

VYČLEŇOVANIE A TYPIZÁCIA GEOEKOLOGICKÝCH JEDNOTIEK JASKÝŇ S VYUŽITÍM MULTIVARIAČNÝCH ŠTATISTICKÝCH METÓD

Štefan Ratkovský*

* Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra fyzickej geografie a geoeológie, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava

Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš, ratkovsky@email.cz

Delimitation and typology of geoeological units in caves using multivariate statistical methods

The aim of this article is to create a procedure for delimitation and typology of geoeological units in caves. Caves are considered as geosystems, which are characterized by vertical (speleotopes) and horizontal (speleochores) spatial structure. The delimitation of a speleotope resides in determination of the most significant natural spatial boundaries among the leading natural components of a cave, which are mainly the speleorelief, then water or sedimentary fills. Summed geoeological values of speleotopes can be calculated from the normalized orthogonal state variables (X_j) by application of the statistical multivariate method – factor analysis. The speleotopes were consequently classified into geoeological types by application of cluster analysis and hierarchical typology. Choric units of the cave environment, consisting of speleotopes, which have geoeologically similar contents, are those sections of the cave where the same direction of the natural processes prevails, especially where geomorphological and hydrological processes are concerned.

Key words: cave, geoeological units, delimitation, typology, multivariate method

ÚVOD

Geoeologický prístup k výskumu jaskýň, vnímaných ako prírodné geosystémy, dáva široké možnosti na praktické uplatnenie výsledkov výskumu pri ochrane a optimalizácii využívania jaskýň. Účinná ochrana a vhodné využívanie jaskýň sú podmienené poznaním priestorovej štruktúry jaskynných geosystémov. V práci si preto kladieme za cieľ rozpracovať konkrétne kroky postupu geoeologického mapovania jaskýň pozostávajúceho z vyčleňovania, obsahového naplnenia a typológie prirodzených geoeologických jednotiek jaskýň usporiadaných do vertikálnej a horizontálnej priestorovej štruktúry. Účelom geoeologického výskumu a mapovania jaskýň je vytvorenie syntetizujúcej nadstavby k základným analytickým speleologickým údajom, zachytenie tesnej priestorovej previazanosti medzi skúmanými stavovými veličinami, podrobné poznanie priestorového usporiadania prírodných prvkov tvoriacich jaskynné prostredie a v neposlednom rade vyhodnotenie komplexnej obsahovej náplne geoeologických jednotiek jaskýň s využitím multivariačných štatistických metód. Aplikáciou geosystémového prístupu k výskumu jaskýň získavame komplexnejšie poznatky o jaskynnom prostredí. Nadväzujúc najmä na práce Bellu (1998 a 2008) sme predkladaný postup rozpracovali a prakticky testovali pri výskume Brestovskej jaskyne a jaskyne Štefanová (Ratkovský 2009a, 2009b, 2011 a

2012 a Kot'ková 2011), Drienovskej jaskyne a jaskyne Bobačka. Ukážky príkladov z výstupov geoeologického mapovania uvádzame z jaskyne Štefanová, v ktorej boli v minulosti uskutočnené viaceré speleologické výskumy zamerané na morfológiu a genézu jaskyne (Bella a Holúbek 1996), stopovacie skúšky a hydrografiú jaskyne (Haviarová 2008), ako aj početné speleologické objavy a prieskumy (Holík 1993 a 2009, Herich 2007, Holík a Herich 2012 a iní).

ZÁKLADNÉ TEORETICKO-METODOLOGICKÉ VÝCHODISKÁ

Jaskyne predstavujú špecifický podzemný geosystém a subsystém krajiny sféry, ktorý sa vyznačuje osobitými podzemnými formami reliéfu a osobitou cirkuláciou podzemných vôd, pričom reliéf a voda predstavujú vedúce prírodné prvky krasu (Jakál 1986 a 2002). Jaskyne ako podzemné prírodné geosystémy sa podľa Bellu (1998 a 2008) vyznačujú priestorovou vertikálnou (čiastkové a komplexné speleotopy) a horizontálnou štruktúrou (speleochory, súbory speleochor) a časopriestorovými zmenami (režim, sukcesívna dynamika a evolučný vývoj). Príklady priestorovej a chronologickej štruktúry vybraných jaskynných geosystémov na Slovensku uvádza Bella (2000). Poznatky o priestorovej štruktúre, časovo-priestorových zmenách a prírodných procesoch v jaskynných geosystémoch vytvárajú teoretický základ geoeologického výskumu jaskýň. Komplexný výskum jaskýň je výhodné založiť na geoeologických prístupoch a teoreticko-metodologickej základni uplatňovanej v povrchovej časti krajiny (Minár et al. 2001), ktorá vychádza z jednoznačného polohového priradenia nadobudnutých informácií, merania priamych a výpočtu odvodených charakteristík, získavania len prípustných prirodzených kombinácií sledovaných javov prostredníctvom integrálneho zberu údajov a z napĺňania obsahu základných geoeologických jednotiek. Uvedeným spôsobom je zabezpečené zachytenie tesnej previazanosti a podmienenosti všetkých prírodných prvkov navzájom.

VÝČLEŇOVANIE SPELEOTOPOV

Základné geoeologické jednotky jaskyne – speleotopy, predstavujú komplexné skoro rovnorodé priestorové a kartografické jednotky jaskynného prostredia s takmer rovnorodými litologickými, štruktúrno-tektonickými, morfológickými, morfometrickými, hydrologickými, speleoklimatickými a biospeleologickými pomermi (Bella 2008). Vymedzenie hraníc a obsahová náplň speleotopov je najdôležitejším krokom postupu z dôvodu určenia priestorovej platnosti stavových veličín získaných na výskumnom bode. Spôsoby vyčleňovania speleotopov v jaskynnom prostredí teoreticky vychádzajú z princípu vyčleňovania geoeologických jednotiek v povrchovej časti krajiny, kde sa najčastejšie používa naloženie máp čiastkových geokomplexov, hustá kroková sondáž prostredníctvom výskumných bodov a vedúce prvky regionalizácie (Minár et al. 2001). V prípade jaskýň je naloženie čiastkových máp prírodných prvkov uskutočniteľné len za predpokladu jestvovania mapových speleologicko-geografických podkladov, ktoré zvyčajne absentujú. Metóda hustej krokovej sondáže prostredníctvom výskumných bodov je uskutočniteľná len za predpokladu skúmania všetkých prírodných zložiek v požadovanej hustote a kvalite, čo je v prostredí jaskyne veľmi náročné. Geoeologicky vhodne rozčleniť jaskynné prostredie možno aj použitím upravenej metódy vedúceho (hlavného) prvku,

najčastejšie speleoreliéfu, prípadne viacerých prvkov (speleoreliéfy, hydrologické javy, jaskynné sedimenty). Prednosťou takéhoto postupu je integrita zberu hlavných charakteristík a získanie len prirodzených a logických kombinácií údajov o jaskynnom prostredí, ktoré sú potrebné na vymedzenie speleotopov prostredníctvom terénneho výskumu a speleologických máp.

Hlavný rozdiel medzi postupmi uplatňovanými pri regionalizácii v jaskyni a na povrchu krajiny tkvie v odlišnom type dostupných dát a ich následnom spracovaní. Základné spojené bodové pole nadmorských výšok (vrstevnice a kóty) a krajinná pokrývka, využívané ako vedúce prvky regionalizácie na zemskom povrchu, sú v prípade jaskýň najčastejšie nahradené kompasovým polygónovým ťahom medzi meračskými bodmi, pričom azimut, dĺžka a sklon predstavujú len líniovú informáciu o danom úseku jaskyne a nie presný priebeh tvaru speleoreliéfu. Jaskynný reliéf je prakticky veľmi obtiažne merateľný prostredníctvom postupov bežne používaných na povrchu (pozri Minár et al. 2001) vzhľadom na jeho výraznú členitosť, výskyt vertikálnych priestorov a striedanie tesných úžin, závalov alebo polosifónov s veľmi veľkými priestormi podzemných dómov. Zároveň v jaskyni na výskumnom bode zisťujeme najmä kvantitatívne stavové veličiny viažuce sa na podlahu, bočné steny a strop jaskynného priestoru, čo nutne vyžaduje úpravu postupov používaných pri výskume povrchovej časti krajiny.

Postup vedúci k vymedzovaniu základných priestorových geoeologických jednotiek jaskýň – speleotopov vychádza z prípravnej časti geoeologického mapovania jaskýň, ktorý pozostáva zo speleologického prieskumu, speleologického zameriavania, mapovania, zobrazovania a základnej morfometrickej analýzy jaskynných priestorov (napr. Goran 1991, Bella 1995 a 2006 a Iguzquiza et al. 2011). Základný princíp rozčleňovania jaskynného priestoru na prirodzené jednotky vychádza z určenia najvýraznejších priestorových rozhraní vo vedúcich prírodných prvkoch jaskyne (speleoreliéfe, prípadne hydrologických javov a sedimentárnej výplne). Vzájomná hranica medzi speleotopmi je vytýčená v takých miestach jaskyne, kde dochádza k najvyššie možnej zistiteľnej priestorovej zmene medzi hodnotami vlastností vedúcich prírodných prvkov jaskynného prostredia. Pri zohľadnení zvláštností jaskynného prostredia možno daný postup uplatniť aj pri geoeologickom mapovaní jaskýň. Vyčleňovanie speleotopov uskutočňujeme v nasledovných krokoch:

1. Predbežné vyčlenenie priestorových jednotiek

Speleotopy predbežne vymedzíme do základnej podkladovej speleologickej mapy jaskyne na základe predbežného speleologického prieskumu. Hranicu zakreslíme v miestach výrazného zalomenia smeru pozdĺžnej osi jaskynných chodieb, ďalej v miestach s náhlou zmenou sklonu stropu, prípadne podlahy, v miestach s výrazným zúžením alebo rozšírením jaskynných priestorov a v miestach výrazných vodných a sedimentačných rozhraní.

2. Určenie hlavného prvku – prvkov a výber vymedzovacích znakov

Voľba hlavného prírodného prvku, prípadne prvkov jaskynného prostredia, je závislá najmä od morfologického a genetického typu jaskyne. Za hlavné (vedúce) prírodné prvky pri vymedzovaní základných geoeologických jednotiek jaskynného prostredia – speleotopov, vychádzajúc z práce Minára (1998), môžeme určiť len tie, ktoré spĺňajú nižšie uvedené predpoklady a následne

pristúpime k ich hierarchickému usporiadaniu na základe nasledovných podmienok: a) najvyššia priestorová rôznorodosť hlavného prvku pozorovateľná v celom priestore jaskyne umožňuje obsiahnuť priestorové usporiadanie menej priestorovo rôznorodých prvkov, b) pomerná časová nemennosť (stálosť) hlavného prvku vzhľadom na ostatné jaskynné prvky, c) pomerne dostupný, jednoduchý a vierohodný spôsob získavania informácií o skutočnom priestorovom rozložení stavových veličín hlavného prvku jaskynného prostredia a d) hlavný prvok má byť väzbami čo najsilnejšie spätý s ostatnými prírodnými prvkami jaskyne.

3. Vytýčenie hraníc speleotopov

V mieste, kde možno najvyššie zistiť priestorové nespojitosti v hodnotách hlavných prírodných prvkov, vzhľadom na danú mierku mapovania (zvyčajne 1:200 až 1:500), vytýčime trojrozmerné vnímanú hranicu speleotopu. Hranice speleotopu pozostávajú z povrchu na materskej hornine a sedimentoch a z okrajových kontaktných priečnych profilov (Bella 2006).

3.1. Pozdĺžne hranice, prirodzene kopírujúce povrch horniny oddeľujú speleotop od horninového prostredia. Pozdĺžne hranice predstavujú zložitú priestorovú plochu skladajúcu sa z čiastkových povrchov (Bella 2006), ktorú je vhodné vnímať trojzložkovo ako podlahu (dno priepasti), bočné steny a strop jaskynného priestoru.

3.2 Priečne hranice rozčleňujú priestor jaskyne v priečnom smere vzhľadom na pozdĺžne smerovanie speleotopu a oddeľujú speleotopy navzájom. Priečne hranice majú podobu priestorovej plochy pretínajúcej jaskynné prostredia a priestorovo ju ohraničuje uzavretá priestorová krivka dotýkajúca sa horniny. Priebeh priečnej hranice je zvyčajne kolmý na smer hlavnej osi jaskynných chodieb, avšak môže mať rôzny sklon a smer sklonu v závislosti od morfolologickej členitosti a genézy jaskynných priestorov. Stanovenie priečnej hranice speleotopu je postavené na najvýraznejších priestorových nespojitostiach hlavných prírodných prvkov, ktoré možno v teréne zistiť. Postup stanovenia priečnej hranice pozostáva z dvoch krokov. Jaskynný priestor rozčleníme podľa hraníc hlavného prvku najvyššieho rádu (obvyčajne speleoreliéf) na základe stavových veličín, ktoré v najväčšej miere splňajú najmä najvyššiu priestorovú rôznorodosť a pomernú časovú nemennosť z hľadiska celej skúmanej jaskyne. Plochy hlavného prvku najvyššieho rádu, vyčlenené v predchádzajúcom kroku, rozčleníme na menšie časti podľa hraníc hlavných prvkov nižšieho rádu (obvyčajne vybrané stavové veličiny hydrologických javov a klastickej sedimentárnej výplne), ktoré sú však priestorovo menej rôznorodé v porovnaní s hlavným prvkom najvyššieho rádu a časovo menej stále z hľadiska celej skúmanej jaskyne. Pri vymedzovaní priečnych hraníc je nutné poznať všetky miesta, kde nastáva najvýraznejšie sa prejavujúce rozhranie v hlavných prírodných prvkoch oboch hierarchických úrovní vzhľadom na mierku mapovania.

4. Obsahová náplň speleotopov

Obsahovú náplň speleotopov ako geoekologických jednotiek môžeme chápať tradične, so zameraním na zisťovanie stavových veličín (morfologické, genetické a iné), a novšie – s orientáciou na sledovanie prírodných procesov prostredníctvom stacionárneho monitoringu (Mosiman 1990, Leser 1991, Beručašvili a Žučkova 1997 a iní). Napĺňanie obsahu speleotopov sme usu-

točňovali vzhľadom na časové možnosti výskumu a technické vybavenie integrálnym výskumom geoeologických charakteristík na výskumnom bode (Minár at al. 2001). Výskumné body v jaskyni stanovíme v takých miestach, aby v čo najväčšej miere vystihovali priestorovú rôznorodosť jednotlivých prírodných prvkov jaskynného prostredia. Získavanie údajov na výskumných bodoch uskutočňujeme pomocou morfometrických meraní speleoreliéfu, plytkou sondážou v klastických sedimentoch jaskyne, určením typu, veľkosti častíc a plochy klastických a chemogénnych horninových výplní, stanovením typu materskej horniny, určením typu, objemu, hĺbky a plochy hydrologických javov a meraní rýchlosti hydrologických procesov, teplotných rozdielov medzi jednotlivými časťami jaskyne, zisťovaním počtu druhov a jedincov speleofauny a podobne. Terénnym výskumom sme získali komplexnú priestorovú databázu, ktorá vystihuje priestorovú štruktúru jaskyne. Merané parametre možno z hľadiska stálosti, resp. premenlivosti hodnotiť meraných veličín, vychádzajúc z prác Minára at al. (2001) a Bellu (1995 a 2006), rozdeliť do dvoch skupín:

a) *Pomerne stále stavové veličiny* (litologické: typ materskej horniny, typ, poloha a plocha jaskynných sedimentárnych výplní; štruktúro-tektonické: sklon a smer sklonu vrstevných plôch či tektonických porúch; morfometrické: nadmorská výška, dĺžka, výška, šírka, sklon, tvar a plocha priečného a pozdĺžneho rezu, plocha a objem speleotopu; morfogenetické: tvar jaskynného priestoru, hlavný a podružný geomorfologický proces, genetický typ, etapovitost' vývoja a iné) sa vyznačujú dlhodobou periódou ich výraznejších zmien. Integrálne zisťovanie týchto veličín terénnym výskumom podáva najkvalitnejšiu priestorovú informáciu, preto možno podľa nich vytýčiť hranice speleotopov.

b) *Pomerne premenlivé stavové veličiny* (hydrologické: typ hydrologického javu, hĺbka, šírka, plocha, objem, rýchlosť, prietok, vodivosť vody; mikroklimatické: rýchlosť a smer prúdenia vzduchu, teplota a vlhkosť ovzdušia, obsah CO₂; biospeleologické: živočíšne druhy, počet jedincov, počet endemitov a iné) sa vyznačujú krátkou periódou ich výraznejších zmien. Ako významné sa javia najmä výpočtom odvodené parametre (napr. variačné rozpätie a stredná hodnota) za dané časové obdobie. Výpovednosť takto nameraných hodnôt rastie s predlžovaním času merania veličín.

MULTIVARIAČNÉ ŠTATISTICKÉ VYJADRENIE OBSAHU SPELEOTOPOV

Vyhodnotenie obsahovej náplne speleotopov je výhodné uskutočniť uplatnením multivariačných štatistických postupov (Bezák 1993, Meloun et al. 2005, Rimarčík, 2012 a iní). Zisťované údaje sú zvyčajne vyjadrené rôzne: kvalitatívne, semikvantitatívne v poradových škálach alebo kvantitatívne vo fyzikálnych veličinách, prípadne bezrozmerných jednotkách. Vzhľadom na súhrnné multivariačné štatistické spracovanie údajov v terénnom výskume jaskyne uprednostňujeme zisťovanie kvantitatívnych údajov. Zjednotenie rôznorodých a vzájomne rôzne závislých veličín môžeme uskutočniť faktorovou analýzou (program Statgraphics Plus 5.0), prostredníctvom ktorej znížime počet A vzájomne závislých veličín na počet B vzájomne nezávislých faktorov (B-rozmerný ortogonálny priestor, kde $A \geq B$). Výpočtom matice faktorovej

záťaže po rotácii metódou varimex (rozptyl maximalizujúca rotácia) možno pre každú dimenziu určiť skupinu premenných, ktoré sú s ňou najtesnejšie závislé. Následne sú vypočítané hodnoty faktorového skóre (F_s) priradené faktorovým dimenziám na úrovni speleotopov, pričom v riadkoch sú umiestnené hodnoty F_s pre jednotlivé speleotopy a v stĺpcoch hodnoty F_s pre jednotlivé faktory. Faktorové skóre predstavuje viazané a latentné hodnoty spoločných dimenzií pre jednotlivé speleotopy a možno ho použiť v syntéze hodnôt jaskynného geosystému namiesto početných prvotných premenných stavových veličín (parametrov). Syntézou faktorových skóre získame sumárne geoekologické pole obsahovej náplne speleotopov, ktoré vyjadríme na základe hodnôt (X_j) váženého priemeru normalizovaných ortogonálnych stavových veličín, kde váhu tvorí vlastná hodnota faktora podľa vzťahov:

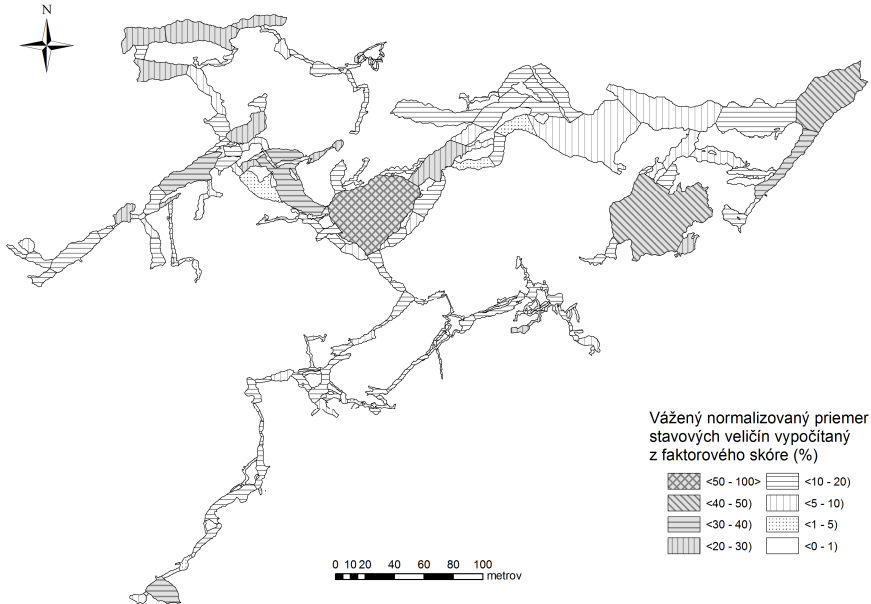
$$X_j = \frac{\sum_{j=1; k=1}^{N;M} (F_{jk} \times V_k)}{\sum_{k=1}^N} + |SF_{qMIN}| \times 100\%$$

$$SF_{qMAX} = MAX \left(\frac{\sum_{j=x; k=1}^{X;M} (F_{jk} \times V_k)}{\sum_{k=1}^N} \right) \quad SF_{qMIN} = MIN \left(\frac{\sum_{j=x; k=1}^{X;M} (F_{jk} \times V_k)}{\sum_{k=1}^N} \right)$$

kde X_j je vážený priemer normalizovaných ortogonálnych stavových veličín pre speleotop j , F_{jk} je faktorové skóre k pre speleotop j , V_k je váha faktorového skóre k daná hodnotou variability faktora k , SF_{qMAX} je najvyššia hodnota zo súboru sumárnych vážených normalizovaných faktorových skóre SF_j pre jaskyňu q , SF_{qMIN} je najnižšia hodnota zo súboru sumárnych vážených normalizovaných faktorových skóre SF_j pre jaskyňu q , j je speleotop, k je faktorové skóre, M je počet faktorových skóre, N je počet speleotopov; podmienky:

$$j \in \langle 1, N \rangle; k \in \langle 1, N \rangle; x \in \langle 1, N \rangle$$

Najvyššie hodnoty X_j (maximálne 100 %) predstavujú najvyššiu možnú a najnižšie (minimálne 0 %) najnižšiu možnú vnútornú geoekologickú rôznorodosť speleotopu v rámci skúmanej jaskyne. Stručný príklad použitia tohto postupu zobrazuje obr. 1. Severná časť jaskyne Štefanová (Nízke Tatry, Demänovská dolina) je rozčlenená na speleotopy, pre ktoré sú následne vypočítané hodnoty X_j .



Obr. 1. Normalizované stavové veličiny v speleotopoch jaskyne Štefanová
Mapový podklad: Herich et al. (2011)

TYPIZÁCIA SPELEOTOPOV

Základné individuálne geoeologické priestorové jednotky skúmaných jaskýň – speleotopy je výhodné zlučovať na základe príbuznosti a podobnosti do viacerých typov. Účelom typizácie speleotopov je zjednodušiť a sprehľadniť obraz o individuálnych priestorových geoeologických jednotkách skúmaných jaskýň a ich vlastnostiach. Jednotlivé typy speleotopov určujeme podľa Bellu (2008) na základe hodnôt stavových veličín získaných v terénnom výskume jaskýň. Výsledná typológia speleotopov bola vykonaná v dvoch variantných krokoch.

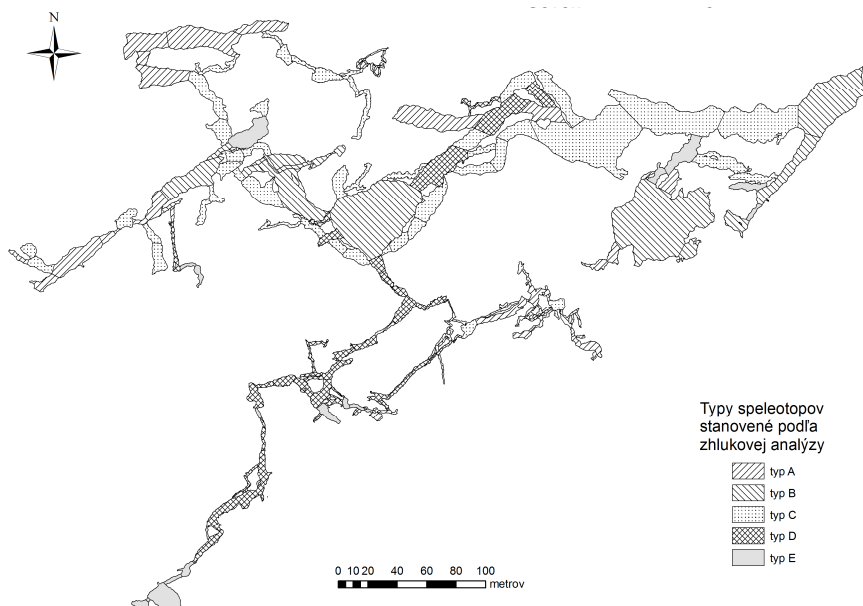
A) *Viacstupňová hierarchická typizácia* umožňuje podrobnejšie rozčleniť základné typy na typy nižších úrovní, pričom ide o typizáciu na základe kvalitatívnych kritérií ako sú genéza, morfológický tvar, typ hydrologického a geomorfologického procesu. Viacstupňová typizácia predstavuje členenie speleotopov na základe deduktívneho prístupu „zhora-nadol“ a na základe opakovaného hľadania základných geoeologických jednotiek pre každú úroveň členenia. Rozhodujúcu úlohu pri viacstupňovej typizácii speleotopov zohráva výber regionalizačných kritérií. Pri výbere kritérií sa odporúča najprv použiť na prvom mieste kritériá genézy, nižšie zohľadniť časovú platnosť použitých kritérií a indikačné procesy (Minár et al. 2001). Na každej úrovni členenia speleotopov sme uplatnili kvalitatívne klasifikačné kritériá v podstate nezávisle na sebe, pričom je teoreticky možné určiť viacej kritérií. Vzhľadom na pôvodne freatický vývoj jaskýň sme ako najvyššie kritérium členenia speleotopov uplatnili polohu speleotopov v súčasnej hydrografickej zóne, ďalej morfo-

logický tvar, morfometriu priestoru, hydrologický proces, geomorfologický proces a typ jaskynnej výplne. Typizácia speleotopov jaskýň vychádza najmä z prác Bellu (1998, 2006 a 2008). Výhodou postupu je skutočnosť, že nie je náročný na kvalitu a kvantitu potrebných údajov. Viacstupňovú geoekologickú typizáciu speleotopov preto možno uskutočniť s pomerne malým počtom kvalitatívnych údajov. Typizáciu speleotopov sme uskutočnili filtrovaním údajov (program MS Excel). Prednosťou tradičného postupu je pomerne jednoduchá interpretácia výsledku.

B) Multivariačná štatistická typizácia. Typológiu speleotopov jaskyne možno vykonať na základe multivariačných štatistických metód (faktorová a zhuková analýza), podľa postupov regionálnej taxonómie (Bezák 1993 a Minár et al. 2001) v programe Statgraphics Plus 5.0. Typy speleotopov pritom vyčleňujeme indukčným postupom „zdola nahor“ prostredníctvom zhukovej analýzy. Indukčný postup pri typizácii predstavuje logicky dôsledný prístup, ktorý je však náročný na priestorovú hustotu kľúčových geoekologických stavových veličín. Zhukovú analýzu považujeme za súbor metód, ktoré nám umožňujú v údajoch hľadať zoskupenia podobných prvkov do typov na základe stavových veličín. Zhuková analýza zabezpečí objektivizáciu postupu posudzovania vnútrotriednej podobnosti a medzitriednej odlišnosti tried speleotopov a možno ju považovať za variantné riešenie typizácie. Podmienkou zhukovej analýzy je predchádzajúce uskutočnenie faktorovej analýzy, v ktorej vypočítame faktorové skóre pre vzájomne nezávislé faktory. Základným cieľom zhukovej analýzy je redukcia údajov a vytvorenie typológie, čiže zatriedenie veľkého množstva speleotopov do súhrnných typov. Hlavným znakom zhukovej analýzy je, že typy tried nie sú dopredu určené, ale zhuky sú odvodzované z hodnôt stavových veličín. Metódy zhukovej analýzy smerujú k vytvoreniu zhukov – typov speleotopov tak, aby vzájomná podobnosť speleotopov zaradených do jedného typu bola čo najväčšia, a zároveň aby medzi vytvorenými typmi bola čo najväčšia medzitypová odlišnosť. Pri výpočte podobnosti vzdialenosti medzi speleotopmi sme uplatnili postup „city block“ a Wardovu metódu zhukovania, ktorá je najviac odporúčaná pri klastrovej analýze, z dôvodu vytvárania vcelku homogénnych zhukov. Podstatný vplyv na výsledok má však aj počet zvolených zhukov – typov speleotopov tak, aby čo najpresnejšie odrážali minimalizáciu rozptylu hodnôt stavových veličín vnútri vzniknutých typov. Príklad typizácie speleotopov s využitím tohto postupu v jaskyni Štefanová zobrazuje obr. 2.

VYČLEŇOVANIE SPELEOCHOR

Chorické jednotky predstavujú horizontálnu priestorovú štruktúru geosystémov, odrážajú vzťahové priestorovo-polohové vlastnosti a pôsobenie historických (genetických) i súčasných (morfodynamických) činiteľov, pričom v chorickéj jednotke by mal dominovať jeden geomorfologický, hydrologický alebo klimatický proces (Minár 2000). Z teoreticko-metodologického hľadiska je postup vyčleňovania speleochor založený na geoekologickom prístupe k štúdiu horizontálnych vzťahov v jaskynných geosystémoch. Usporiadaniu jaskýň v horizontálnom smere zodpovedá vymedzenie chorických jednotiek jaskynných geosystémov – speleochor a súboru speleochor – čím sa jaskyne rozčleňujú na logické celky niekoľkých hierarchických úrovní.



Obr. 2. Typy speleotopov jaskyne Štefanová stanovené zhlukovou analýzou

Legenda: typ A – vadózne uklonené nižšie chodby s akumuláciou glacifluviálnych sedimentov; typ B – vadózne uklonené vysoké dómy, siene a chodby s akumuláciou gravitačných a ílových prípadne glacifluviálnych a chemogénnych sedimentov; typ C – epifreatické vodorovné nízke riečne chodby a upchané vadózne úžiny s akumuláciou glacifluviálnych sedimentov; typ D – vadózne uklonené nižšie chodby s akumuláciou glacifluviálnych a chemogénnych sedimentov; typ E – vadózne vodorovné vyššie jazerné siene a chodby s akumuláciou chemogénnych sedimentov

Mapový podklad: Herich et al. (2011)

Speleochory predstavujú pomerne rovnomerné fyzickogeografické jednotky vyčlenené podľa určitého kritéria, pričom sú zložené zo zákonite usporiadanej skupiny jednotiek topickej dimenzie ako dôsledok horizontálnych vzťahov. Speleochora pozostáva z vývojovo príbuzných speleotopov jaskyne, ktoré sú vzájomne prepojené jednosmerným tokom energie a hmoty a vyčlenené na základe príbuznosti prebiehajúcich prírodných procesov (Bella 1998 a 2008).

Vyčlenenie chorických jednotiek v jaskyniach nadväzuje na vymedzenie základných geoekologických jednotiek – speleotopov. Pri vymedzovaní chorických jednotiek jaskýň sa zameriavame najmä na odhalenie horizontálnych susedských vzťahov a väzieb medzi speleotopmi. Základné chorické jednotky pozostávajú zo zákonite usporiadanej skupiny topickej jednotiek jaskynného prostredia – speleotopov, zlúčených na základe najsilnejších väzieb vyskytujúcich sa v danom úseku jaskyne. Jednotlivé speleotopy možno pospájať do speleochor na základe ich obsahovej náplne (X_i) využitím zhlukovej analýzy a binárnej trojuholníkovej matice priestorového prepojenia speleotopov (1 – prepojené, 0 – neprepojené speleotopy), kde sa proces zhlukovania speleotopov do danej triedy (typu) uskutoční výhradne len v prípade ich priamej priestorovej

nadväznosti. Speleochory vytvorené týmto postupom sa vyznačujú vnútornou obsahovou homogenitou.

Klasicky ponímané vymedzovania chorických jednotiek v jaskyniach sa uskutočňuje v dvoch nasledujúcich hlavných krokoch:

1) *Určenie hlavného prírodného procesu (procesov) v speleotopu na základe jeho smeru pôsobenia, sily prejavu, frekvencie výskytu a podobnosti v historickom a súčasnom pôsobení;*

2) *Začleňovanie speleotopov do speleochory* urobené na základe logických podmienok a predpokladov, ktoré platia súbežne: a) najvyššia možná obsahová (X_i) zhoda speleotopov, b) najvyššia možná typová zhoda hlavných prírodných procesov v speleotopoch, c) priama priestorová nadväznosť (susedstvo) speleotopov.

Vyčlenené chorické jednotky jaskyne – speleochory, možno v rozsiahlejších jaskyniach zlúčiť do súborov speleochor na základe nasledovných podmienok (Bella 1998 a 2008):

1) *Súbežnosť, resp. následnosť vývoj* – vytváranie hlavných alebo samostatných prepojených vetiev jaskyne môže prebiehať synchronne alebo asynchrónne;

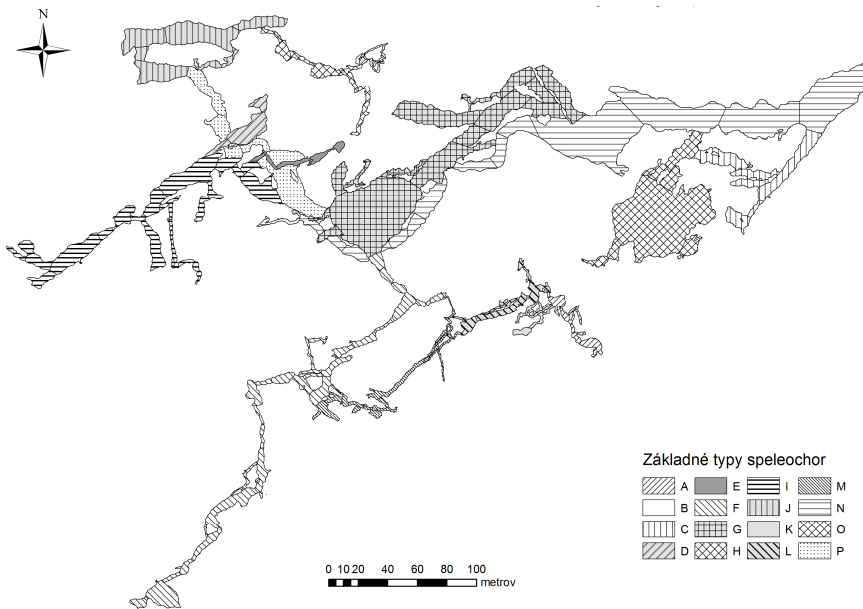
2) *Charakter morfogenetických procesov* – genéza priestorov jaskýň môže prebiehať vo viacerých vývojových fázach a pôsobením rovnakých (harmonických) alebo odlišných (disharmonických) morfogenetických prírodných procesov;

3) *Priestorová dispozícia* – priestorové usporiadanie súboru speleochor možno členiť z hľadiska prúdenia vody, prípadne vzduchu, na spájajúce sa (konjunktívne), rozpájajúce sa (disjunktívne), postranné (kolaterálne) a rovnobežné (paralelné).

TYPIZÁCIA SPELEOCHOR

V jaskyniach za základ postupu typizácie jednotiek chorickej dimenzie považujeme najmä poznanie hlavného prírodného procesu prebiehajúceho v danom úseku jaskyne a obsahovú rôznorodosť jednotlivých speleotopov, ktoré sú začlenené do speleochory. V speleochore možno rozlíšiť hlavný typ speleotopov, ktorý plošne a obsahovo dominuje, podružné typy a ojedinele sa vyskytujúce typy speleotopov. Pri skúmaní obsahu horizontálnych vzťahov v speleochorach, vychádzajúc z Richtera (1968), rozlišuje Bella (1998 a 2008) intrakomunikujúce speleotopy, v ktorých sú medzi jednotlivými prírodnými prvkami väzby usporiadané predovšetkým vertikálne a zároveň bez významných horizontálnych prepojení (napr. speleotopy uzatvorené úžinami, sedimentačnými upchávkami alebo závalmi) a extrakomunikujúce speleotopy vyznačujúce sa silnými medzisusedskými horizontálnymi väzbami s výrazným vzájomným ovplyvňovaním sa (napr. fluvialne speleotopy spojené tokom podzemnej vody a transportom alochtónnych sedimentov). Z hľadiska kontrastnosti obsahu možno jednotlivé speleochory začleniť do typov uplatnením Wardovej metódy zhlukovania v rámci klastrovej analýzy, pričom vstupné údaje tvoria spriemerované hodnoty (X_i) sumárneho geoekologického poľa speleotopov v rámci vymedzených speleochor.

Pri klasicky vnímanej typizácii speleochor venujeme pozornosť najmä stanoveniu regionalizačných kritérií, pričom teoreticky možno zvoliť aj niekoľko hierarchicky zoradených kritérií. Pri výbere kritérií je potrebné podľa Minára et al. (2001) zohľadniť najmä veľkosť priestorového rozptylu hodnôt kritéria, genézu a indikačné procesy. Typizáciu speleochor, vychádzajúc z prác Bellu (1998 a 2000), možno uskutočniť na základe nasledujúcich kritérií: súčasná hydrografická zóna (vadózna, epifreatická a freatická), morfogenetický typ (fluviokrasový, rúťový, rozsadlinový, tektogénny a iné), hydrologický proces (inaktívny a aktívny), etapovitosť vývoja jaskynných priestorov (jednofázový a viacfázový) a hlavný geomorfologický proces (korózia, erózia, akumulácia autochtónnych sedimentov, akumulácia alochtónnych sedimentov a podobne). Príklad vyčlenenia a typizácie speleochor v jaskyni Štefanová je obsiahnutý v obr. 3 a tab. 1.



Obr. 3. Speleochory v jaskyni Štefanová

(legenda je v tab. 1.)

Mapový podklad: Herich et al. (2011)

Tab. 1. Typizácia speleochor v jaskyni Štefanová

Hydrografická zóna	Morfognéza	Hydrologický proces	Etapovitost' vývoja	Hlavný geomorfologický proces	Znak speleochory
Vadózna	Fluviokrasová	Inaktívny	Jednofázová	Akumulácia alo chtónnych sedimentov	A
					B
				Akumulácia auto chtónnych sedimentov	C
					D
			Viacfázová	Akumulácia auto chtónnych a alo chtónnych sedimentov	E
					F
					G
					H
					I
					J
		Aktívny	Viacfázová	Akumulácia alo chtónnych sedimentov	K
					L
				Akumulácia auto chtónnych sedimentov	M
Epifreatická	Fluviokrasová	Aktívny	Viacfázová	Akumulácia alo chtónnych sedimentov	N
				Akumulácia auto chtónnych a alo chtónnych sedimentov	O
					P

ZÁVER

Predložený príspevok zdôrazňuje komplexné poznanie jaskynného prostredia na základe fyzickogeografického výskumu jaskýň a ustanovuje praktické kroky postupu zameraného na terénne geoeologické mapovanie jaskýň. Vytvorený postup umožňuje vyčleňovanie základných geoeologických jednotiek jaskýň – speleotopov, obsahové napĺňanie vymedzených jednotiek na základe terénneho speleologicko-geoeologického výskumu a súhrnné spracovanie získaných údajov prostredníctvom multivariačných štatistických metód. Syntézou výstupu z faktorovej analýzy – faktorového skóre získame sumárne geoeologické pole obsahovej náplne speleotopov, ktoré vypočítame prostredníctvom hodnôt (X_j) váženého priemeru normalizovaných ortogonálnych

stavových veličín. Následne sa ustanovujú kroky, na základe ktorých možno spájať speleotopy do hierarchicky vyšších jednotiek chorickej úrovne – speleochor a súborov speleochor. Postup uzatvára typológia geoeekologických jednotiek jaskýň na základe viacstupňovej hierarchickej typológie, resp. uplatnením multivariačných štatistických postupov (faktorová a klastrová analýza). Podrobný opis použitých postupov možno nájsť v dizertačnej práci Ratkovského (2012). Praktické využitie poznatkov predloženého postupu je aplikovateľné na stanovenie geoeekologickej stability jaskynných geosystémov dôležitej z hľadiska environmentálne vhodného využívania jaskýň.

LITERATÚRA

- BELLA, P. (1995). Cave as a morphogeographic system and evaluation of spatial differentiation of underground geosystems. In Bella, P., ed. *Caves and Man. Proceedings of the International Symposium, Demänovská dolina – Jasná 4. – 8. 10. 1994*. Liptovský Mikuláš (ŠOP SR, Správa slovenských jaskýň), pp. 30-38.
- BELLA, P. (1998). Priestorová a chronologická štruktúra jaskynných geosystémov, základné teoreticko-metodologické aspekty. *Slovenský kras*, 36, 7-34.
- BELLA, P. (2000). Geoeekologický výskum jaskynných geosystémov – príklady priestorovej a chronologickej štruktúry geosystémov vybraných jaskýň na Slovensku. *Slovenský kras*, 38, 67-92.
- BELLA, P. (2006). Jaskynný georeliéf – priestorová hierarchická štruktúra a základné speleogeomorfologické atribúty. *Slovenský kras*, 44, 23-53.
- BELLA, P. (2008). *Jaskyne ako prírodné geosystémy. Geoeekologický výskum a environmentálna ochrana*. Liptovský Mikuláš (ŠOP SR, Správa slovenských jaskýň).
- BELLA, P., HOLÚBEK, P. (1996). Jaskyňa Štefanová č. 1 v Demänovskej doline. *Slovenský kras*, 34, 91-99.
- BERUČAŠVILI, N. L., ŽUČKOVA, V. K. (1997). *Metody kompleksnykh fiziko-geografičeskikh issledovanij*. Moskva (Moskovskij universitet).
- BEŽÁK, A. (1993). *Problémy a metódy regionálnej taxonómie*. Geographia Slovaca, 3. Bratislava (Geografický ústav SAV).
- GORAN, C. (1991). La spéléométrie des cavités et des réseaux souterrains. Les paramètres spéléométrique: définition et utilisation. *Travaux de l'Institut de Spéléologie „Émile Racovitza“*, 30, 129-158.
- HAVIAROVÁ, D. (2008). Nové poznatky o hydrografii jaskyne Štefanová (Nízke Tatry, Demänovská dolina). *Aragonit*, 13 (2), 20-23.
- HERICH, P. (2007). Veľký objav v Štefanovke. *Spravodaj slovenskej speleologickej spoločnosti*, 38, 50.
- HERICH, P., ed., HOLÍK, Ľ., RYBANSKÝ, M., VLČEK, L., HOLÚBEK, P. et al. (2011). *Jaskyňa Štefanová. Speleologická digitálna mapa. Grafická mierka 1:300*. Liptovský Mikuláš (JK Demänovská dolina SSS, ŠOP SR, Správa slovenských jaskýň).
- HOLÍK, Ľ. (1993). Štefanová 1. *Spravodaj slovenskej speleologickej spoločnosti*, 24(1), 19-22.
- HOLÍK, Ľ. (2009). Jaskyňa Štefanová druhá najväčšia v Demänovskej doline. *Spravodaj slovenskej speleologickej spoločnosti*, 40(2), 16-21.
- HOLÍK, Ľ., HERICH, P. (2012). Jaskyňa Štefanová, objavy od roku 2009. *Spravodaj slovenskej speleologickej spoločnosti*, 43 (2), 13-24.
- IGUZQUIZA, E. P., VALSERO, J. D., GALIANO, V. R. (2011). Morphometric analysis of three-dimensional networks of karst conduits. *Geomorphology*, 132, 17-28.
- JAKÁL, J. (1986). Krasová krajina ako špecifický prírodný geosystém. *Slovenský kras*, 24, 3-26.

- JAKÁL, J. (2002). Krasová krajina, jej vlastnosti a odolnosť voči antropickým vplyvom. *Geografický časopis*, 54, 381-392.
- KOTKOVÁ, J. Z. (2011). *Topické a chorické geoeologické jednotky vybraných častí jaskyne Štefanová, ponorová časť Demänovského jaskynného systému*. Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava.
- LEŠER, H. (1991). *Landschaftsökologie: Ansatz, Modelle, Methodik, Anwendung*. Stuttgart (Eugen Ulmer Verlag).
- MINÁR, J. (1998). Definícia mapovacích geoeologických jednotiek. *Folia geographica*, 2, 138-142.
- MINÁR, J. (2000). Tvorba komplexnej geomorfologickej mapy Devínskej Kobyly (metodické poznámky). In Lacika, J., ed. *Zborník referátov z 1. konferencie Asociácie slovenských geomorfológov pri SAV, Liptovský Ján 21. – 23. 9. 2000*. Bratislava (Asociácia geomorfológov pri SAV), pp. 87-90.
- MINÁR, J., ed., BARKA, I., BONK, R., BIZUBOVÁ, M., ČERNÁNSKÝ, J., FALTÁN, V., GAŠPÁREK, J., KOLÉNY, M., KOŽUCH, M., KUSENDOVÁ, D., MACHOVÁ, Z., MIČIAN, Ľ., MIČIETOVÁ, E., MICHÁLKA, R., NOVOTNÝ, J., RUŽEK, I., ŠVEC, P., TREMBOŠ, P., TRIZNA, M., ZAŤKO, M. (2001). *Geoeologický (komplexný fyzickogeografický) výskum a mapovanie vo veľkých mieriach*. Geografické spektrum, 3. Bratislava (Univerzita Komenského).
- MOSIMANN, T. (1990). *Ökotope als elementare Prozesseinheiten der Landschaft (Konzept zur prozessorientierten Klassifikation von Geosystem)*. Geosynthesis, 1. Hannover (Geographisches Institut der Universität Hannover).
- MELOUN, M., MILITKÝ, J., HILL, M. (2005). *Počítačová analýza vícerozmerných dat v príkladoch*. Praha (Academia).
- RATKOVSKÝ, Š. (2009a). Hodnotenie geoeologickej stability Brestovskej jaskyne. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, 53, 61-73.
- RATKOVSKÝ, Š. (2009b). Vyčleňovanie a typizácia topických geoeologických jednotiek v Brestovskej jaskyni. *Slovenský kras*, 47, 231-258.
- RATKOVSKÝ, Š. (2011). Chorické geoeologické jednotky Brestovskej jaskyne. *Slovenský kras*, 49, 77-92.
- RATKOVSKÝ, Š. (2012). *Geoeologické mapovanie a typológia jaskynných geosystémov*. Dizertačná práca, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava.
- RICHTER, H. (1968). Naturräumliche Strukturmodelle. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 112, 9-14.
- RIMARČÍK, M. (2012). *Štatistické spracovanie údajov, 2012*. [Online]. Dostupné na: <http://www.rimarcik.com/navigator/metody.html> [cit:04-07-2012].

Štefan Ratkovský

DELIMITATION AND TYPOLOGY OF GEOECOLOGICAL UNITS IN CAVES USING MULTIVARIATE STATISTICAL METHODS

Comprehensive knowledge of the cave environment is based on physical geographical research on caves. Geoeological units in the cave environment were established on theoretical basis (Bella 1998). Methods of delimitation of complex speleotopes in the cave environment theoretically derive from the principle of delineation of the geoeological units in surface landscape (Minár et al. 2001). The starting point for determination of speleotopes seems to be using the adapted method of the leading (main) factor, most frequently speleorelief, or several factors (speleorelief, water fill and cave sediments). Delineation of basic geoeological spatial units – speleotopes is accomplished by the following steps: 1. Preliminary delineation of spatial units in the basic

speleological map of the cave. 2. Determination of main components and selection of delimitation attributes. 3. Delineation of speleotope borders is carried out in places with the highest degree of spatial discontinuities in values describing the attributes of the main natural components. 4. The content of speleotopes is filled mostly by the determining the values of state variables of individual natural components during field speleological and geoecological research. Statistical evaluation within the geoecological research on caves is based on factor analysis. The analysis of speleotope contents in caves was realized on the basis of weighted average of normalized orthogonal state variables (X_i), computed from values of factor score in individual speleotopes, where the weight is formed by the proper factor value. Cave spaces are divided into speleotopes and speleochores on the basis of organization of natural cave elements. Speleochores consist of developmentally related speleotopes that are interconnected with the one-directional flow of energy and mass. One geomorphological, hydrological or microclimatic process is dominant in one speleochores. Integration of speleotopes into speleochores is done on the basis of logical conditions and presumptions, which are valid concurrently and in parallel: a) The highest possible geoecological contents of speleotope conformity (X_i) b) The highest possible type of conformity of major processes running in speleotopes c) Direct spatial contiguity (neighbourhood) of speleotopes.

The results of geological research in cave geosystems can be applied in cave and karst protection against unwanted anthropic activities on the basis of vulnerability and geoecological stability of caves.

