplne potlačiť účinný tlak vnútri jaskyne. Účinný tlak dynamickej jaskyne predstavuje rozdiel tlakových účinkov medzi vonkajším a jaskynným ovzduším, v závislosti od ich rozdielnej hustoty. V dynamických podmienkach spôsobuje účinný tlak uvedenie vzduchovej hmoty do pohybu a prekonanie prietokových odporov jaskynných priestorov (Hipman, 1989).

Z celkového priebehu tlaku vzduchu v Krásnohorskej jaskyni pozorovať relatívne nevýrazné kolísanie a zmeny hodnôt v rámci celej dĺžky sledovaného úseku (obr. 5). V prípade všetkých výškových úrovní dochádza k zmenám (zníženiu) tlaku vzduchu v oblasti dómov (Veľká sieň, Sieň obrov, Abonyiho dóm), a teda v miestach, kde sa náhle zväčšia priestory alebo sa náhle zmení nadmorská výška na relatívne krátkom úseku.

V rámci vertikálnej distribúcie v pozorovaných výškových úrovniach (1 m, 1,5 m, 2 m) nad povrchom terénu je viditeľný mierny vzostup tlaku vzduchu so vzrastajúcou nadmorskou výškou (obr. 5, tab. 5). V úrovni 1 m nad terénom je hodnota tlaku vzduchu takmer konštantná (priemer 975,6 hPa), hodnoty kolíšu len v oblasti veľkých dómov a v závere Veľkého kaňonu. V úrovni 1,5 m nad terénom hodnoty v smere od konca jaskyne (978,5 hPa) k jej východu mierne klesajú (977,1 hPa), pričom priemerná hodnota tlaku vzduchu vo výške 1,5 m je 977,9 hPa. V úrovni 2 m nad terénom hodnoty tlaku vzduchu kolíšu najvýraznejšie, pričom smerom od konca jaskyne (979,9 hPa) k jej východu mierne stúpajú (981,1 hPa). Priemerná hodnota tlaku vzduchu vo výške 2 m je 980,3 hPa. Vo výške 2 m nad terénom pozorovať vzostup priemernej hodnoty tlaku vzduchu oproti tlaku vzduchu vo výške 1 m o 4,7 hPa (tab. 5).

Tab. 5. Zmeny v minimálnych, maximálnych a priemerných hodnotách tlaku vzduchu v úrovni 1 m, 1,5 m a 2 m nad povrchom terénu nameraných 23. 8. 2013 a 3. 8. 2016

Tab. 5. Changes in minimal, maximal and average values of air pressure at levels of 1.0m and 2.0m above the ground surface measured on 23. 8. 2013 and 3. 8. 2016.

Vaćanskovalsti solovita		23. 8. 20	13		3. 8. 2	2016
Krasnonorska jaskyna	p min [hPa]	p max [hPa]	p priemer [hPa]	p max [hPa]	p max [hPa]	p priemer [hPa]
2 m nad povrchom terénu	_	_	_	978,4	981,1	980,3
1,5 m nad povrchom terénu	976,1	978,5	977,9	_	_	_
1 m nad povrchom terénu	_	_	_	973,6	975,8	975,6



Obr. 5. Pozdĺžna distribúcia barometrického tlaku vzduchu v Krásnohorskej jaskyni v úrovni 1 m, 1,5 m a 2 m nad povrchom terénu počas letného režimu prúdenia vzduchu v rokoch 2013 a 2016 Fig. 5. Longitudinal distribution of barometric pressure in the Krásnohorská jaskyňa Cave at levels of 1.0 m, 1.5 m and 2,0 m above the ground surface during the summer ventilation mode in 2013 and 2016



Obr. 6. Pozdĺžna distribúcia vlhkosti vzduchu v Krásnohorskej jaskyni v úrovni 1 m, 1,5 m a 2 m nad povrchom terénu počas letného režimu prúdenia vzduchu v rokoch 2013 a 2016 Fig. 6. Longitudinal distribution of air moisture in the Krásnohorská jaskyňa Cave at levels of 1.0 m, 1.5 m and 2,0 m above the ground surface during the summer ventilation mode in 2013 and 2016

Relatívna vlhkosť vzduchu

Vlhkosť vzduchu je spôsobená obsahom vodných pár v atmosfére. Ich množstvo je premenlivé a závisí aj od teploty vzduchu a tlaku vzduchu. Jaskynné priestory sa vyznačujú vysokou relatívnou vlhkosťou vzduchu. Relatívna vlhkosť (%) udáva pomer medzi aktuálnym a maximálnym možným nasýtením vzduchu vodnými parami pri danej teplote.

Z celkového priebehu hodnôt vlhkosti vzduchu v Krásnohorskej jaskyni pozorovať iba relatívne mierny vzostup hodnôt v smere hlavného podzemného toku jaskyne k východu (obr. 6). Výraznejšie kolísanie vlhkosti vzduchu pozorovať v oblastiach, kde sa priestory zväčšia alebo zmenšia, či v úsekoch prítokov alebo jazier. Lokálne zvýšenie vlhkosti vzduchu sa viaže na oblasti podzemných prítokov (prítok z Heliktitového dómu), oblasti väčších vodných plôch (Prvé jazero) a zúžených priestorov (Veľký kaňon). Mierne zníženie vlhkosti vzduchu sa prejavuje v oblasti veľkých priestorov (Sieň obrov).

Z hľadiska vertikálnej distribúcie možno pozorovať znižovanie vlhkosti vzduchu so stúpajúcou nadmorskou výškou (obr. 6, tab. 6). V úrovni 1 m nad terénom a zároveň v celom úseku jaskyne nad aktívnym vodným tokom je vlhkosť vzduchu takmer konštantná (priemer 99,9 %). V úrovni 1,5 m nad terénom hodnoty v smere od konca jaskyne (94,1 %) k jej východu mierne stúpajú (97,9 %), pričom priemerná hodnota vlhkosti vzduchu vo výške 1,5 m je 98,0 %. V úrovni 2 m nad terénom pozorovať rovnaký trend vývoja hodnôt. Smerom od konca jaskyne (83,5 %) k jej východu sa vlhkosť vzduchu mierne zvyšuje (96,7 %). Priemerná hodnota tlaku vzduchu vo výške 2 m je 95,6 %.

Tab. 6. Zmeny v minimálnych, maximálnych a priemerných hodnotách relatívnej vlhkosti vzduchu v úrovni 1 m, 1,5 m a 2 m nad povrchom terénu nameraných 23. 8. 2013 a 3. 8. 2016

Tab. 6. Changes in minimal, maximal and average values of relative air moisture at levels of 1.0 m and 2.0 m above the ground surface measured on 23. 8. 2013 and 3. 8. 2016

		23. 8. 2013			3. 8. 2016	
Krásnohorská jaskyňa	Vlhkosť min [%]	Vlhkosť max [%]	Vlhkosť priemer [%]	Vlhkosť min [%]	Vlhkosť max [%]	Vlhkosť priemer [%]
2 m nad povrchom terénu	_	_	_	83,5	97,3	95,6
1,5 m nad povrchom terénu	93,4	99,9	98,0	_	_	_
1 m nad povrchom terénu	_	_	_	97,9	99,9	99,9

Kým tesne (1 m) nad dnom jaskyne a zároveň bližšie k podzemnému toku bola vlhkosť takmer konštantná v celom úseku jaskyne (99,9 %), vo vyšších úrovniach (1,5 m) pozorovať mierne kolísanie hodnôt, ale i celkový pokles priemernej vlhkosti vzduchu o 1,9 %. V úrovni 2 m nad povrchom terénu sa priemerná vlhkosť vzduchu oproti vlhkosti vo výške 1 m nad terénom znížila o 4,3 %. Vzájomná závislosť, keď so zvyšujúcou sa teplotou vzduchu v jaskyni sa zároveň znižuje vlhkosť vzduchu, je pozorovateľná z obr. 7 a obr. 8.

Hodnoty vlhkosti vzduchu a teploty vzduchu v jaskyni na obr. 7 a obr. 8 sú preložené polynomickou trendovou čiarou, ktorá sa používa v prípade kolísavých údajov s vyšším počtom minimálnych a maximálnych hodnôt. Pomerne dobrou, i keď nižšou koreláciou sa vyznačujú dáta namerané v letnom období 2013 s hodnotou spoľahlivosti $R^2 = 0,7041$ (obr. 5). Vyššiu hodnotu spoľahlivosti $R^2 = 0,9112$ majú dáta namerané v letnom období 2016 (obr. 8).



Obr. 7. Závislosť medzi vlhkosťou vzduchu a teplotou vzduchu v Krásnohorskej jaskyni v úrovni 1,5 m nad povrchom terénu (jednorazové meranie 23. 8. 2013)

Fig. 7. Air moisture versus air temperature in the Krásnohorská jaskyňa Cave at the level of 1.5 m above the ground surface (measurements on 23. 8. 2013)





Fig. 8. Air moisture versus air temperature in the Krásnohorská jaskyňa Cave at the level of 2.0 m above the ground surface (measurements on 3. 8. 2016)

Doplnkové merania

Súčasťou jednorazových meraní mikroklimatických parametrov dňa 3. 8. 2016 bolo tiež meranie koncentrácie CO_2 v okolí Krásnohorskej jaskyne. Realizované bolo vertikálne a horizontálne meranie CO_2 s cieľom zistiť mieru dosahu prúdiaceho jaskynného vzduchu vychádzajúceho dolným otvorom jaskyne (vchod do jaskyne). Meranie sa vykonalo prístrojom TESTO 435 v poobedňajších hodinách, následne po domeraní mikroklimatických parametrov v Krásnohorskej jaskyni.



Obr. 9. Vertikálne meranie koncentrácie atmosférickéh
o CO_2 v okolí Krásnohorskej jaskyne 3. 8. 2016

Fig. 9. Vertical measurement of atmospheric CO_2 in the surroundings of the Krásnohorská jaskyňa Cave on 3. 8. 2016

Vertikálne merania koncentrácie CO2 v okolí Krásnohorskej jaskyne

Začiatok vertikálneho merania koncentrácie atmosférického CO₂ bol cca 10 m pred vchodom do Krásnohorskej jaskyne, v úrovni príjazdovej štrkovej cesty, v mieste brodu cez potok. Postupovalo sa so stúpajúcou nadmorskou výškou smerom k vchodu do jaskyne, následne k výveru prameňa Buzgó a hore svahom nad vstupom do jaskyne. Celkový odmeraný úsek bol cca 50 dĺžkových metrov, pričom interval merania bol 5 alebo 10 metrov v závislosti od prístupnosti terénu. Z toho 10 metrov sa meralo pod vchodom do jaskyne a 40 m vo svahu nad vchodom do jaskyne, čo predstavuje v danom teréne cca 20 výškových metrov.

Tab. 7. Vertikálne meranie mikroklimatických parametrov v okolí Krásnohorskej jaskyne 3. 8. 2016 Tab. 7. Vertical measurement of microclimatic parameters in the surroundings of the Krásnohorská jaskyňa Cave on 3. 8. 2016

Nadm. výška [m n.m.]	CO ₂ [ppm]	Tlak [hPa]	Teplota [°C]	Vlhkosť [%]	Poznámka
340	618	975,8	21,3	77,0	príjazdová štrková cesta, na brode cez potok
342	589	975,8	21,4	74,1	na chodníku do jaskyne, v úrovni sondy SHMÚ 1862
344	586	975,8	21,0	75,9	8 m od vchodu do jaskyne
346	1703	975,8	17,2	81,1	4 m od vchodu do jaskyne
348	4766	975,8	12,0	99,5	pred vstupom do jaskyne, cca 50 cm pred vstupnými železnými dverami
350	359	974,7	20,4	81,1	5 m nad skružou prameňa Buzgó, v pramennom zráze
352	339	974,5	20,7	80,9	10 m nad vchodom do jaskyne, vo svahu

354	329	974,2	21,3	75,3	20 m nad vchodom do jaskyne, vo svahu, tesne nad pramenným zrázom
356	318	972,9	21,4	73,5	30 m nad vchodom do jaskyne, vo svahu
358	304	971,8	21,6	71,8	40 m nad vchodom do jaskyne, vo svahu

Z detailnejšieho pozorovania v smere stúpajúcej nadmorskej výšky možno pozorovať vzostup koncentrácie CO_2 pred vchodom do jaskyne, v oblasti pod jaskyňou a pokles nad vchodom do jaskyne, v oblasti svahu nad jaskyňou (obr. 9, tab. 7). Z obrázku 9 je zrejmé, že vychádzajúci jaskynný vzduch so zvýšeným obsahom CO_2 (5004 ppm) ovplyvňuje okolie jaskyne na relatívne krátkom úseku, a to tesne pred vchodom do jaskyne a pod vchodom do jaskyne, smerom k nižším nadmorským výškam. Vo vyšších nadmorských výškach, a teda nad vchodom do jaskyne, nepozorovať výrazné ovplyvnenie koncentrácie atmosférického CO_2 . Globálna priemerná hodnota koncentrácie CO_2 v atmosfére dosiahla podľa Svetovej meteorologickej organizácie (WMO) v roku 2015 hodnotu 400 ppm (*http://public.wmo.int/en/media/press-release/globally-averaged-co2-levels-reach-400-parts-million-2015*).

Z nameraných hodnôt v tabuľke 7 pozorovať v mieste prvého (najnižšieho) merania (brod príjazdovej štrkovej cesty cez potok) mierne zvýšenú hodnotu CO_2 (618 ppm). Následne cca 8 m od vchodu do jaskyne hodnota klesla na 586 ppm. Približne 4 m od vchodu hodnota CO_2 vystúpila na 1703 ppm a priamo pred vchodom (cca 50 cm pred vstupnými železnými dverami) dosiahla svoje maximum (4766 ppm). Ide o oblasť bezprostredného miešania vychádzajúceho jaskynného vzduchu s okolitým vonkajším vzduchom. V mieste ďalšieho merania, už v oblasti nad vchodom do jaskyne, v mieste pramenného zrázu prameňa Buzgó, klesla hodnota CO_2 na 359 ppm. So stúpajúcou nadmorskou výškou (350 m n. m. až 358 m n. m.) dochádza postupne k poklesu koncentrácie CO_2 na hodnotu 304 ppm (tab. 7).

Horizontálne merania koncentrácie CO2 v okolí Krásnohorskej jaskyne

Horizontálne merania koncentrácie atmosférického CO₂ sa realiovali pozdĺž príjazdovej spevnenej lesnej cesty k jaskyni, v celkovom úseku 150 m, s intervalom merania



Obr. 10. Horizontálne meranie koncentrácie atmosférického CO_2 v okolí Krásnohorskej jaskyne 3. 8. 2016

Fig. 10. Horizontal measurement of atmospheric CO_2 in the surroundings of the Krásnohorská jaskyňa Cave on 3. 8. 2016

10 m. Z toho cca 70 m napravo od toku prameňa Buzgó a 70 m naľavo od toku prameňa Buzgó, priamo na lesnej ceste. Z horizontálnych meraní CO_2 možno pozorovať výraznejšie ovplyvnenie (zvýšenie) koncentrácie CO_2 vonkajšieho vzduchu v meranom úseku na pravej strane potoka a miernejšie ovplyvnenie v meranom úseku na ľavej strane potoka (obr. 10, tab. 8), pravdepodobne vplyvom prevládajúceho smeru vetra.

Z detailnejšieho pozorovania horizontálnych zmien koncentrácie CO_2 (obr. 10, tab. 8) vyplýva jej vzostup v smere od prvého meraného bodu (445 ppm) (príjazdová štrková cesta, cca 70 m od vchodu do jaskyne, na pravej t. j. východnej strane potoka) smerom k vchodu do jaskyne, s maximálnou hodnotou koncentrácie CO_2 (618 ppm) nameranou približne 15 m pod vchodom do jaskyne, na pravej strane potoka, v mieste brodu štrkovej cesty cez potok. Následne s prechodom na ľavú stranu potoka hodnota CO_2 vo vzduchu postupne klesá, od koncentrácie 509 ppm na ľavom brehu potoka po 368 ppm vo vzdialenosti 70 m od ľavého brehu potoka.

Tab. 8. Horizontálne meranie mikroklimatických parametrov v okolí Krásnohorskej jaskyne 3. 8. 2016

Dĺžka [m]	CO ₂ [ppm]	Tlak [hPa]	Teplota [°C]	Vlhkosť [%]	Poznámka
0	445	975,8	21,7	73,3	príjazdová štrková cesta, cca 70 m od potoka (pravá strana potoka)
20	467	975,8	21,7	73,0	príjazdová štrková cesta, cca 50 m od potoka (pravá strana potoka)
40	504	975,8	22,1	74,6	príjazdová štrková cesta, cca 30 m od potoka (pravá strana potoka)
60	573	975,8	22,0	76,8	príjazdová štrková cesta, cca 10 m od potoka (pravá strana potoka)
70	618	975,8	21,3	77,0	pravá strana potoka, kontakt breh-voda
80	509	975,8	21,1	71,7	ľavá strana potoka, kontakt breh-voda
90	424	975,8	21,5	72,9	štrková cesta, cca 10 m od potoka (ľavá strana potoka)
110	404	975,8	21,5	73,1	štrková cesta, cca 30 m od potoka (ľavá strana potoka)
130	380	975,8	21,6	73,3	štrková cesta, cca 50 m od potoka (ľavá strana potoka)
150	368	975,8	21,5	73,9	štrková cesta, cca 70 m od potoka (ľavá strana potoka)

Tab. 8. Horizontal measurement of microclimatic parameters in the surroundings of the Krásnohorská jaskyňa Cave on 3. 8. 2016

ZÁVER

V Krásnohorskej jaskyni sa v rokoch 2013 a 2016 realizovali jednorazové vertikálne merania základných mikroklimatických parametrov vzduchu na celkovej dĺžke 550 m. Meranie prebiehalo v smere od konca jaskyne – breh Marikinho jazera v Zrkadlovej sieni – a končilo sa pri vchode do Krásnohorskej jaskyne. Realizované merania teploty vzduchu, barometrického tlaku vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu a koncentrácie atmosférického CO_2 sa zaznamenávali každých 10 metrov dĺžky, v troch výškových úrovniach zároveň, a to 1 m, 1,5 m a 2 m nad povrchom jaskynného terénu. Merania prebiehali v období letného režimu prúdenia vzduchu, keď bola vonkajšia teplota vzduchu vyššia ako teplota vzduchu v jaskyni a prúdenie vzduchu prebiehalo od vyššie položeného predpokladaného otvoru v záverečnej časti jaskyne smerom k nižšie položenému vchodu do jaskyne.

Vyhodnotenie všetkých nameraných mikroklimatických parametrov potvrdilo letný režim a hlavný smer prúdenia vzduchu v Krásnohorskej jaskyni smerom od vyššie položeného otvoru nad bočným prítokom z Heliktitovej siene k nižšie položenému vstupnému otvoru (vchodu) do jaskyne. Primárny parameter potvrdzujúci letný režim je priebeh teploty vzduchu, kde je viditeľné nasávanie teplého vzduchu vrchným otvorom a jej postupné klesanie smerom k vstupnej mreži von jaskyne vplyvom vyrovnávania teplôt s horninovým masívom. V závislosti od zmeny teploty vzduchu sa zmenila aj relatívna vlhkosť vzduchu, keď so vzostupom teploty a vplyvom aktívneho podzemného toku došlo k plynulému zvýšeniu vlhkosti smerom od konca jaskyne k jej vchodu. Podobný trend vývoja v celom meranom úseku jaskyne preukazuje aj koncentrácia CO₂, ktorá len mierne vzrastá smerom od konca jaskyne k jej vchodu. Miesta najvýraznejšieho vzostupu koncentrácie CO₂ sú viazané na oblasti bočných prítokov a následné uvoľňovanie CO, z podzemného toku jaskyne. Hodnoty barometrického tlaku vzduchu preukazujú len minimálne alebo takmer žiadne zmeny hodnôt v celom hodnotenom úseku jaskyne. Najvýraznejší pokles v prípade všetkých meraných parametrov nastal v najvyššej položenej časti jaskyne, v Sieni obrov, kde možno predpokladať samostatný termodynamický režim prúdenia vzduchu, nezávislý od hlavného smeru prúdenia vzduchu v jaskyni.

V prípade vertikálnych meraní v úrovni 1 m, 1,5 m a 2 m nad povrchom terénu možno pozorovať vzostup priemernej teploty vzduchu a tlaku vzduchu so stúpajúcou výškou. V prípade relatívnej vlhkosti vzduchu a koncentrácie CO₂ nastal so stúpajúcou výškou mierny pokles ich hodnôt. Výsledky merania vo výške 1 m a 2 m nad povrchom terénu poukázali na vzostup teploty o 0,1 až 0,5 °C na jeden meter výšky, v závislosti od vonkajšej teploty vzduchu. Barometrický tlak vzduchu preukázal vzostup priemerne o 4,7 hPa na jeden meter výšky. Relatívna vlhkosť vzduchu so stúpajúcou výškou poklesla priemerne o 4,3 % a koncentrácia CO₂ preukázala vo výške 2 m nepatrný pokles o 32 ppm.

Doplnkové vertikálne meranie koncentrácie CO_2 vo vonkajšom vzduchu sa realizovalo nad vchodom a pod vchodom do Krásnohorskej jaskyne v celkovej dĺžke približne 50 m, s intervalom merania 5 m alebo 10 m v závislosti od prístupnosti terénu. Zvýšená koncentrácia CO_2 vychádzajúceho jaskynného vzduchu (5004 ppm) ovplyvňuje hodnoty vonkajšieho vzduchu na relatívne krátkom úseku. Zvýšená hodnota CO_2 bola nameraná tesne pred vchodom do jaskyne (4766 ppm) a do vzdialenosti približne 10 m pod vchodom do jaskyne (618 ppm), smerom k nižším nadmorským výškam. Vo vyšších nadmorských výškach, nad vchodom do jaskyne, sa zvýšenie koncentrácie CO_2 vo vzduchu nezistilo (304 ppm).

Doplnkové horizontálne meranie koncentrácie CO_2 pred Krásnohorskou jaskyňou sa realizovalo pozdĺž príjazdovej spevnenej lesnej cesty smerom k jaskyni, približne v rovnakej nadmorskej výške, v celkovom úseku 150 m, s intervalom merania 10 m. Výraznejšie zvýšenie koncentrácie CO_2 vo vzduchu bolo namerané do vzdialenosti cca 70 m od jaskyne, v úseku príjazdovej cesty na pravej (východnej) strane toku vytekajú-

ceho z jaskyne. Mierne zvýšenie koncentrácie CO_2 vo vzduchu (509 ppm až 404 ppm) sa nameralo na krátkom úseku štrkovej cesty (do cca 40 m) na ľavej strane potoka, v smere k prameňu Pod kapličkou. Relatívne malý priestorový rozsah miešania jaskynného, na CO_2 bohatého vzduchu a vonkajšieho vzduchu s rádovo nižšími priemernými hodnotami CO_2 je primárne ovplyvňovaný sezónnym režimom prúdenia vzduchu v jaskyni, ako i prevládajúcim smerom vetra na zemskom povrchu.

Prevažnú časť Krásnohorskej jaskyne možno z termodynamického hľadiska považovať za dynamickú, kde prúdenie vzduchu prebieha celým jej profilom pozdĺž podzemného toku a smer prúdenia určuje teplota vonkajšej atmosféry. Za čiastočne statickú časť jaskyne môžeme na základe výrazného poklesu všetkých nameraných mikroklimatických parametrov v tomto priestore predbežne považovať Sieň obrov, ktorá predstavuje najvyššiu časť jaskyne, pravdepodobne s individuálnym termodynamickým režimom, nezávislým od hlavného smeru prúdenia v jaskyni. Vzhľadom na to, že získané výsledky vychádzajú z krátkodobých meraní mikroklimatických parametrov v letnom období prúdenia vzduchu, považujeme ich zatiaľ za čiastkové. Potrebné je vyhodnotiť mikroklimatické parametre namerané v rámci úlohy v zimnom období, a vzájomne ich porovnať s letnými meraniami. Potvrdenie predpokladov správania sa mikroklimatických parametrov v rôznych teplotných režimoch, ako i predpoklad statického režimu v Sieni obrov ukážu až výsledky prebiehajúceho dlhodobého monitoringu mikroklimatických parametrov Krásnohorskej jaskyne.

LITERATÚRA

- Abonyi, A., Bárta, J., Gulička, J., Hipman, P., Jakál, J., Mitter, P., Rajman, L., Roda, Š., Slančík, J. 1982. Praktická speleológia. Vydavateľstvo Osveta, Martin, 388 s.
- Bobro, M., Hančulák, J., Zelinka, J. 1995. Súčasné mikroklimatické pomery v Dobšinskej ľadovej jaskyni. In Bella, P. (Ed.): Ochrana ľadových jaskýň, zborník referátov z odborného seminára. SSJ, Liptovský Mikuláš, 29–34.
- Bobro, M., Hančul'ák, J., Zelinka, J., Kupka, D. 2002. Výskyt oxidu uhličitého v Ochtinskej aragonitovej jaskyni. In Bella, P. (Ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň, zborník referátov z 3. vedeckej konferencie. SSJ, Liptovský Mikuláš, 145–152.
- Cowan, B. D., Osborne, M. C., Banner, J. L. 2013. Temporal variability of cave-air CO₂ in central Texas. Journal of cave and Karst Studies, 75, 1, 35–50. http://dx.doi.org/10.4311/2011ES0246
- 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, 4, 383–397.
- Fairchild, I. J., Baker, A. 2012. Speleothem science: from process to past environments. Wiley Blackwell, 432 p.
- Fairchild, I. J., Smith, C. L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Mattey, D., McDermott, F. 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleotherms: Eart Science Reviews, 75, 105–152. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscierev.2005.08.003.
- 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 ant its impact on microclimatic variables in the Císarská cave (Moravian Karst, Czech Republic). Acta Carsologica, 39, 427–448.
- 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. Tampa, FL (USA) ISSN 0392-6672, http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.42.2.3.

- Forbes, J. 1998. Air temperature and relative humidity study: Torgac Cave, New Mexico. Journal of Cave and Karst Studies, 60, 27–32.
- Gamble, D. W., Dogwiler, J. T., Mylroie, J. 2000. Field assessment of the microclimatology of tropical flank margin caves. Climate Research, 16, 1, 37–50.
- Hipman, P. 1989. Poznatky o proudění vzduchu v horských dynamických jeskyních. Československý kras, 1989, 40, Archiv ČSS Praha, 7–36.
- Holúbek, P., Kortman, B. 2009. Na Krakovej holi. Slovenská speleologická spoločnosť. Knižné centrum, Žilina, 68 s.
- Klaučo, S., Filová, J., Zelinka, J. 1997. Speleoklimatický monitoring Ochtinskej aragonitovej jaskyne. Aragonit, 2, 3–5.
- Korzystka-Muskala, M., Sawinsky, T., Zelinka, J., Piasecki, J., Muskala, P. 2014. Climatic effect of environmental modifications in entrance area of the Dobšinská Ice Cave (Slovak Paradise, Slovakia) – the latest result. Slovenský kras, 52, 2, 147–172.
- Kronome, B., Boorová, D. 2016. Geologická stavba Silickej planiny pri Krásnohorskej Dlhej Lúke. Geologické práce, Správy 129, ŠGÚDŠ, Bratislava, 55–78.
- Luetscher, M., Jeannin, P. Y. 2004. Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. Terra Nova, 16, 6, 344–350.
- Luetscher, M., Lismonde, B., Jeannin, P. Y. 2008. Heat exchanges in the heterothermic zone of a karst system: Monlesi cave, Swiss Jura Mountains. Journal of Geophysical Research, 113. F02025, http://dx.doi.org/10.1029/2007JF000892
- Malík, P., Gregor, M., Švasta, J., Haviarová, D. 2011. Interpretácia meraní teploty a mernej elektrickej vodivosti v profile podzemného toku Krásnohorskej jaskyne. Slovenský kras, 49, 1, 41–56.
- Malík, P., Gregor, M., Bottlik, F., Švasta, J. 2014a. Kvantitatívna charakteristika prirodzených výstupov podzemnej vody v oblasti Krásnohorskej Dlhej Lúky. In Fľaková, R., Ženišová, Z. (Eds.): Zborník 17. slovenskej hydrogeologickej konferencie, 14. 17. 10. 2014, Piešťany. SAH, Bratislava, 66–69.
- Malík, P., Gregor, M., Černák, R., Bottlik, F., Šutarová, B., Otruba, M., 2014b. Stupeň skrasovatenia horninového prostredia severného okraja Silickej planiny na základe analýzy výtokových čiar. Podzemná voda, 20, 2, 2014, 128–141.
- Mello, J., Elečko, M., Pristaš, J., Reichwalder, P., Snopko, L., Vass., D., Vozárová, A., Gaál, Ľ., Hanzel, V., Hók, J., Kováč, P., Slavkay, M. a Steiner, A. 1996. Geologická mapa Slovenského krasu 1 : 50 000. ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Mello, J., Elečko, M., Pristaš, J., Reichwalder, P., Snopko, L., Vass, D., Vozárová, A., Gaál, Ľ., Hanzel, V., Hók, J., Kováč, P., Slavkay, M., Steiner, A. 1997. Vysvetlivky ku geologickej mape Slovenského krasu 1 : 50 000. ŠGÚDŠ, Bratislava, 1–255.
- Moore, G. W., Sullivan, G. N. 1997. Speleology: caves and the cave environment. Cave Books, University of Michigan, 176 s.
- Piasecki, J., Zelinka, J., Pflitsch, A., Sawiński, T. 2004. Štruktúra prúdenia vzduchu v horných častiach Dobšinskej ľadovej jaskyne. In Bella, P. (Ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň, zborník referátov zo 4. vedeckej konferencie s medzinárodnou účasťou. SSJ, Liptovský Mikuláš, 113–124.
- Stankovič, J., Cílek, V., Bruthans, J., Gaál, Ľ., Kovács, A., Rozložník, M., Schmelzová, R., Zeman, O., Kováč, Ľ., Mock, A., Ľuptáčik, P., Hudec, I., Nováková, A., Košel, V., Fenďa, P. 2005. Krásnohorská jaskyňa Buzgó. Speleoklub MINOTAURUS Rožňava, 150 s.
- Zelinka, J. 2000. Speleoklimatický monitoring jaskyne Driny. In Bella, P. (Ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň, zborník referátov z 2. vedeckej konferencie. SSJ, Liptovský Mikuláš, 168–179.
- Zelinka, J. 2002a. Termodynamická charakteristika Važeckej jaskyne. In Bella, P. (Ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň, zborník referátov z 3. vedeckej konferencie. SSJ, Liptovský Mikuláš, 123–131.

- Zelinka, J. 2002b. Microclimatic Research in the Slovakian Show Caves. Acta Carsologica, 31, 1, 151–163.
- Zelinka, J. 2003. Posúdenie vplyvu prírodných a antropogénnych faktorov na zmeny mikroklimatického režimu jaskyne Domica. Aragonit, 8, 17–20.
- Zelinka, J. 2004. Prehľad najnovších poznatkov z mikroklimatického monitoringu Ochtinskej aragonitovej jaskyne. Slovenský kras, 42, 109–120.
- Zelinka, J. 2008. Prvé výsledky mikroklimatického monitoringu v Brestovskej jaskyni. Slovenský kras, 46, 87–96.
- Wigley, T. M. L., Brown, M. C. 1971. Geophysical applications of heat and mass transfer in turbulent pipe flow. Boundary-Layer Meteorology, 1, 300–320.
- Wigley, T. M. L., Brown, M. C. 1976. The physics of caves. In Ford, T. D., Cullingford, C. H. D. (Ed.). The Science of Speleology, 3. Academic Press, London, 329–347.
- http://public.wmo.int/en/media/press-release/globally-averaged-co2-levels-reach-400-partsmillion-2015

NOVÉ POZNATKY O SUFÓZNYCH JASKYNIACH V PODTATRANSKEJ KOTLINE

PETER HOLÚBEK

Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva, Školská 4, 031 01 Liptovský Mikuláš; peter.holubek@smopaj.sk

P. Holúbek: New knowledge of the suffosion caves in the Podtatranská Basin

Abstract: In the Podtatranska Basin, in the foothills of the Západné Tatry Mts. two suffosion formations are located in the Quarternary landslide deposits, which can be considered to be caves. One cave is located near the village of Liptovské Beharovce; it has a length of 12 m and ends in a soil collapse. The cave is continuously formed by a water stream which again appears on the surface after 67 m in the downstream direction. The cave has been studied since 2005, and according to the latest observations made in April 2017, the section near the entrance collapsed and the cave was shortened by 3 m. In the vicinity of the cave, on an area of approximately 0.6 km² other formations of a similar nature which indicate of active suffosion processes in this region. Another cave is located north of the village of Bobrovec with a length of 3 m, and like the first cave, it ends with a soil collapse. This locality provides further evidence of suffosion in the form of a number of sinkholes.

Key words: Podtatranská Basin, suffosion, cave, loam, flysch, landslide

ÚVOD

V Podtatranskej kotline v okolí Bobrovca a Liptovských Beharoviec, južne od masívu Babiek (1566 m n. m.) v Západných Tatrách v okrese Liptovský Mikuláš sa nachádzajú dve oblasti, v ktorých aktívne prebiehajú v hlinených sedimentoch sufózne procesy. Pri Liptovských Beharovciach je v Národnej databáze slovenských jaskýň evidovaná 12 metrov dlhá jaskyňa s názvom Dielnice. Ide o pozoruhodnú lokalitu vytvorenú v hline, ktorá bola v minulosti stručne opísaná v speleologickej literatúre (Holúbek, P., 2006). Ide o geneticky zaujímavú jaskyňu vytvorenú vyplavovaním žltej ílovitej hliny z podpovrchovej vrstvy kvartérnych sedimentov, ktorou preteká aktívny vodný tok. Na jar roku 2017 sa zaniesla hlinou z prepadnutého stropu a zanesením jej zvyšných častí hlinou z jej nadložia, takže sa stala pre človeka neprístupnou, dokonca sme sa domnievali, že zanikla. Po aprílových záplavách v oblasti liptova v roku 2017 sa však hlina z podzemia vyplavila a podzemné priestory jaskyne sa opäť stali pre človeka prístupná. Jej vstupný otvor sa však posunul prepadnutím oproti jarnému stavu asi o meter, čím sa skrátila aj dĺžka podzemného systému.

Severne od obce Jalovec, taktiež v geomorfologickom celku Podtatranská kotlina, je v oblasti zvanej Oslivčenie evidovaná 3 metre dlhá sufózna lokalita Diera v Oslivčení. Je to podobná oblasť s výskytom sufóznych javov ako pri Liptovských Beharovciach, ktoré sa nachádzajú vzdušnou čiarou prbližne 2 kilometre juhozápadným smerom.



Obr. 1. Poloha lokalít Fig. 1. Location of the sites



Obr. 2. Mapa jaskyne Dielnice Fig. 2. Map of the Dielnice Cave



Obr. 3. Situačná mapa lokality Fig. 3. Location map

HISTÓRIA VÝSKUMU

V druhej polovici 20. storočia zachytili v Liptovských Beharovciach pri osade Beniky prameň, vytekajúci na lúke zo sústredeného výverového miesta s odhadnutou výdatnosťou okolo 1 – 3 l.s⁻¹. Išlo o tok vody pochádzajúci zo zvodnenej vrstvy, ktorá je napájaná z nadložia budovaného flyšovou hlinou s veľkosťou okolo 0,1 km². Časté kalenie vody a aj jej laboratórny rozbor, ktorý bol negatívny, spôsobili, že sa upustilo od zavedenia prameňa do vodovodnej siete. Dňa 15. 4. 2005 sa podarilo P. Macečekovi, S. Votoupalovi a P. Holúbekovi náhodne nájsť nad týmto zachyteným prameňom v katastrálnom území obce Liptovské Beharovce v hlinených sedimentoch otvor do podzemia. V septembri toho istého roku ho preskúmali v dĺžke 12 metrov J. Psotka a P. Holúbek. Pri návšteve tejto lokality 4. marca 2017 sa zistilo, že vchod do jaskyne sa zasypal zrútením vstupnej depresie. Voda však do podzemia tiekla aj cez zrútenú hlinenú prekážku. Po záplavách v podtatranskej oblasti dňa 28. 4. 2017 sa hlinená zápcha vyplavila. Vchod do podzemia sa však zrútením vplyvom zvýšených zrážok posunul odhadom asi o ďalší meter.

Na jar roku 2017 našiel Michal Oravec v oblasti s podobnou geologickou a geomorfologickou situáciou, nachádzajúcej sa severne od obce Jalovec v katastrálnom území obce Bobrovec, čerstvé prepadlisko. Ide o otvor do 3 m dlhého kanála, ktorý sa končí zanesením hlinou z depresie nachádzajúcej sa po spádnici pod ním.

OPIS PODZEMNÝCH PRIESTOROV A GEOLOGICKÁ SITUÁCIA

Dielnice

Vchod do tejto jaskyne sa nachádza v nadmorskej výške 760 metrov v predhorí Západných Tatier v Podtatranskej kotline, Smrečianskej pahorkatine. Jej zemepisné súradnice v JTSK x – 382508,02; y – 1184905,29. Vchod je situovaný v trvalom trávnatom poraste s výskytom krov a solitérnych smrekov, ktorý slúži neďalekému salašu už niekoľko generácií ako pastva pre ovce. Predmetné územie budujú kvartérne zosuvové hliny okrovej farby so sporadicky sa vyskytujúcimi úlomkami žltého pieskovca, ktoré pochádzajú z podložného flyšového pieskovcového súboru zubereckého súvrstvia paleogénneho veku. Pieskovcové úlomky dosahujú rozmery do 10 centimetrov. Vchod do jaskyne tvorí otvorená depresia s priemerom 2 metre, do ktorej z nadložných priestorov tečie vodný tok



Obr. 4. Vchod do jaskyne v apríli roku 2007. Foto: P. Holúbek

Fig. 4. Entrance of the cave in April 2007. Photo: P. Holúbek



Obr. 5. Vchod do jaskyne v apríli roku 2017. Foto: P. Holúbek

Fig. 5. Entrance of the cave in April 2017. Photo: P. Holúbek

s výdatnosťou rádovo dl.s⁻¹. Z tohto otvoru tesne popod povrch (cca 2 m), ktorý kopíruje, vedie po spádnici tesný kanál, ktorý bol v roku 2005 prielezný do dĺžky 12 metrov. Voda z tejto lokality vyteká po 67 metroch toku v podzemí na povrch v minulosti zachytenom prameni, ktorý dnes ústi do umelého riečiska tečúceho po vrstevnici do osady Beniky. Kanál jaskyne Dielnice je vytvorený v piesčitej hline okrovej farby. Nad touto hlinou v nadloží leží čierna humusovitá zem s mocnosťou do 40 cm. ktorá je sypká, bez kamenných útvarov. V minulosti sa práve tento nesúdržný materiál sypal do podzemia, zväčšoval vstupnú depresiu a zanášal podzemie. Išlo však o proces relatívne pomalý, odhadom išlo iba o niekoľko centimetrov za rok Mimoriadne silná zima a následné prívaly vody z topiaceho sa snehu však v jarnom období roku 2017 spôsobili, že depresia sa po zime rozšírila zrútením v dĺžke okolo 2 metre a potom po aprílových záplavách o ďalší meter, čo svedčí o pomerne dynamických zmenách podzemia tejto lokality.

Diera v Oslivčení

Vchod do tejto lokality sa nachádza v nadmorskej výške 816 metrov. Jej zemepisné súradnice v JTSK x – 1183721,62; y – 379561,952. Z čerstvého prepadliska s rozmermi $2 \times 0,5$ m vedie v hline vytvorený kanál priamo na juh. Po troch metroch je ukončený hlineným kužeľom, pochádzajúcim z neďalekej terénnej de-



Obr. 6. Celkový pohľad na depresiu jaskyne Dielnice s vyznačením výveru. Foto: P. Holúbek Fig. 6. Overall view of depression of the Dielnice Cave with indication of spring. Photo: P. Holúbek

presie, ktorá nemá otvor do podzemia. Nezaregistrovali sme tu aktívny vodný tok. Oblasť, v ktorej sa táto lokalita nachádza, predstavuje prevažne lúčnu plochu, kde sú prejavy sufózie v oblasti s približnou rozlohou 200 × 600 m. Nachádza sa tu niekoľko čerstvých depresií bez otvoru do podzemia a plytký závrt s priemerom 30 metrov. Jeho dno tvorí blatisté močiarovité jazierko vcelku pravidelného tvaru s odhadovaným priemerom 2 metre.

NÁČRT GENÉZY PODZEMNÝCH PRIESTOROV

V oblasti severozápadne od Liptovských Beharoviec je vytvorená oblasť s veľkosťou niekoľkých desiatok hektárov, kde sú poväčšine na lúkach vytvorené depresie a sústredené vývery vôd. Aj v oblasti severne od obce Bobrovec je podobná oblasť s depresiami a jaskyňou, kde aktívne prebieha proces sufózie. Táto skutočnosť je spôsobená tým, že v kvartérnych sedimen-



Obr. 7. Výver vôd na povrch zo zvodnenej štruktúry južne od lokality Dielnice. Foto: P. Holúbek Fig. 7. Resurgence of water from the water-bearing structure south of the Dielnice locality. Photo: P. Holúbek



Obr. 8. Vchod do prepadliska, v ktorom sa nachádza Diera v Oslivčení. Foto: P. Holúbek Fig. 8. Entrance of the sinkhole in which Diera v Oslivčení is located. Photo: P. Holúbek

toch na tomto území je pod pôdnym krytom vytvorená vode málo priepustná vrstva, po ktorej stekajú atmosférické zrážky do údolia. Je možné, že táto vodou priepustná vrstva hliny sa nachádza na nepriepustných flyšových pieskovcoch, ktoré sú v podloží. Toto tvrdenie však treba dokázať sondou. Keď sa táto vrstva pretne s povrchom, vzniká tu prameň. Najväčší z nich v oblasti zvanej Dielnice má výdatnosť až 1-3 l.s⁻¹. Na tento prameň je napojený pre človeka prielezný kanál, preskúmaný jaskyniarmi v roku 2006, ktorý vznikol sufóznymi procesmi vyplavovania hliny z podzemia. Pre zaujímavosť touto lokalitou preteká iba časť vody (odhad 20 %), ktorá vyteká v zachytenom prameni, takže proces pretekania vody po nepriepustnej vrstve je podstatne väčší, ako je známe. O tom, že tu aktívne prebiehal a aj v súčasnosti prebieha proces sufózie, svedčia i depresie v širšom okolí nad prameňom. Podľa ústnych informácií starších obyvateľov Liptovských Beharoviec sa v oblasti severozápadne od ich obce v minulosti vyskytovali náhle prepady pôdy, ktoré sa však kvôli koseniu lúk



Obr. 9. Závrt v oblasti Oslivčenia severne od obce Bobrovec. Foto: P. Holúbek Fig. 9. Sinkhole in the Oslivčenie area, north of the village of Bobrovec. Photo: P. Holúbek
a paseniu oviec zasýpali. To svedčí o rozsiahlom procese vzniku sufóznych podzemných priestorov v tejto oblasti.

ZÁVER

V oblasti Liptovských Beharoviec, v podhorí Západných Tatier, v oblasti s dĺžkou asi 2 kilometre a šírkou 200 – 300 metrov, prebieha proces sufózie, ktorý je sprevádzaný javmi ako vznik prepadlísk, ponorov a existenciou sústredených výverov podzemných vôd. Ide o dej podobný klasickému krasovateniu, kde sa v podzemí koncentrujú atmosférické vody a vznikajú podzemné priestory. Tento proces je však oveľa rýchlejší, medzi vznikom a zánikom podzemných priestorov ubehnú iba desiatky rokov. Podobná situácia vznikla na lúke zvanej Oslivčenie severne od obce Bobrovec. V okolí obcí v predhorí Nízkych Tatier (Liptovské Sliače, Liptovské Vlachy, Lazisko) alebo Chočských vrchov (Prosiek) je tento proces rozšírenejší, ako by sa zdalo na prvý pohľad. Nie vždy tu však vznikajú prepadliská a pramene vôd, ale výsledkom zvodnenia vrstvy ílovitej hliny nad málo priepustnou vrstvou sú rozsiahle zosuvy, ktoré ohrozujú lúčne hospodárenie, ale aj majetok. Tieto javy by si v budúcnosti zaslúžili väčšiu pozornosť inžinierskych geológov, pretože ich rozsah sa bude pravdepodobne iba zväčšovať.

LITERATÚRA

- Bella, P., Hlaváčová, I., Holúbek, P. 2013. Zoznam jaskýň Slovenskej republiky (stav k 31. 12. 2013). SMOPaJ, Liptovský Mikuláš.
- Gross, P., Köhler, E. a kol. 1980. Geológia Liptovskej kotliny. GÚDŠ, Bratislava, 242 s.
- Holúbek, P. 2006. Nová jaskyňa v Liptovských Beharovciach alebo Môže byť vytvorená jaskyňa v hline? Spravodaj SSS, 37, 4, 36–37.
- Holúbek, P., 2008: Sufosion (piping) cave in thefoothill of the West Tatras in Slovakia. Zacisk, Numer specjalny, 9th International Symposium on Pseudokarst, 24–26th May 2006, Bartkowa, Beskidy Mts., Poland, Bielsko-Biała, 18–19.

AL HOOTA, OMÁN – JEDINÁ SPRÍSTUPNENÁ JASKYŇA NA ARABSKOM POLOSTROVE

PAVEL BELLA

Štátna ochrana prírody SR, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš; pavel.bella@ssi.sk

Katolícka univerzita v Ružomberku, Pedagogická fakulta, Katedra geografie, Hrabovská cesta 1, 031 04 Ružomberok; Pavel.Bella@ku.sk

P. Bella: Al Hoota, Oman - the only show cave in the Arabian Peninsula

Abstract: The Al Hoota Cave (Jabal Akhdar Mountains, Northern Oman), opened to the public in 2006, belongs to the most famous natural phenomena in Oman. It has originated by sinking stream in Cretaceous limestone, between the blind wadi Al Hoota and the ocassional resurgence Al Fallah (so-called "underground wadi" controlled mostly by bedding planes of limestone). Several lakes occur in the main drainage route that is periodically invaded by floodwaters. In 2012 - 2016, the cave was closed due to the damage of technical facilities caused by occasional floods. Fluvially modelled drainage conduits are featured mostly by phreatic morphology. In the lower end of the cave system, the ancient Fossil Cavern with several generation of speleothems and morphology changed by slab breakdown is intersected by invasion riverbed. Based on our observation of the cave in November 2016, vertical paragenetic half tubes developed at the contact of former fluvial sediments with a limestone wall, as well as small shallow cylindrical holes (resembling with bell holes) probably deepened upward by condensation corrosion, were recognized. Here, they are described as an additional contribution to the study of morphology of this more-phased cave system. In this karst area, carbonate speleothem growth occurred mainly during the continental pluvial periods extending back over the past four of glacial-interglacial cycles. The Al Hoota Cave, with many geological, geomorphological, hydrological, as well as biospeleological values, is a very important karst underground landform used as an educational site within the evolving geotourism in Oman.

Key words: show cave, geotourism, karst geomorphology, blind wadi, throught cave system, flash flood, cave morphology, speleogenesis, paragenetic features, condensation corrosion

ÚVOD

Jaskyňa Al Hoota patrí medzi významné a moderne upravené turistické destinácie v Ománe, kde rozvoj a propagáciu turizmu výrazne podporuje tamojší sultanát (jaskyne v Ománe sú vo vlastníctve štátu). Prevádzkovatelia tejto sprístupnenej jaskyne sa snažia získať a vhodne využívať praktické skúsenosti s ochranou a prevádzkovaním sprístupnených jaskýň vo svete.

Jaskyňu sme si prezreli počas konferencie Medzinárodnej asociácie sprístupnených jaskýň (ISCA), ktorá sa konala v Ománe v dňoch 5. – 12. 11. 2016. Keďže pre slovenskú komunitu je táto jaskyňa pomerne málo známa, podávame je základnú charakteristiku. Pritom pridávame niekoľko doplňujúcich poznámok k morfológii a genéze výverovej časti jaskyne, ktorá je sprístupnená pre verejnosť. Okrem morfológie, genézy a krasovej hydrografie je táto jaskyňa pozoruhodná aj rôznorodosťou a bohatosťou sintrovej výplne. ako aj vzácnou jaskynnou faunou.

POLOHA



Obr. 1. Poloha jaskyne Al Hoota Fig. 1. Location of the Al Hoota Cave

Jaskyňa Al Hoota sa nachádza v severovýchodnej časti Ománu, severozápadne od Nizwy (región Ad Dakhiliyah), 8 km VJV od Al Hamry (obr. 1). Orograficky leží na južnom okraji pohoria Jabal Akhdar, ktorého najvyššie vrcholy presahujú výšku 3000 m n. m. (nadmorská výška južného vrcholu Jabal Shams je 3009 m). Pohorie Jabal Akhdar je súčasťou horskej sústavy Al Hajar, tiahnucej sa severovýchodným Ománom a východnou časťou Spojených arabských emirátov (Al Hajar je najvyšším pohorím na Arabskom polostrove).

Jaskyňou Al Hoota sa zjednodušene označuje jaskynný systém Al Hoota – Al Fallah, ktorý je zameraný v dĺžke 4975 m (obr. 2). V aridných a semiaridných oblastiach patrí medzi najdlhšie podzemné wádí na svete. Jeho podzemné priestory sú súvisle preskúmané od ponoru v závere slepej doliny Al Hoota (990 m n. m.), nachádza-



Obr. 2. Pôdorys a bočný priemet jaskynného systému Al Hoota – Al Fallah (podľa Walthama et al., 1985)

Fig. 2. Ground plan and side projection of the Al Hoota Cave – Al Fallah cave system (after Waltham et al., 1985)

júcej sa pri rovnomennej dedine na krasovej planine, až po občasnú vyvieračku Al Fallah (730 m n. m.) ústiacu do doliny Wadi Ghubrat Tanuf. Hlavný dolný vchod, predstavujúci bývalú vyvieračku, je vo výške asi 750 m n. m. Vertikálny rozsah jaskynného systému je 262 m, jeho najnižšiu časť tvoria spodné zaplavené časti freatických šachtovitých puklín (Waltham et al., 1985). Sprístupnená je výverová časť jaskynného systému, vrátane staršej fosílnej vetvy, v dĺžke asi 500 m.

SPELEOLOGICKÝ PRIESKUM

Ľahšie dostupné časti pri vchodoch do jaskynného systému Al Hoota – Al Fallah boli miestnym obyvateľom dávno známe, najmä s cieľom hľadania vodných zdrojov. Prvý súvislý prechod z ponorovej až po výverovú časť jaskynného systému uskutočnil Angličan Doug Green s vojakmi z Ománskej armády až v roku 1977. Doplňujúci speleologický prieskum a zameranie jaskynného systému vykonali anglickí jaskyniari v polovici 80. rokov minulého storočia (Waltham et al., 1985).

GEOLOGICKÁ STAVBA

Jaskynný systém Al Hoota – Al Fallah je vytvorený v stredno- až vrchnokriedových vápencoch (alb – turón) formácie Natih (Waltham et al., 1985; Hanna a Al-Belushi, 1996), ktorá je spodnou formáciou skupiny Wasia patriacej do superskupiny Hajar (Van Buchem et al., 2002). Súvrstvie vápencov je mierne sklonené na juh (5 – 15°). Tvorí mierne sklonenú štruktúru dvíhajúcu od okraja do centrálnej antiklinálnej časti pohoria Jabal Akhdar (pomerne málo členitý terén nad jaskyňou a okolo slepej doliny Al Hoota má vzhľadom na mierny sklon charakter krasovej planiny, avšak je prevažne štruktúrne podmienený; obr. 3). Antiklinála pohoria Jabal Akhdar sa zvrásnila vo vrchnej kriede, pričom ofiolitový štít (sekvencia hornín tvoriaca oceánsku zemskú kôru a časť vrchného plášťa, skladajúca sa z bázických a ultrabázických láv a menších intrúzií) bol nasunutý (obdukcia) na skôr uložené sedimenty (Mann a Hanna, 1990; Hanna, 1990). V dôsledku tektonického stresu boli karbonáty rozlámané.

Vznik podzemných priestorov jaskynného systému Al Hoota – Al Fallah (na okraji antiklinálneho pohoria) podmienili najmä medzivrstvové plochy vápencov. Smer niektorých chodieb a vznik väčších dómov a siení predurčili zlomy a iné poruchy (Waltham et al., 1985; Hanna a Al-Belushi, 1996; Pavuza et al., 1998).



Obr. 3. Východná časť krasovej planiny v pohorí Jabal Akhdar. Foto: P. Bella Fig. 3. Eastern part of the karst plateau in the Jabal Akhdar Mountains. Photo: P. Bella

HYDROGRAFIA, MORFOLÓGIA A GENÉZA JASKYNE

Hlavnú chodbu jaskynného systému tvorí drenážna spojnica medzi ponorom v závere slepej doliny Wadi Al Hoota (pod 60 m vysokou skalnou stenou; obr. 4) a občasnou vyvieračkou Al Fallah. Plocha povodia, z ktorého sa voda ponára v závere slepej doliny, je 28 km² (Waltham et al., 1985). Aj v suchom období bez zrážok sú v jaskynnom systéme dve väčšie jazerá (v severnej a juhozápadnej časti). Hlavné jazero (Main Lake) v juhozápadnej časti je dlhé asi 800 m, široké do 10 m a hlboké do 15 m. Objem vody v tomto jazere sa odhaduje najmenej na 15 000 m³ (Waltham et al., 1985). Jazerá sa pravdepodobne vytvorili nad nepriepustnými vrstvami bridlíc, ktoré sú v podloží vápencov (Hanna a Al-Belushi, 1996). Teplota vody v jazere je 21–23 °C (Waltham et al., 1985; Pavuza et al., 1998; Hanna a Al-Belushi, 1996). Hlavné jazero leží asi 40 m a občasná vyvieračka Al Fallah asi 15 m nad občasným riečiskom v priľahlej doline Wadi Ghubrat Tanuf (Waltham et al., 1985).



Obr. 4. Záver slepej doliny Wadi Al Hoota s ponorom (jaskynným vchodom). Foto: P. Bella Fig. 4. End of the blind valley Wadi Al Hoota with a sink (cave entrance). Photo: P. Bella

Najmä v spodných častiach jaskyne, ktoré bývajú občasne zaplavované, dominuje freatická morfológia (plytké freatické drenážne prúdnice) s početnými stropnými hrncami. Klesajúce subhorizontálne úseky chodieb sú oddelené kaskádovými stupňami. Tunelové chodby sú miestami široké viac ako 25 m a vysoké do 12 m. Širšie chodby, ako aj dómy a siene sú remodelované rútením (prevažne platňové rútenie pozdĺž medzivrstvových plôch). Na viacerých miestach sú kopovité akumulácie zrútených vápencových blokov, v dosahu povodní sú sčasti zaoblené prúdiacou vodou. Vadózne podlahové kanály sa vytvorili iba miestami v priponorovej časti jaskynného systému, zväčša sú pokryté jemnými povodňovými sedimentmi. Znížené úseky chodieb bývajú počas povodní zaplavené. Počas povodní, v priemere raz alebo dvakrát ročne, môže jaskynnými chodbami pretekať vodný tok s prietokom viac ako 100 m³.s⁻¹. Pri spodnom okraji Hlavného jazera je asi 10 m vysoký val štrku, ktorý na zrútené vápencové balvany naplavili prívalové vody (Waltham et al., 1985). Po poklese povodňovým riečiskom.

V dolnej, koncovej časti jaskynného systému (pred občasnou vyvieračkou Al Fallah) povodňové riečisko pretína staršiu fosílnu vetvu (Fossil Cavern) dlhú cca 300 m, ktorá stúpa pozdĺž medzivrstvových plôch vápencov a končí sa mohutnou depozíciou sintrov (Waltham et al., 1985). Pravdepodobne predstavuje fragment starej drenážnej chodby, pod ktorou sa vytvorila terajšia hlavná chodba jaskynného systému medzi spomenutým ponorom a vyvieračkou. Fosílna vetva je miestami široká až 30 – 40 m, jej prevažne mierne sklonený plochý strop tvoria vrstvové plochy vápencov. Tie predurčili prevažne platňové rútenie, ktorým sa miestami odhalili medzivrstvové kanály (*bedding-plane anastomoses*). Najmä pozdĺž tektonických porúch, presekávajúcich vrstvy vápencov, sa vo freatických podmienkach vytvorili stropné hrnce a im podobné vyhĺbeniny (obr. 5). Pôvodná freatická morfológia je značne zmenená skalným rútením stropu (odvaľovaním vápencových platní pozdĺž medzivrstvových plôch). Na zrútených vápencových platniach sa miestami kvapkajúcou vodou vytvorili korózne egutačné jamky.



Obr. 5. Stropné hrnce, Fossil Cavern. Foto: P. Bella Fig. 5. Ceiling pockets, Fossil Cavern. Photo: P. Bella

V dolnej časti fosílnej vetvy sú na západnom okraji širokej chodby (vedľa prehliadkového chodníka) vertikálne paragenetické žľaby vyhĺbené do vápencovej steny vodou prúdiacou na kontakte s bývalými sedimentmi (obr. 6A). Paragenézou sa označujú procesy vytvárania, resp. modelácie jaskyne vo freatickej zóne modifikované usadzovaním naplavovaných sedimentov (Renault, 1968; Farrant, 2004; Farrant and Smart, 2011 a ďalší). Paragenetické žľaby poukazujú, že táto časť jaskyne bola vyplnená sedimentmi, ktoré boli neskôr odplavené (viacfázový vývoj výverovej časti jaskynného systému). Vo fosílnej vetve navyše pozorovať viaceré generácie sintrovej výplne, skalných rútení a zvyšky jemných i hrubších naplavenín. Pri východnej stene chodby (oproti vertikálnym paragenetickým žľabom) je invázne občasné riečisko povodňových vôd (obr. 6B), vystlané vápencovým



Obr. 6. Vertikálne paragenetické žľaby (A), povodňové riečisko (B). Foto: P. Bella Fig. 6. Vertical paragenetic half tubes (A), flash flood riverbed (B). Photo: P. Bella



Obr. 7. Plytké slepé cylindrické vyhĺbeniny (iniciálne *bell holes*). Foto: P. Bella Fig. 7. Shallow blind cylindrical hollows (initial *bell holes*). Photo: P. Bella

opracovaným štrkom (vedie od spodného okraja Hlavného jazera smerom k vyvieračke). Do skalnej steny je vyhĺbené bočné koryto a meandrovité zárezy. Po okrajoch občasného riečiska sa vo vyšších polohách zachovali zvyšky scementovaných vápencových okruhliakov.

V sprístupnenej časti jaskyne nad dolným okrajom Hlavného jazera a okolo neďalekého vertikálneho komína vidieť na šikmých stropných plochách (vápencových vrstvách odkrytých platňovým alebo blokovým rútením) množstvo plytkých slepých cylindrických vyhĺbenín (hlbokých zväčša do 10 - 15 cm, s priemerom do 20 – 30 cm), ktoré nie sú predurčené puklinami ani inými poruchami podmieňujúcimi priesak alebo turbulentné prúdenie vody (obr. 7; rovnako ako vertikálne paragenetické žľaby neboli zatiaľ v jaskyni Al Hoota opísané). Morfologicky pripomínajú bell holes, ktoré sa vytvárajú kondenzačnou koróziou (Wilford, 1966; Tarhule-Lips a Ford, 1998; Lauritzen a Lundberg, 2000; Lundberg a McFarlane, 2009 a ďalší). V jaskyni Al Hoota sa v čase mimo povodní voda z jazier stráca aj odparovaním zosilneným prúdením vzduchu, ktorý vanie dolu jaskyňou každé popoludnie v dôsledku ohrievania povrchu nad jaskyňou (Watham et al., 1985). Zvlhčený vzduch sa nad dolným okrajom Hlavného jazera dostáva aj do vyššie položených nezaplavovaných častí jaskyne a na vápencovom strope kondenzuje a vytvára tenký vodný povlak. CO, rozpustený vo vodnom povlaku vytvára mierne kyslý roztok kyseliny uhličitej a spôsobuje rozpúšťanie vápenca. Podobne pod spomenutým

vertikálnym komínom opakovane dochádza k zmenám teploty a vlhkosti vzduchu. Uvedené plytké oválne cylindrické vyhĺbeniny vznikli pravdepodobne kondenzačnou koróziou (prehlbovaním odspodu nahor) a predstavujú *bell holes* v počiatočnom štádiu vývoja.

SINTROVÁ VÝPLŇ A ZMENY KLÍMY

V starších, nezaplavovaných častiach jaskynného systému je bohatá sintrová výplň, najmä stalagmity, stalaktity, drapérie, stalagnáty, baldachýny či kaskádovité sintrové hrádze (obr. 8). Viaceré generácie sintrovej výplne sa vytvárali počas vlhkejších období glaciálno-interglaciálnych cyklov. Na základe datovania sintrov (metódou U-series) a analýz stabilných izotopov zo vzoriek sintrov odobratých z jaskyne Al Hoota sa zistilo, že najrýchlejšia tvorba sintrov prebiehala pred 6 – 10,5-tisíc rokmi (MIS 1, skorý až stredný holocén), 78 – 82-tisíc rokmi (MIS 5a), 120 – 135-tisíc rokmi (MIS 5e), 180 – 200-tisíc rokmi (MIS 7a) a 300 – 325-tisíc rokmi (MIS 9) (Burns et al., 1998, 2001; pozri tiež Neff et al., 2001 a Fleitmann et al., 2003, 2007). Najväčšie stalagmity dosahujú priemer až do



Obr. 8. Kalcitové sintrové výplne, Fossil Cavern: mohutné kvapľové útvary (A, B), plochá sintrová kopa (C) a kaskádovité sintrové hrádze (D). Foto: P. Bella Fig. 8. Calcite speleothems, Fossil Cavern: robust dripstones (A, B), flat carbonate mound (C) and rimstone dams (D). Photo: P. Bella

5 m (Hanna a Al-Belushi, 1996). Keďže v súčasnosti je v tamojšej oblasti aridná až semiaridná klíma (s ročným úhrnom zrážok 50 - 250 mm, v lete s priemernými mesačnými teplotami 33 - 35 °C, v zime 20 - 25 °C), kvaple sú zväčša inaktívne.

Priemerná teplota vzduchu v jaskyni je 26 °C (Fleitmann et al., 2003); Pavuza et al. (1998) uvádzajú krátkodobé klimatické merania v rozmedzí 22 – 24 °C. Keďže jaskyňa má horný a dolný vchod, ide o dynamickú jaskyňu, ktorou prúdi vzduch v závislosti od zmien tlaku vzduchu pri jej vchodoch otvorených na povrch (Hanna a Al-Belushi, 1996).

JASKYNNÁ FAUNA

V podzemných jazerách žije vzácna ománska slepá jaskynná ryba *Garra barreimiae* (Oman garra) z čeľade Cyprinidae, ktorá má ružovkastú farbu a je dlhá 3 – 5 cm (Banister

a Clarke, 1977; Banister, 1984). Najväčšia koncentrácia týchto rýb je v Rybom jazere (Fish Lake) v strednej časti jaskynného sytému (Waltham et al., 1985). Ide o endemitný druh horských oblastí vo východnej časti Spojených arabských emirátov a severného Ománu. V jaskynnom systéme Al Hoota – Al Fallah žije množstvo ďalších druhov fauny vrátane netopierov (*Rhinopoma muscatellum*), článkonožcov, mäkkýšov, pavúkov, slimákov či vodných chrobákov (*Aglymbus gestroi*) (Neubert a Frank, 1996; Frank, 1998; Jäch a Diaz, 2000; Jäger, 2006 a ďalší). Viaceré z nich sú endemitnými druhmi a vyžadujú si dôslednú ochranu.

SPRÍSTUPNENIE, PREVÁDZKA A OCHRANA JASKYNE

Projekt sprístupnenia výverovej časti jaskynného systému bol vypracovaný v spolupráci s výskumníkmi a odborníkmi z Prírodovedného múzea vo Viedni (Mais et al., 1995; Seemann Ed., 2001; Seemann a Al Maskery, Eds., 2002; Kollmann et al., 2007). Pre verejnosť jaskyňu otvorili v decembri 2006. Z dôvodu poškodenia technických zariadení v spodnej časti prehliadkovej trasy občasnou povodňou bola jaskyňa v rokoch 2012 – 2016 uzatvorená. Po renovácii poškodených zariadení, ktorú realizovala štátna agentúra Omran, jaskyňu opätovne otvorili pre verejnosť v septembri 2016. Ročná návštevnosť jaskyne pred jej dočasným zatvorením v roku 2012 bola okolo 75-tisíc osôb. Z dôvodu ochrany jaskyne môže do jej podzemia denne vstúpiť maximálne 750 návštevníkov.



Obr. 9. Vstupný areál jaskyne Al Hoota (A), geologické múzeum (B) a vlaková preprava návštevníkov (C a D). Foto: P. Bella Fig. 9. Visitor centre of the Al Hoota Cave (A), geological museum (B) and train transport of visitors (C and D). Photo: P. Bella Jaskyňa má moderný polyfunkčný vstupný areál s náučnou expozíciou (geologickým múzeom), prednáškovou miestnosťou, predajňou suvenírov i reštauráciou (obr. 9A a B). Zo vstupného areálu sa návštevníci do jaskyne (trasa dlhá 1 km) a späť prepravujú špeciálnou klimatizovanou vlakovou súpravou (jediná elektrifikovaná vlaková trať v Ománe; obr. 9C a D). Do jaskyne vstupujú tunelom dlhým 130 m (vyrazeným zboku nad terajšou vyvieračkou), do ktorého vchádza aj vlaková súprava. V čase záplav voda vyteká z jaskyne aj cez tento tunel. Elektricky osvetlená prehliadková trasa, so svetelnými úsekmi a limitovanou mierou osvetlenia, meria 820 m (Kollmann et al., 2007). Tvorí ju betónový chodník s antikorovým zábradlím. Aby do jaskyne nevnikli nepovolané osoby, pôvodné vchody sú zahradené plotom, v ktorom sú vletové otvory pre netopiere.

Prehliadka jaskyne trvá asi 45 minút, sprievodné slovo podávajú v anglickom a arabskom jazyku. Okrem estetických pohľadov na tajuplné podzemie jaskyne sa návštevníci oboznámia s jej vznikom a vývojom, zákonitosťami podzemnej krasovej hydrografie, tvorbou rozličných foriem sintrovej výplne, ako aj s osobitosťami jaskynnej fauny. Prehliadku jaskyne vhodne dopĺňa náučná expozícia vo vstupnom areáli.

ZÁVER

Vďaka viacerým prírodným pozoruhodnostiam je jaskyňa Al Hoota zaujímavou a atraktívnou náučnou lokalitou, jedinečnou v rámci rozvíjajúceho sa geoturizmu v Ománe. Vzhľadom na jej polohu v aridnej až semiaridnej oblasti je táto jaskyňa zaujímavá aj z hľadiska jej vzniku a vývoja (podzemné wádí nasledujúce za ponorom na konci slepej doliny) vrátane paleoklimatických štúdií rekonštruujúcich bývalé podmienky krasovatenia a speleogenézy na Arabskom polostrove. Výskytom niektorých endemických druhov je jaskyňa významná aj z biospeleologického hľadiska. Ako jediná sprístupnená jaskyňa v Ománe aj na celom Arabskom polostrove rozširuje ponuku turistických atrakcií, ktoré môžu navštíviť najmä turisti zdržiavajúci sa v Muskate a jeho širšom okolí, najmä v Nizwe, vzdialenej od Muskatu asi 140 km. Nizwa je jedným z najstarších miest Ománu s viacerými historickými pamiatkami (v 6. a 7. storočí bola hlavným mestom Ománu). Sprístupnenie jaskyne Al Hoota významne prispelo k rozvoju geoturizmu v severovýchodnej časti Ománu, najmä v regióne Ad Dakhiliyah. Je jedným z úspešne realizovaných dlhodobých zámerov rozvoja turizmu v Ománe.

LITERATÚRA

- Banister, K. E. 1984. A subterranean population of *Garra barreimiae* (Teleostei: Cyprinidae) from Oman, with comments on the concept of regressive evolution. Journal of Natural History, 18, 6, 927–938.
- Banister, K. E., Clarke, M. A. 1977. The freshwater fishes of the Arabian Peninsula. The scientific results of the Oman Flora and Fauna Survey 1975. Journal of Oman Studies, 1977, 111–154.
- Burns, S. J., Matter, A., Frank, N., Mangini, A. 1998. Speleothem-based paleoclimate record from northern Oman. Geology, 26, 499–502.
- Burns, S. J., Fleitmann, D., Matter, A., Neff, U., Mangini, A. 2001. Speleothem evidence from Oman for continental pluvial events during interglacial periods. Geology, 29, 623–626.
- Farrant, A. 2004. Paragenesis. In Gunn, J. (Ed.): Encyclopedia of Caves and Karst Science. Fitzroy Dearborn, New York London, 569–571.
- Farrant, A. R., Smart, P. L. 2011. Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and paragenesis. Geomorphology, 134, 1–2, 79–93.

- Fleitmann, D., Burns, S. J., Mangini, A., Mudelsee, M., Kramers, J., Villa, I., Neff, U., Al-Subbary, A. A., Buettner, A., Hippler, D., Matter, A. 2007. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). Quaternary Science Reviews, 26, 1, 170–188.
- Fleitmann, D., Burns, S. J., Neff, U., Mangini, A., Matter, A. 2003. Changing moisture sources over the last 330,000 years in Northern Oman from fluid-inclusion evidence in speleothems. Quaternary Research, 60, 2, 223–232.
- Frank, C. 1998. Gastropoden aus dem Hoti-Höhlensystem (Oman). Die Höhle, 49, 2, 42–49.
- Hanna, S. S. 1990. The Alpine deformation of the Central Oman Mountains. In Robertson, A. H. F., Searle, M. P., Ries, A. C. (Eds.): The Geology and Tectonics of the Oman Region. Geological Society, London, Special Publication, 49, 341–359.
- Hanna, S. S., Al-Belushi, M. 1996. Introduction to the caves of Oman. Sultan Qaboos University, Ruwi, 128 p.
- Jäch, M. A., Diaz, J. A. 2000. Descriptions of eight new species of Hydraena (Coleoptera: Hydraenidae). Entomological Problems, 31, 1, 41–58.
- Jäger, P. 2006. A new Spariolenus species from caves in Oman first representative of the Heteropodinae in the Arabian peninsula (Araneae: Sparassidae). Bulletin of the British Arachnological Society, 13, 8, 309–313.
- Kollmann, H. A., Sattmann, H., Seemann, R. 2007. "Al Hoota", ein karst- und höhlenkundliches Forschungs- und Tourismusprojekt im Sultanat Oman. Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, Wien, 60, 107–113.
- Lauritzen, S. E., Lundberg, J. 2000. Solutional and erosional morphology. In Klimchouk, A. B., Ford, D. C., Palmer, A. N., Dreybrodt, W. (Eds.): Speleogenesis. Evolution of Karst Aquifers. National Speleological Society, Huntsville, Alabama, U. S. A., 408–426.
- Lundberg, J., McFarlane, D. A. 2009. Bats and bell holes: The microclimatic impact of bat roosting, using a case study from Runaway Bay Caves, Jamaica. Geomorphology, 106, 78–85.
- Mais, K., Pavuza, R., Seemann, R. 1995. Show caves in Oman. Feasibility Study. Ministry of Commerce and Industry for Tourism, Muscat and Museum of Natural History, Vienna, 91 p.
- Mann, A., Hanna, S. S. 1990. The tectonic evolution of pre-Permian Rocks, Central and Southeastern Oman Mountains. In Robertson, A. H. F., Searle, M. P., Ries, A. C. (Eds.): The Geology and Tectonics of the Oman Region. Geological Society, London, Special Publication, 49, 307–326.
- Neff, U., Burns, S. J., Mangini, A., Mudelsee, M., Fleitmann, D., Matter, A. 2001. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. Nature, 411, 290–293.
- Neubert, E., Frank, C. 1996. A new Gulella (*Gulella protruda* n. sp.) from Oman (Gastropoda: Pulmonata: Streptaxidae). Archiv für Molluskenkunde, 126, 1–2, 125–127.
- Pavuza, R., Seemann, R., Mais, K. 1998. Das Hoti-Höhlensystem im Akhadar-Gebirge (Oman). Die Höhle, 49, 2, 33–41.
- Renault, P. 1968. Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogenèse. Les facteurs sédimentologiques. Annales de Spéléologie, 23, 3, 529–596.
- Seemann, R. Ed. 2001. Al Hoti Cave System. Tourism and Research Project. Preliminary Study. Museum of Natural History, Vienna and Oman Geo-Consultants, Muscat, 55 p.
- Seemann, R., Al Maskery, S. A. J. Eds. 2002. Al Hoti Cave System, At Wilayat Al Hamra, Sultanate of Oman. Tourism and Research Project, Final Report. Museum of Natural History, Vienna, 152 p.
- Tarhule-Lips, R. F. A., Ford, D. C. 1998. Morphometric studies of bell hole development on Cayman Brac. Cave and Karst Science, 25, 3, 19–30.
- Van Buchem, F. S. P., Razin, P., Homewood, P. W., Oterdoom, W. H., Philip, J. 2002. Stratigraphic Organization of Carbonate Ramps and Organic-Rich Intrashelf Basins. Natih Formation (Middle Cretaceous) of Northern Oman. AAPG Bulletin (Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists), 86, 1, 21–53.

Waltham, A. C., Brown, D. D., Middleton, D. C. 1985. Karst and Caves in Jabal Akhdar, Oman. Cave Science, 12, 3, 69–79.

Wilford, C. E. 1966. "Bell holes" in Sarawak Caves. Bulletin of the National Speleological Society, 28, 4, 179–182.

AL HOOTA, OMAN - THE ONLY SHOW CAVE IN THE ARABIAN PENINSULA

Summary

The Al Hoota Cave lies in the southern part of Jabal Akhdar Mountains, northwest from Nizwa, near Al Hamra in the Ad Dakhiliyah Governorate. It is formed entirely in Cretaceous limestone (Albian – Turonian) of the Natih Formation that belongs to the Wasia Group (Van Buchem et al., 2002). The Al Hoota Cave is a fluvially modelled cave system between the blind wadi named Al Hoota (its name is derived from the nearby village) and the ocassional resurgence named Al Fallah. Major storm events produce flash floods through the cave system, on average only once or twice during year. The length of the cave system is 4,975 m with a vertical span of 262 m (Waltham et al., 1985).

Phreatic morphology is predominant in fluvially sculptured cave passages (ceiling pockets and other shapes originated below the water table, only minimal sings of vadose erosion). Several lakes occur in the cave system periodically invaded by floodwaters (the largest Main Lake is long ca 800 m, 10 m wide and to 15 m deep). The rare Omani blind cave fish *Garra barreimiae* lives in these underground lakes (Banister and Clarke, 1977; Banister, 1984). In the lower end of the cave system (in front of the occasional resurgence Al Fallah), the invasion riverbed intersects the older Fossil Cavern, which rises along bedding planes of limestone and upstream is blocked by massive dripstone and flowstone deposits (Waltham et al., 1985). It is a fragment of the ancient drainage route, ca 300 m long, remodelled mostly by breakdown in the vadose zone. Vertical paragenetic half tubes in the outflow part of the cave system were developed at the contact of former fluvial sediments with a limestone wall (they are one of morhological indicators of the more-phased development of the cave). Many small shallow cylindrical holes (resembling with bell holes) at the lower end of the Main Lake and around a nearby vertical chimney in the Fossil Cavern were probably deepened upward by condensation corrosion.

Rapid speleothem growth in the Al Hoota Cave occurred during the early to middle Holocene (6–10.5 ka B.P.) (MIS 1), 78–82 ka B.P. (MIS 5a), 120–135 ka B.P. (MIS 5e), 180–200 ka B.P. (MIS 7a), and 300–325 ka B.P. (MIS 9), i.e. during continental pluvial periods extending back over the past four of glacial-interglacial cycles (Burns et al., 2001).

In addition to the mentioned Omani blind cave fish *Garra barreimiae*, there are many other species of fauna in the Al Hoota – Al Fallah cave system including bats (*Rhinopoma muscatellum*), arthropods, molluscs, spiders, snails or water beetles (*Aglymbus gestroi*) (Neubert and Frank, 1996; Frank, 1998; Jäch and Diaz, 2000; Jäger et al., 2006). Many of them are endemic species, their consistent protection is needed.

The Al Hoota Cave was opened to the public in November 2006. The lower part of the cave system in the length only 500 m is accessible for the public, the tourit trail is long 860 m (Kollmann et al., 2007). It becomes one of important natural tourist destination in Oman, its attedance has been nearly 75,000 visitors per year. Due to the damage of the technical facilities at the lower part of tourist trail caused by occasional floods, the cave was closed in 2012 - 2016. The cave is accessible by Oman's only electric train which runs from the visitor centre (with an interactive geological museum) to the cave. Thanks to many natural sights, the Al Hoota Cave is an interesting and attractive educational site, unique within the evolving geotourism in Oman.

SPOLOČENSKÁ KRONIKA – SOCIAL CHRONICLE

ZA MARCELOM LALKOVIČOM

V nedeľu decembrovú tam hore v doline v úžase zastal čas. Aj večný šum kvapiek v tej chvíli stíchol. (M. Lalkovič: Výkrik bez ozveny)



Dňa 20. decembra 2016 jaskyniarsku verejnosť zastihla šokujúca správa: následkom náhlej mozgovej príhody vo veku 72 rokov zomrel Ing. Marcel Lalkovič, CSc., banský merač, historik, muzeológ a básnik. Slovenské a medzinárodné jaskyniarstvo po Antonovi Droppovi tak stratilo ďalšiu významnú osobnosť. Takýto úder osudu vskutku nikto nečakal, veď na poslednej redakčnej rade nášho časopisu jemu vlastným uštipačným humorom obveseľoval kolegov sediacich okolo neho. Len tak z neho vyžarovala energia a my sme sa tešili na jeho ďalšie články o prekvapujúcich historických udalostiach tej-ktorej jaskyne.

Jeho odchodom zostalo v slovenskom jaskyniarstve mohutné vákuum, ktoré sa tak skoro určite nenaplní. Aj jeho protivníci totiž uznali, že predstavoval špičkového odborníka na dejiny speleológie na Slovensku. Rad-radom spracovával a publikoval históriu našich najcennejších jaskýň a očakávali sme, že z jeho písacieho stola čoskoro uzrie svetlo sveta aj veľká nová monografia o dejinách slovenského jaskyniarstva. Bez poznania histórie človek nevie reálne zhodnotiť prítomnosť a tobôž nie budúcnosť. Tak je to aj v prípade jaskýň a jaskyniarstva. Preto znamená odchod Ing. Lalkoviča ako človeka a ako historika-odborníka veľkú stratu.

Marcel Lalkovič sa narodil v ťažkých vojnových časoch 27. januára 1944 v Banskej Štiavnici. Ešte v detskom veku sa rodina presťahovala do Kysaku, kde Marcel skončil aj základnú školu. Strednú priemyselnú školu stavebnú a zememeračskú absolvoval už v Košiciach so špecializáciou na geodéziu a kartografiu. V štúdiu pokračoval na Baníckej fakulte Vysokej školy technickej v Košiciach, ktorú ukončil v roku 1967 ako banský merač. Po krátkodobom zamestnaní v Košiciach prešiel pracovať na stredisko geodézie do Liptovského Mikuláša a v roku 1970 nastúpil ako geodet do Múzea slovenského krasu. Tu sa začína jeho kariéra v oblasti múzejníctva i jaskyniarstva. Na začiatku sa podieľal na meračských prácach v rôznych jaskyniach, v rokoch 1974 – 1977 však absolvoval na Univerzite J. E. Purkyně v Brne postgraduálne štúdium v odbore muzeológia. Neskôr, v roku 1990, ukončil externú vedeckú ašpirantúru na Baníckej fakulte Vysokej školy technickej v Košiciach, kde mu bol udelený titul CSc. Postupne sa vypracoval na popredného odborníka v oblasti muzeológie. Stal sa vedúcim dokumentačného oddelenia múzea a v roku 1988 riaditeľom inštitúcie. Zaviedol jednotný systém dokumentácie v múzeu, v roku 1982 s kolegami založil súťažnú prehliadku jaskyniarskej fotografie s názvom Speleofotografia, je autorom Rámcovej metodiky tvorby špecializovaných expozícií ochrany prírody vo veľkoplošných chránených územiach, od roku 1993 začal vydávať odborný bulletin Sinter (ktorý vychádza doteraz), zaviedol systematický zber údajov o osobnostiach slovenského jaskyniarstva, podieľal sa na inventarizačnom výskume písomných prejavov v jaskyniach a je autorom alebo spoluautorom početných scenárov expozícií a výstav inštalovaných na viacerých miestach Slovenska i v zahraničí (náplň a názov múzea medzitým ministerskí úradníci zmenili na Múzeum vývoja ochrany prírody a potom na Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva). Jeho skúsenosti v oblasti múzejníctva využili aj vo Zväze múzeí na Slovensku, kde sa stal členom výkonného výboru, potom zastával funkciu tajomníka a v rokoch 1993 – 1997 aj predsedu. V rokoch 1990 – 1993 pôsobil aj vo výkonnom výbore Československej muzeologickej spoločnosti a od roku 2005 bol členom vedeckej rady Slovenského technického múzea v Košiciach. S múzejníctvom je spojená aj jeho pedagogická činnosť. Muzeológiu externe prednášal na filozofických fakultách Masarykovej univerzity v Brne a Univerzity Konštantína filozofa v Nitre. V roku 2001 sa však stal obeťou intríg, opustil múzeum a od roku 2002 do 2007 pôsobil ako pedagóg na Katedre ekomuzeológie Univerzity Mateja Bela v Banskej Bystrici. Bol vedúcim niekoľkých bakalárskych, diplomových a rigoróznych prác a členom štátnicovej skúšobnej komisie.

Do speleologickej činnosti sa Marcel Lalkovič zapojil tiež pomerne skoro. Členom Slovenskej speleologickej spoločnosti sa stal hneď po jej novozaložení v roku 1970. V rokoch 1973 – 1976 bol tajomníkom spoločnosti, potom pokladníkom a v rokoch 1976 – 1991 ako predseda komisie pre speleologickú dokumentáciu bol aj členom predsedníctva. Spolu s Alfonzom Chovanom a Jozefom Hlaváčom určovali trend slovenského jaskyniarstva vtedajšej doby. Pamätám sa, keď sme ako mladí jaskyniari z Rimavskej Soboty chodili s každou speleologickou mapou za ním a trpezlivo nám vysvetľoval, kde sme v meraní robili chybu, čo na mape môžeme vylepšiť. Cítili sme úprimnú radosť, keď po nespočetných stretnutiach vyhlásil, že mapa jaskyne Podbanište je dobrá a môžeme s ňou vystúpiť na konferencii o dokumentácii jaskýň v Pribyline, ktorú organizoval v novembri 1983.

Ing. Marcel Lalkovič patril medzi málo Slovákov, ktorí sa zapojili aj do prác Medzinárodnej speleologickej únie (UIS). V rokoch 1973 – 1982 bol členom komisie pre bibliografiu, 1980 – 1982 aj komisie pre topografiu a kartografiu a v rokoch 1986 – 1989 zastával funkciu predsedu komisie pre krasové meranie a mapovanie. Jeho znalosti sa využili aj doma, bol členom autorského kolektívu Bezpečnostného predpisu Slovenského banského úradu č. 3000/1975 pre jaskyne (1973), Názvoslovnej komisie Speleologického poradného zboru Ministerstva kultúry SSR (1976 – 1980) a pôsobil ako koordinátor medzinárodnej spolupráce s Maďarskou republikou (1982 – 1989). Bol členom viacerých redakčných rád múzejných, jaskyniarskych a ochranárskych periodík (Poznaj a chráň, Ochrana prírody, Sinter, Chránené územia Slovenska, Slovenský kras, Naturae tutela, Múzeum, Zborník SNM Prírodné vedy, Acta Carsologica v Postojnej). Svoje poznatky prezentoval na viac ako 50 vedeckých konferenciách a iných odborných jaskyniarskych, ochranárskych alebo múzejníckych podujatiach. Je autorom textov videoprogramu Slovensko objektívom (1996) a scenára televíznej relácie Načúvanie ticha (1996). Mimoriadne rozsiahla je jeho publikačná činnosť. Je autorom niekoľkých odborných monografií, okolo 200 štúdií a odbor

ných článkov a vyše 250 popularizačných a iných článkov s tematikou jaskyniarstva, múzejníctva a ochrany prírody. Najznámejšia z nich je životopisná monografia Jána Majka, ktorá vyšla v roku 2001. Spoluautorsky sa podieľal na sérii brožúr o sprístupnených jaskyniach Slovenska a je autorom hesiel o jaskyniaroch v Biografickom lexikóne Slovenska. V roku 2011 zostavil bibliografiu Spravodaja Slovenskej speleologickej spoločnosti. Naposledy spracoval kapitoly o histórii do monografií Jaskyne Demänovskej doliny (2014) a Jaskynný systém Domica-Baradla (2014).

Mnohotvárnosť zosnulého vhodne podopiera jeho básnická tvorba. Poézii sa venoval od polovice 60. rokov minulého storočia, ale v čase Husákovej normalizácie literárny časopis Mladá tvorba zakázali a publikovať začal len od roku 1984. Vyšla mu básnická zbierka Svitanie jaskyne (1993), Disident lásky (1996), Jaskynná žena (1997), Potme cítim, dotýkam sa tmy (1997) a Kvapky ticha (2014). Venoval sa aj próze, napísal diela Močarisko (2013) a Príbehy spod Hradu (2014). Bol členom Spolku slovenských spisovateľov.

Ing. Marcela Lalkoviča, CSc., za jeho mimoriadne bohatú a mnohotvárnu činnosť ocenili jaskyniari, múzejníci i spisovatelia. Udelili mu čestné uznanie Slovenskej speleologickej spoločnosti (1979), pamätnú medailu Správy slovenských jaskýň (1980), striebornú medailu Slovenskej speleologickej spoločnosti (1982), čestné uznanie štátnej ochrany prírody (1988), pamätnú medailu Slovenského národného múzea (1994), zlatú plaketu Policajného zboru SR (1995), pamätnú medailu Trenčianskeho múzea (1997), pamätnú medailu Zväzu múzeí na Slovensku (1998), pamätnú plaketu mesta Liptovský Mikuláš (2006), cenu riaditeľa Správy jaskýň Českej republiky (2010), znovu striebornú medailu Slovenskej speleologickej spoločnosti (2014) a cenu primátora mesta Ružomberok (2014).

Marcel Lalkovič sa nesporne zaradil medzi najvýznamnejšie osobnosti slovenskej speleológie. Na poslednú cestu sme ho odprevadili 23. decembra 2016 na ružomberskom cintoríne. Veríme, že z nebeských výšok aj naďalej bude inšpirovať našich speleológov k bádaniu v nevyčerpateľnej studnici našej jaskyniarskej histórie.

Česť jeho pamiatke!

Ľudovít Gaál

SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA

RECENZIE – REVIEWS

Z. HOCHMUTH: ATLAS JASKYNE SKALISTÝ POTOK

Slovenská speleologická spoločnosť, Liptovský Mikuláš 2013, 80 strán, ISBN 978-80-970734-2-8

Spomínam si na Speleomíting Slovenskej speleologickej spoločnosti vo Svite spred niekoľkých rokov, kde v závere prednášky doc. RNDr. Zdenka Hochmutha, CSc. venovanej objave Horného vchodu do Jaskyne Skalistý potok defilovalo v rámci štatistiky prolongačných prác pred očami auditória priam každé jedno tak namáhavo "vyťažené" vedro. Skúsený jaskyniar a speleológ ošľahaný podzemnými prievanmi hádam z každého krasového kúta Slovenska komentoval tieto údaje s jemu vlastným stoickým nepokojom i osobitým humorom, ale sála stíchla od údivu. Nevedno, čo v tých chvíľach rezonovalo v mysliach prítomných jaskyniarov, ale nech to



bolo čokoľvek, dozaista sa tam vmiesil i obdiv. Triumvirát Hochmuth – Kovalik – Mikloš pôsobiaci (nielen) v Slovenskom krase už dlhé roky, položil latku jaskyniarstva výkonného, sofistikovaného, odborného i cieľavedomého tak vysoko, že ju možno ešte i celé generácie dobrovoľných jaskyniarov budú iba podliezať.

Publikáciu Atlas jaskyne Skalistý potok si netreba prečítať. Treba si ju osvojiť. Ako každé dielo, ktoré sa zrodilo ako výsledok náročnej práce v ešte náročnejších podmienkach má tú osobitosť, že všetko, čo sa čitateľ nedozvie v texte, dozvie sa medzi riadkami – stačí trocha predstavivosti. Napriek tomu, že som v Skalistom potoku bol dosiaľ len v častiach po prvý sifón, a spolu s autorom pri hľadaní vhodného miesta pre objav horného vchodu, dovolím si ju priblížiť ako jaskyniar venujúci sa systematickému speleologickému prieskumu a prolongácii v podmienkach Slovenského krasu.

Predkladané dielo má tzv. mäkkú obálku a lepenú väzbu. Graficky obálku, ktorú navrhol autorov syn Václav, na troch stranách spestrujú úvodné fotografie rožňavského jaskyniara J. Stankoviča a ortofotomapa južného svahu a časti Jasovskej planiny i časti Košickej kotliny s vyznačeným priebehom jaskyne Skalistý potok. Podklad, ktorý autorovi sprístupnila súkromná spoločnosť disponujúca súborom ortofotomáp doplnený o pôdorys ťahu jaskyne sprostredkúva zainteresovanému čitateľovi veľavravné indície o špecifikách vývoja Skalistého potoka, a zároveň komplikuje stereotypy o útrobách planín, s ktorými v podmienkach planinového krasu pracuje myseľ dobrovoľného jaskyniara. Publikáciu redigoval jaskyniar Mgr. Bohuslav Kortman a recenzovali ju zástupca riaditeľa SSJ, karsológ doc. RNDr. Pavel Bella, PhD. a pracovník SMOPaJ, jaskyniar Ing. Peter Holúbek. Graficky ju upravil jaskyniar Ján Kasák, zodpovedný aj za grafickú úpravu Spravodaja SSS. Obsahu publikácie zodpovedá špecifický formát, vzhľadom na to, že v nej dominuje mapové dielo. Táto adaptácia má rýdzo praktické dôvody a akceptuje ju každý čitateľ, ktorý sa rozhodne venovať posolstvu knihy. Rovnaké dôvody si vynútili i rozdelenie publikácie na textovú časť, v ktorej autor podáva základné informácie o jaskyni, jej doterajšom prieskume i dokumentácii, definícii podstatných speleologických problémov, štatistike i prehľadu literatúry, a na mapovú časť, ktorá zahŕňa schematický prevýšený profil južným svahom Jasovskej planiny aj s polohami iných relevantných jaskýň, prehľadnú mapu jaskyne s vyznačením kladu jednotlivých mapových listov, a napokon samotné mapové dielo - súbor mapových listov dokumentujúcich priebeh celej jaskyne v jednotnej mierke.

Vzhľadom na to, že textová časť nie je rozsiahla, a nie je problém sa v nej zorientovať, jednotlivé časti (kapitoly) nie sú očíslované; kvôli prehľadnosti sú názvy kapitol sádzané veľkým písmom a podkapitol malým písmom. V časti resp. kapitole Poloha a základná charakteristika jaskyne sa čitateľ okamžite zorientuje v priestore, kde sa príbeh jedinečného krasového útvaru odohráva. Zisťujeme, že Dolný vchod je pripojený

už aj na štátnu sieť, podobne ako zopár najvýznamnejších jaskýň v Slovenskom krase. Získame tu i predstavu o geologickej stavbe juhozápadnej časti Jasovskej planiny, v ktorej sa jaskyňa vytvorila i o topografii jaskyne, aká medzi vyše 1100 známymi jaskyňami v Slovenskom krase dosiaľ nemá analógiu. Kapitola o doteraz publikovaných informáciách o jaskyni je – prirodzene – veľmi stručná, vzhľadom na krátku históriu jaskyne a jej špecifický charakter. Prakticky všetky relevantné príspevky, ktoré si po celé roky udržiavajú vysokú odbornú úroveň i vysokú dokumentačnú hodnotu, publikovali autor a jeho pokračovatelia (Daniel Hutňan) v Spravodaji SSS či v zborníku Slovenský kras. Bezpochyby môžeme súhlasiť s autorom, že "ide o unikátnu jaskyňu, ktorá môže poslúžiť ako príklad pre rôzne štúdie z oblasti morfogenézy, tektoniky a krasovej hydrológie." História prieskumu je relatívne krátka, ale mimoriadne intenzívna. Vo vzťahu k náročnosti prieskumu a k hodnote výstupov z jednotlivých akcií, predstavuje podľa nášho názoru precedens. Skalistý potok nie je jaskyňa, kde sa dá bezcieľne motať, poprechádzať, robiť krasová turistika. Súdiac podľa opisu, každá akcia si vyžadovala dôsledné plánovanie, bola mimoriadne organizačne, časovo i logisticky náročná. Kapitola Metodika a priebeh mapovania jaskyne nám vysvetľuje dôvody, ktoré iniciovali mapovacie práce, rozsah i metodiku mapovacích prác. Je namieste zdôrazniť, že mapovanie v podmienkach sifonálnej časti jaskyne je z hľadiska praktických postupov i náročnosti neporovnateľné s analogickou činnosťou v jaskyniach, kde sifónov niet. Meracie pomôcky je nutné upraviť pre podmienky merania vo vode, a splniť istú triedu presnosti je za takýchto okolností sizyfovským úsilím – autor spomína napr. možnosť vplyvu magnetických anomálií v dôsledku prítomnosti kovových zásobníkov s dýchacou zmesou, alebo niekoľkonásobné odčítanie či kontroly po vyrovnaní uzavretého ťahu. Už len samotná stabilizácia bodov v týchto podmienkach by priemerného jaskyniara odradila od vízie presného zamerania jaskyne. Autor so svojimi spolupracovníkmi to však dokázal systematickým, metodickým a trpezlivým prístupom. V takejto veľkej jaskyni nemožno obísť ani problematiku magnetickej deklinácie a v príslušnej subkapitole sa čitateľ dozvie, ako sa s ňou v Skalistom potoku merači vysporiadali. Najrozsiahlejšou kapitolou je Morfológia priestorov jaskyne, ktorá opisuje všetky jej úseky, resp. časti zobrazené v mapovom diele, t.j. jej sifonálnu časť i stúpajúcu vetvu. Autor miestami pretkáva morfologický opis aj zmesou doplnkových informácií inej povahy, ktoré sa však vzťahujú ku konkrétnym úsekom jaskyne. Okrem toho, že to má vždy svoju informačnú hodnotu, zároveň to zvýrazňuje "chuť" textu, lebo pasážam venovaným morfológii treba venovať vždy viac trpezlivosti i čitateľského úsilia. Možno konštatovať, že autor zvolil vhodný rozsah i jazykovo vhodný štýl, a čitateľ sa v tejto kapitole určite nestratí. Je to v podstate sprievodný komentár k jednotlivým mapovým listom, a takto ho treba i využívať. Kto si dá tú námahu a vyhľadá si k príslušnému úseku jaskyne zobrazenom na mapovom liste aj textovú časť, môže sa virtuálne preniesť do útrob podivuhodného a komplikovaného jaskynného útvaru, kde sa počas svojho života nikdy nedostane (mienim sifonálnu časť), pokiaľ sa, samozrejme, nerozhodne venovať speleopotápaniu. V kapitole Vybrané problémy súvisiace s výskumom jaskyne upriamuje autor svoju pozornosť a diskutuje problematiku hydrogeologických súvislostí, výplň jaskyne (sedimenty, chemogénna výplň), mikroklímy i biospeleológie. Uzatvára ju "dnešným pohľadom na genézu jaskyne". Dokumentuje to autorovu dlhoročnú skúsenosť, jasnozrivosť aj intuíciu, lebo ako nik iný si uvedomuje komplexnosť prírodného divu Skalistého potoka v kontexte jeho vývoja v nadväznosti na vývoj Jasovskej planiny a vývoj Slovenského krasu ako celku. Dokazujú to aj tieto jeho riadky v záverečnej kapitole: "Iba pomaly a postupne spoznávame ťažko schodné priestory jaskyne Skalistý potok v južnej časti Jasovskej planiny. Výskum a prieskum jaskyne bude pokračovať aj po vydaní tejto publikácie. Hoci sa zdá, že speleologické problémy sa buď vyriešili, alebo sa pri ich riešení dosiahli isté subjektívne či objektívne hranice, tak ako v minulosti, aj v budúcnosti sa tieto limity posunú určite ďalej. Publikácia a mapy možno uľahčia orientáciu na problémy, ktoré zostali otvorené. Treba povedať, že ani po takmer tridsiatich rokoch nepovažujeme základné vedecké problémy za vyriešené – v priamom smere jaskyňa síce dosiahla ústie Hájskej doliny, no nevieme takmer nič o zdrojových oblastiach tejto časti ani o zdrojniciach a zbernej oblasti hlavného toku, tečúceho už pod povrchom planiny. Azda po otvorení ďalšieho vchodu alebo vchodov sa zlepší prístup na tieto miesta a po prieskume ďalších dosiahnuteľných častí jaskyne sa jej poznanie ešte prehĺbi." Textovú časť dopĺňa zoznam literatúry, ktorý autor zostavil z relevantných odborných príspevkov. Vo vzťahu k recenzovanej publikácii odporúčame prečítať si príspevky Z. Hochmutha a D. Hutňana. Okrem toho je tu uvedený i Prehľad mapovacích akcií s položkami ako dátum, vedúci a účastníci merania a názov zameranej časti. Zvlášť je uvedené mapovanie členmi ČSS a mapovanie po prerazení horného vchodu. Fotodokumentácia, ktorá je súčasťou publikácie, je rozptýlená v textovej časti a nemá uniformnú kvalitu. Je to, prirodzene, v dôsledku toho, že sifonálna časť kladie obrovské nároky na fotografovanie v špecifických podmienkach, a autor do knihy zakomponoval predovšetkým dokumentačné obrázky zo svojho archívu, ktoré však majú svoju historickú i výpovednú hodnotu pre svoju neopakovateľnosť. Najväčšia a najhlbšia jaskyňa Slovenského krasu si isto zaslúži (a hádam i vyžiada) výpravnú fotografickú publikáciu, aj keď vzhľadom na jej špecifický charakter v sifonálnej časti to bude extrémne náročné. Ťažšie už je naozaj len fotografovanie na Mesiaci.

Mapová časť (atlas) publikácie, predstavuje jej gros a obsahuje okrem vyššie spomenutého profilu i kladu listov plány jednotlivých úsekov jaskyne v pôdorysnom zobrazení, priemety na zvislú rovinu a profily (rezy). Pôdorys a rezy obsahujú vždy sieť (v jaskyni stabilizovaných) meračských bodov v podobe polygónového ťahu. Prítomné je názvoslovie jednotlivých častí jaskyne, označenie magnetického severu a zoznam mapérov v rámci príslušného mapového listu i presné dátumy, kedy bola konkrétna časť jaskyne zmapovaná. Sú to práve tieto stránky, kde každý, čo i len trochu zainteresovaný človek, vidí jaskyniarske všeumenie. Každý zameraný a zobrazený meter mapéri fyzicky prešli resp. preplávali v podmienkach, ktoré si máloktorý smrteľník dokáže predstaviť. A priniesli odtiaľ množstvo číselných údajov a poľných náčrtov, ktoré autor pretavil do súborného mapového diela. Osobitne treba zdôrazniť, že autorom podkladov pre mapové listy č. 12-20 je Daniel Hutňan, ktorý so svojimi spolupracovníkmi nadviazal na mapovanie Z. Hochmutha v r. 1993 a po roku 2000. Na mapovaní po prerazení Horného vchodu sa ako vedúci meraní okrem autora podieľali so svojimi spolupracovníkmi Stanislav a Norbert Dankovci, M. Manhart, sestry Gabriela a Františka Majerníčkové, Jaroslav Stankovič a Daniel Hutňan.

Poďakovaním v závere publikácie vyjadruje autor svoj vzťah k dobrovoľným jaskyniarom, z ktorých vzišiel, a ďakuje všetkým, ktorí "čo aj minimálne prispeli k prieskumu a budovaniu infraštruktúry jaskyne Skalistý potok". Ide o vyše 70 ľudí – slovenský potápačov a ich pomocníkov do r. 1996, českých speleopotápačov a jaskyniarov po r. 1999, ďalších speleológov pracujúcich od r. 2000 na prerážke Horného vchodu a speleológov pokračujúcich v prieskume po r. 2007.

Autor publikácie Atlas jaskyne Skalistý potok – Zdenko Hochmuth – má pravdu. Publikáciou sa nič nekončí, naopak, všetko sa začína. Okrem iného treba vyriešiť pôvod vôd v stúpajúcej i v priúpätnej vetve, chronologický rámec genézy oboch vetiev, ale i otázku jedinečnosti – existuje vôbec v Slovenskom krase analogická jaskynná štruktúra? Je materským telesom jaskyne Skalistý potok iba Jasovská planina? Autor so svojimi spolupracovníkmi sa už teraz venuje hydrologickým meraniam v jaskyni, kde vybudoval kombinovaný Thomsonov/obdĺžnikový priepad, ďalej meteorologickému monitoringu (meranie zrážkových úhrnov na plošine planiny dvomi prístrojmi), sleduje skvap, hodnotí infiltráciu a koncentrácie krasových vôd v masíve. Isto sa dočkáme ďalších hodnotných a atraktívnych prednášok, akou bola i tá na ostatnej konferencii v Liptovskej Sielnici.

Zostáva mi v krátkosti zhrnúť význam i posolstvo recenzovanej publikácie. Je to napriek malému formátu monumentálne dielo, lebo príkladným spôsobom dokumentuje pre bežného jaskyniara nepredstaviteľnú, vo vzťahu k podmienkam bádania bezprecedentnú a koncentrovanú zmes cieľavedomých a činorodých aktivít bádateľov hladných po poznaní, a to organizačných, prolongačných, objaviteľských, prieskumných, meračských, vedeckých, mentálnych či fyzických. Zostava mi len skloniť sa pred ním i pred jeho autorom v hlbokej úcte a vyjadriť úprimnú ľútosť, že som nemal možnosť priučiť sa jaskyniarstvu po boku všetečného, rojčivého, tvorivého, pýtajúceho sa, večne hľadajúceho, nezastaviteľného, trpezlivého, systematického a cieľavedomého ducha.

Gabriel Lešinský

Slovenský kras, ročník 55, číslo 1 Acta Carsologica Slovaca

Rok vydania:	september 2017
Vydanie:	prvé
Evidenčné číslo:	EV 3878/09
Vydavatel':	Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva a Štátna ochrany prírody
	Slovenskej republiky – Správa slovenských jaskýň, Liptovský Mikuláš
Sídlo vydavateľa	
a adresa redakcie:	Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva, Liptovský Mikuláš,
	Školská 4, 031 01 Liptovský Mikuláš, IČO: 361 45 114
Jazyková korektúra:	Mgr. Bohuslav Kortman (slovenský jazyk),
	Ing. Peter Gažík, Mgr. Juraj Littva, PhD., RNDr. Michal Rendoš, PhD.
	(anglický jazyk)
Anglické preklady:	autori príspevkov
Grafika:	Ing. Jiří Goralski
Tlač:	RNDr. Daniel Kollár, CSc. – DAJAMA, Obchodná 48, 811 06 Bratislava
Náklad:	400 ks
Cena:	Nepredajné
Obálka:	Korózne tvary jaskyne Zápoľná. Foto: J. Šanda

ISSN 0560-3137