

VÝVOJ SPÔSOBOV VÝPOČTU INTENZITY CHEMICKEJ DENUDÁCIE KRASU PROSTREDNÍCTVOM HYDROCHEMICKÝCH METÓD

Imrich Sládek

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Prírodovedecká fakulta, Ústav geografie, Oddelenie fyzickej geografie, e-mail: imrich.sladek@upjs.sk

Abstract: Chemical denudation is the basic process of creating karst forms of relief. Many authors have published mathematical equations that can be used to calculate the rate of chemical denudation. However, different input data used by the authors lead to different results. At the same time, these equations do not take into account some factors, especially the amount of carbon dioxide, which has a great influence on the formation of karst forms of relief. The aim of this article is to compare different approaches to the calculation of the degree of chemical denudation of karst using hydrochemical methods and to outline some directions that could be taken in the future. The calculation of chemical denudation allows a better understanding of the development of karst geomorphological forms. Since, in addition to chemical denudation, mechanical erosion also affects the relief, the resulting picture of the total denudation of the relief can only give us the sum of chemical and mechanical erosion. According to Jakál (2005), those containing 96–99% CaCO₃ are considered to be chemically pure limestones with regard to karst corrosion process. Given that chemically pure limestone predominate in the Slovak karst, we believe that the size of mechanical denudation should not have a significant effect on the overall denudation of karst relief. At the same time, different calculation methods reveal different factors that influence the formation of karst geomorphological forms (eg. the amount of water in the karst area, the amount of carbon dioxide, the purity of the karst rock, climatic conditions, etc.). In the future, it will be necessary to focus on measuring the amount of carbon dioxide in the soil through which rainwater flows, as enrichment with soil carbon dioxide could affect the intensity of chemical denudation of the karst.

Keywords: chemical denudation, karst corrosion process, karsology, geomorphology

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY CHEMICKEJ DENUDÁCIE KRASU

Chemická denudácia krasu (krasová korózia) predstavuje základný proces tvorby krasového reliéfu. Podľa Panoša (2001) sa pojem krasová denudácia považuje za zastaraný a príliš všeobecný, a preto je vhodnejšie ho nahradiť pojmom krasová korózia, ktorá označuje pôsobenie faktorov vyvolávajúcich chemické rozpúšťanie

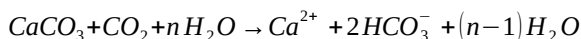
hornín. V našom príspevku budeme ako synonymum krasovej korózie používať u nás zaužívaný termín chemická denudácia na odlišenie od krasovej denudácie, ktorá nerozlišuje typ procesu vedúceho k znižovaniu a zarovnávaniu povrchu rozpustných hornín. Krasovú koróziu považuje Panoš (2001) za súčasť krasovej erózie, pri ktorej rozoznáva zložku mechanickú, fyzikálnu a chemickú. Problematika chemickej denudácie je predmetom skúmania karsológov tak vo svete, ako aj na Slovensku už mnoho rokov, čo dokumentuje množstvo publikácií z tejto oblasti. Za všetky možno spomenúť napr. práce Corbela (1959), Gamsa (1966, 1969), Pulinu (1974, 1999), Himmela (2000), v poslednom období napr. Gabrovšeka (2007, 2009), Chmiela et al. (2011, 2012), Plana (2005) a i. Na Slovensku bol priekopníkom v tejto oblasti Droppa (1976, 1978, 2013), neskôr naňho nadviazali svojimi diplomovými prácami a inými príspevkami Pancuráková (2009), Hochmuth a Vadelová (2010), Sládek (2013, 2014), či Gessert et al. (2021). V rámci týchto výskumov majú významné postavenie pokusy o kvantitatívne zhodnotenie intenzity (veľkosti) chemickej denudácie. Existuje viacero spôsobov určenia veľkosti chemickej denudácie. Môžeme ich rozdeliť na priame a nepriame. Medzi priame metódy patrí napr. metóda vápencových platničiek (Gams, 1985; Hochmuth a Vadelová, 2010; Droppa, 2013), ktorou sa ale v tomto príspevku nebudeme bližšie zaoberať. Iné spôsoby (nepriame) sú založené na terénnych meraniach rôznych veličín, ktoré sa na krasovej korózii podieľajú (tzv. hydrochemické metódy). Mitter (1982 in Jakál, 1982) ich definuje ako metódy slúžiace na zistenie intenzity chemickej denudácie karbonátových hornín na povrchu i v podzemí v rozličných klimatických zónach Zeme. Je možné takto zisťovať skutočnú i potenciálnu denudáciu.

Hydrochemické metódy umožňujú pomocou rôznych matematických vzťahov vypočítať intenzitu (veľkosť) krasovej korózie. Tieto vzťahy sú viac alebo menej presné v závislosti od použitých vstupných údajov. Cieľom tohto článku je zhodnotiť prístupy rôznych autorov k výpočtu veľkosti krasovej korózie prostredníctvom hydrochemických metód a načrtnúť niektoré smery, ktorými by sa v budúcnosti mohli uberať ďalšie výskumy. Stručný prehľad rôznych metód výpočtu už podal vo svojom článku v Spravodaji Slovenskej speleologickej spoločnosti z roku 1977 Šavrnoch. Naším článkom, v ktorom uvádzame celkom 13 spôsobov výpočtu chemickej denudácie krasu a 5 spôsobov výpočtu iónového výplavu, chceme naňho nadviazať, zosumarizovať a rozšíriť tak znalosti o chemickej denudácii krasu.

Ford a Williams (2005) uvádzajú celkom päť dôvodov výpočtu chemickej denudácie:

1. získať všeobecnú hodnotu pre celkovú mieru denudácie alebo transformácie reliéfu;
2. porovnať miery denudácie v kontrastných prostrediach a rôznymi postupmi;
3. lepšie pochopiť vývoj geomorfologických foriem;
4. pochopiť samotné procesy;
5. odhadnúť množstvo spotrebovaného oxidu uhličitého počas rozpúšťania vápenca.

Proces krasovej korózie je pomerne komplikovaný, avšak jeho podstatu môžeme vyjadriť nasledovnou reakciou, ktorú uvádza Pulina (1999):



Z nej vyplýva, že na to, aby korózia mohla prebiehať, je nutná prítomnosť krasovej horniny (vápence a pod.), vody a oxidu uhličitého, ktorý je vo vode rozpustný, čím ju mení na kyselinu uhličitú. Z ďalších faktorov má podľa Jakála et al. (1982) dôležitý význam klíma, reliéf a topografia územia, pôda a biotložka. Z vlastností krasových hornín je dôležitá chemická čistota hornín, mocnosť a úložné pomery hornín, a tiež pórovitosť a puklinovitosť hornín. Bližšie sa vlastnosťami hornín vo vzťahu ku krasovateniu zaoberá príspevok Jakála (2005). Rozpustená hornina sa môže po úniku oxidu uhličitého vyvrázať vo forme sekundárnej výplne priamo v jaskyniach alebo je vo forme hydrogénuhličitanu transportovaná krasovými vodami mimo krasového masívu na povrch, kde sa môže vyvrázať vo forme penovcov a travertínov. Týmto procesom dochádza k denudácii reliéfu a vzniku krasových foriem. Tento proces sa dá hodnotiť jednak z hľadiska dynamiky (zmeny intenzity korózie počas rôznych časových období) a jednak z hľadiska faktorov, ktoré majú na koróziu vplyv (množstvo vody v krasovom území, množstvo oxidu uhličitého, ktorého zdrojom je pôda a hlbinné zdroje, čistota krasovej horniny, klimatické podmienky a pod.).

Niektoré údaje o veľkosti krasovej korózie z rôznych klimatických oblastí Zeme od rozličných autorov je možné nájsť vo vyššie spomínanom príspevku od Mittera (1982 in Jakál, 1982), ako aj vo viacerých príspevkoch od Pulinu (napr. Pulina, 1974; Pulina a Fagundo, 1992). Z územia Slovenska sú zatiaľ dostupné iba údaje zo severnej strany Nízkych Tatier od Droppu (1976, 1978, 2013) a Hipmana (1981) a z územia Slovenského raja a Slovenského krasu od Hochmutha a Vadelovej (2010). Najnovšie údaje z Jasovskej planiny v Slovenskom krase priniesli Gessert et al. (2021). V našom príspevku uvádzame aj doteraz nepublikované údaje z okolia Drienovskej vyvierajúčky v Slovenskom krase, ktoré boli nami vypočítané pomocou vzťahov uvedených nižšie na základe dát z terénnych meraní poskytnutých A. Gessert.

2 VÝVOJ RÔZNYCH PRÍSTUPOV K INTENZITE CHEMICKEJ DENUDÁCIE KRASU

Jednotlivé spôsoby výpočtu krasovej korózie sa líšia v závislosti od použitých vstupných údajov. Niektoré berú do úvahy celkovú mineralizáciu (napr. Bartoszewski a Magierski 1989), iné iba obsah Ca^{2+} a Mg^{2+} (Pulina, 1974, 1999; Droppa, 1976, 1978, 2013). Naproti tomu Gams (1968) používa miesto hodnoty mineralizácie tvrdosť vody v nemeckých stupňoch. Takisto je rozdiel v tom, či sa berie do úvahy iba hustota vápence alebo aj hustota dolomitu (priemer obidvoch hustôt), príp. ešte aj hustota sadrovca a chloridov (napr. u Pulinu, 1974, 1999). Zásadný rozdiel spočíva aj v prihliadaní na mineralizáciu vôd na vstupe do krasového územia (zrážky, ponory), alebo sa pracuje iba s hodnotami keď voda opúšťa krasové územie (vyvierajúčky). Z týchto dôvodov je veľkosť chemickej denudácie vypočítaná podľa rôznych vzťahov rozdielna.

V ďalšom texte charakterizujeme najpoužívanejšie metódy výpočtu chemickej denudácie krasu a iónového výplavu.

Rodionov (1949) vypracoval metódy objemovú a bilančnú. Pre objemovú metódu navrhol takýto vzorec:

$$A = \frac{v}{V} \cdot 100 \quad ,$$

kde A – ukazovateľ aktivity krasového procesu, v – objem rozpustenej horniny vynešenej za určitý čas z krasových hornín a V – celkový objem krasových hornín. Vyjadruje sa v percentách za tisícročie.

Denudáciu podľa bilančnej metódy je možné počítať pomocou viacerých vzťahov:

$$I = \frac{1000 V}{P}$$

$$I = \frac{0,0000126 W \cdot T}{P}$$

$$I = \frac{0,00126 Q \cdot T}{P}$$

$$I = 0,0000126 M \cdot T \quad ,$$

kde I – intenzita krasového procesu v % za tisícročie, V – objem odnesených hornín z krasového masívu v km^3 , W – priemerný odtok v l/s, Q – priemerný odtok v m^3/s , M – špecifický odtok v l/s. km^2 , T – množstvo rozpustených karbonátov vo vode v mg/l, P – plocha skrasovatených hornín v km^2 .

Corbel (1959) použil na výpočet rozpusteného a odneseného množstva karbonátov tento vzťah:

$$I = \frac{4 E \cdot T}{100} \quad ,$$

kde I – denudácia v $\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{rok}$, E – odtok v dm^3 (zrážky – výpar, resp. odtok) a T – množstvo (obsah) karbonátov, resp. tvrdosť vody v mg/l CaCO_3 , $4/100$ – koeficient prepočtu hmotnostných jednotiek na objemové prostredníctvom hustoty CaCO_3 ($2,5 \text{ g/cm}^3$).

Pre podzemnú denudáciu zase používa tento vzorec:

$$I' = \frac{4 E' \cdot T'}{100} \quad ,$$

kde I' – podzemná denudácia v $\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{rok}$ alebo v mm/1000 rokov, E' – výška vrstvy vody tečúcej v podzemí v dm a T' – množstvo (obsah) karbonátov v podzemnej vode v mg/l CaCO_3 .

Ako tvrdia Ford a Williams (2005), Corbelov vzorec je dôležitý, pretože tvorí základ mnohých údajov o denudácii a jeho použitie poskytuje náhľad na rôzne použité metódy. Rovnica bola kritizovaná jednak za predpoklad, že všetky uhličitanové horniny majú hustotu 2,5 (hustota môže byť v rozmedzí od 1,5 do 2,9), tiež za ignorovanie obsahu $MgCO_3$ (hoci by to bolo zahrnuté, ak by bola pre T použitá celková tvrdosť) a príspevku z dažďov, za ignorovanie možnosti, že síranové horniny prispievajú k Ca^{2+} a napokon za zovšeobecnenie uhličitanovej tvrdosti na priemernú hodnotu, a tak prehliadnutie jeho možných odchýlok s prietokom. Napriek tomu je stále vhodnou metódou na získanie prvotných odhadov denudácie, hlavne keď sú údaje obmedzené (napr. Ellaway et al., 1990).

Williams (1963) sa rozhodol upraviť Corbelov vzorec, a to takto:

$$X = \frac{FQTn}{10^{12} \cdot AD} ,$$

kde X – ekvivalent hrúbky (mocnosti) odneseného vápenca v mm za určitý čas, Q – prietok za určitý čas, T – priemer celkovej tvrdosti vody v mg/l za určitý čas, A – plocha povodia v km^2 , D – hustota vápencov alebo dolomitov, $x(1/n)$ – vápencová oblasť ako časť celkového povodia, F – konverzný činiteľ (ak je Q v m^3 , tak F je 1000).

Ak je veľkosť odnosu karbonátov uvedená v $m^3/km^2/rok$, potom bude vzorec nasledovný:

$$X = \frac{fQTn}{10^9 \cdot AD} ,$$

kde fQ – ekvivalent pre prietok v l/s, ostatné je totožné ako v predošlom vzorci.

Davydov a Konkin (1958) pre výpočet množstva odneseného materiálu používajú vzorec:

$$y = \frac{86400 \cdot T \cdot Q}{P \cdot 10^6} \cdot 1000 ,$$

kde y – veľkosť odtokovej vrstvy v mm, T – čas, Q – prietok v m^3/s a P – plocha povodia v km^2 .

Za zmienku stojí tiež vzorec Čikiševa (1976), ktorý vychádzal zo vzorcov Corbela (1959) a Davydova a Konkina (1958):

$$D = \frac{4.86400.365 \cdot Q \cdot T}{P.1000.100.100} \cdot 1000$$

po úprave:

$$D = \frac{12,6 \cdot Q \cdot T}{P} \cdot 1000$$

alebo

$$D = 0,126 \cdot M \cdot T ,$$

kde D – rýchlosť chemickej denudácie v $\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{rok}$ alebo v $\text{mm}/1000$ rokov, Q – stredný ročný prietok v m^3/s , T – obsah CaCO_3 vo vode v mg/l , P – plocha povodia v km^2 a M – špecifický odtok v $\text{l}/\text{s}/\text{km}^2$. Táto metóda je podľa názoru samotného autora vhodná pre výpočet denudácie na malých povrhových a podzemných tokoch.

Denudáciu podľa Gamsa (1969) vyjadruje nasledovný vzťah:

$$I = \frac{1}{10^{-9}} \left(\frac{NCa}{SCa} + \frac{NMg}{SMg} \right) \cdot Q_s \cdot 31,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{V}{100} ,$$

kde I – denudácia v $\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{rok}$, Q_s – priemerný prietok v $\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{rok}$ (ide o prietok v l/s vynásobený 10^{-3} a predelený plochou povodia v km^2 , preto vo vzorci samostatne nefiguruje plocha povodia), NCa – kalcitová tvrdosť v nemeckých stupňoch vyjadrujúca obsah CaO (1 stupeň = 10 mg CaO v jednom litri vody), NMg – horečnatá tvrdosť v nemeckých stupňoch vyjadrujúca obsah MgO , (1 stupeň = 7,2 mg MgO v jednom litri vody), SCa – hustota CaCO_3 (2,7 g/cm^3), SMg – hustota MgCO_3 (3,0 g/cm^3), V – redukčný faktor (pre vyvieračky má hodnotu 1).

Kalcitovú tvrdosť NCa vypočítame vynásobením obsahu Ca^{2+} v mg/l faktorom 2,5, ktorý získame predelením 100 g CaCO_3 / 40 g Ca^{2+} predstavujúcim molovú hmotnosť Ca . Analogicky horečnatú tvrdosť vypočítame vynásobením obsahu Mg^{2+} v mg/l faktorom 4,12 (100/24,27 = 4,12, pričom 24,27 predstavuje molovú hmotnosť Mg). Uvedené tvrdosti sú v mg/l CaCO_3 , preto je potrebné premeniť ich na nemecké stupne, a to vynásobením 0,056 (1 mg CaCO_3 /1 l vody = 0,056 nemeckého stupňa). Výsledná hodnota ide do vzorca ako NCa , resp. NMg .

Denudácia podľa Bartoszewskiego a Magierskeho (1989) sa vypočíta podľa vzťahu:

$$D = \frac{Q \cdot 0,0864 \cdot TDS}{P} ,$$

kde D – denudácia v $\text{t}/\text{deň}/\text{km}^2$, Q – priemerný denný prietok v m^3/s , TDS – celková mineralizácia v mg/l , P – plocha povodia v km^2 , 0,0864 – koeficient vyjadrujúci počet sekúnd za deň predelený 10^{-6} kvôli prevodu jednotiek. Celkovú mineralizáciu (TDS) je možné zistiť aj prepočtom z konduktivity (prepočítavací koeficient závisí od použitého konduktometra), ide však pomerne o hrubý odhad, takže nie je vhodné sa na to spoliehať. Na základe konduktivity je možné usudzovať o denudácii aj nepriamo, ako spomína Prelovšek (2012). Pokiaľ sa konduktivita zvyšuje, dochádza k rozpúšťaniu horniny (denudácia), pokiaľ sa zvyšuje dochádza k zrážaniu (tvorba penovcov, sintrov a pod.).

Denudácia podľa Pulinu (1974, 1999) je vyjadrená vzťahom:

$$D = 12,6 \cdot \frac{Q \cdot \Delta T}{P} ,$$

kde D – denudácia v $\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{rok}$ alebo v $\text{mm}/1000$ rokov, Q – priemerný prietok m^3/s , $\Delta T = T - Ta$, pričom T – obsah Ca^{2+} v mg/l + obsah Mg^{2+} vo vyvieračke, Ta – obsah Ca^{2+} v mg/l + obsah Mg^{2+} v ponore (vstupe do krasového územia), P – plocha povodia v km^2 , 12,6 je koeficient α alfa vypočítaný takto: $31,5/2,5 = 12,6$, kde 2,5 je

priemerná hustota karbonátov, síranov a chloridov. Je tiež možné brať do úvahy iba priemernú hustotu karbonátov (vápencov a dolomitov) $2,8 \text{ g/cm}^3$, v takom prípade $\alpha = 31,5/2,8 = 11,25$, čo je priemerná hodnota obidvoch koeficientov vo vzťahu podľa Droppu (2013), príp. iba vápencov ($2,7 \text{ g/cm}^3$), v tom prípade má koeficient α hodnotu 11,66. Konkrétne hodnoty koeficientu α pre jednotlivé typy hornín je možné nájsť u Pulinu (1974).

V prípade, že potrebujeme výsledok v $\text{t/km}^2 \cdot \text{rok}$, je nutné použiť vzťah:

$$D = 31,5 \cdot \frac{Q \cdot \Delta T}{P} ,$$

kde D – denudácia v $\text{t/km}^2 \cdot \text{rok}$, Q – priemerný prietok m^3/s , $\Delta T = T - Ta$, pričom T – obsah Ca^{2+} v mg/l + obsah Mg^{2+} vo vyvieracke, Ta – obsah Ca^{2+} v mg/l + obsah Mg^{2+} v ponore (vstupe do krasového územia, P – plocha povodia v km^2 a $31,5$ je koeficient vypočítaný nasledovne: $31,5 \cdot 10^6$ – počet sekúnd za rok, čiže $31,5 \cdot 10^6 \text{ g/s} = 31,5 \text{ t/rok}$.

Krasová korózia sa podľa Droppu (1976, 1978, 2013) rovná množstvu rozpustených karbonátov vo vode počas jej prietoku horninovým masívom. Pre vyvieracku uvádza nasledujúci vzťah, ktorý neobsahuje tzv. redukčný faktor:

$$C = \frac{(11,68 \cdot Dc) + (10,87 \cdot Dm)}{P} ,$$

kde C – celkový odnos karbonátov (Ca^{2+} , Mg^{2+}) v m^3/km^2 za rok, resp. v $\text{mm}/1000$ rokov, $11,68$ – koeficient vyjadrujúci počet sekúnd za rok a prepočet hustoty vápenca ($2,7 \text{ g/cm}^3$), $10,87$ – koeficient vyjadrujúci počet sekúnd za rok a prepočet hustoty dolomitu ($2,9 \text{ g/cm}^3$), Dc – prírastok Ca^{2+} v g/s počas prietoku vody krasovým územím, Dm – prírastok Mg^{2+} v g/s počas prietoku vody krasovým územím, P – plocha povodia. Dc sa vypočíta podľa vzťahu $Dc = Vv - Vp$, pričom Vv je celkový obsah CaCO_3 v g/s vo vyvieracke a Vp je celkový obsah CaCO_3 v ponoroch (vstupe do krasu). Vv aj Vp sa vypočítajú vynásobením prietoku v m^3/s obsahom Ca^{2+} v mg/l v ponore, resp. vyvieracke. To isté platí aj pre Dm , namiesto obsahu Ca^{2+} sa však použije obsah Mg^{2+} .

Vzorec pre výpočet denudácie sa v prípade povrchových tokov násobí redukčným faktorom R .

$$C = \frac{(11,68 \cdot Dc) + (10,87 \cdot Dm)}{P} \cdot R$$

Samotný postup výpočtu redukčného faktora pozostáva z dvoch krokov. Najprv sa vypočíta priemerný obsah vápnika Ca :

$$Ca = \frac{Q_1 \cdot Ca_1 + Q_2 \cdot Ca_2}{Q_1 + Q_2} ,$$

kde Q_i – priemerný prietok v m^3/s za mesiace so zvýšeným vodným stavom, Ca_i – priemerný obsah Ca v mg/l za mesiace so zvýšeným vodným stavom, Q_2 – priemer-

ný prietok v m³/s za ostatné mesiace a Ca_2 – priemerný obsah Ca v mg/l za ostatné mesiace.

Potom výsledný priemerný obsah Ca delíme priemerným obsahom Ca za celý rok, a tak dostaneme redukčný faktor R , ktorý má hodnotu vždy menšiu ako 1.

$$R = \frac{Ca_{\text{zovzorca}}}{Ca_{\text{priemer za rok}}}$$

Dropa tento faktor vysvetľuje tým, že pri vysokých prietokoch (napr. pri topení snehu a búrkach) je obsah Ca menší ako pri nižších. Obsah Ca a Mg v povrchových vodách totiž počas roka veľmi kolíše.

Okrem chemickej denudácie je možné vypočítať tiež iónový výplav, ktorý v zmysle Pulinu (1999) predstavuje množstvo iónov odstránených z horninového masívu bez ohľadu na plochu povrchu. Môže sa počítať pre každý ión osobitne alebo spolu pre všetky. Dá sa počítať ako v hmotnostných, tak aj v objemových jednotkách, ktoré sú pre porovnanie viacerých lokalít vhodnejšie. Boli publikované údaje z viacerých oblastí sveta (Pulina, 1974; Pulina a Postnov, 1989; Pulina a Fagundo, 1992), zo Slovenska zatiaľ iba z územia Slovenského krasu (Gessert et al., 2021). Na výpočet je možné použiť rôzne vzorce:

$$A_t = M \cdot Q \quad ,$$

kde A_t – iónový výplav v g/s, Q – priemerný prietok m³/s a M – celková mineralizácia v mg/l (TDS), resp. obsah daného iónu (napr. Ca^{2+}) v mg/l.

$$A_t = 0,0864 \cdot M \cdot Q \cdot d \quad ,$$

kde A_t – iónový výplav v t/počet dní, Q – priemerný prietok m³/s, M – celková mineralizácia v mg/l (TDS), d – počet dní a 0,0864 – počet sekúnd za deň predelený 10⁻⁶ kvôli prevodu jednotiek.

$$A_t = 31,5 \cdot M \cdot Q \quad ,$$

kde A_t – iónový výplav v t/rok, Q – priemerný prietok m³/s, M – celková mineralizácia v mg/l (TDS) a 31,5 · 10⁶ – počet sekúnd za rok, čiže 31,5 · 10⁶ g/s = 31,5 t/rok.

Ak potrebujeme výsledok v m³/rok, použijú sa nasledovné vzťahy:

$$A_m = 12,6 \cdot M \cdot Q \quad ,$$

kde A_m – iónový výplav v m³/rok, Q – priemerný prietok m³/s, M – celková mineralizácia v mg/l (TDS) a 12,6 je koeficient vypočítaný takto: 31,5/2,5 = 12,6, kde 2,5 je priemerná hustota karbonátov, síranov a chloridov (v g/cm³).

$$A_m = 0,3456 \cdot M \cdot Q \cdot d \quad ,$$

kde A_m – iónový výplav v m³/počet dní (napr. rok), Q – priemerný prietok m³/s, M – celková mineralizácia v mg/l (TDS), d – počet dní a 0,3456 – počet sekúnd za deň predelený hustotou karbonátov (2,5 g/cm³) kvôli prevodu jednotiek.

Malecki a Szostakiewicz-Holownia (2008) zaviedli novú metódu výpočtu chemickej denudácie na základe geochemického modelu, ktorú aplikovali v poľských

Západných Tatrách. Veľkosť denudácie vypočítaná podľa tohto modelu je približne o polovicu menšia ako veľkosť denudácie vypočítanej podľa vzorca Pulinu. Vzťah pre výpočet je nasledujúci:

$$D_{ch} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot \Delta t_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \cdot P^{-1} \cdot 0,365 \quad ,$$

kde D_{ch} – denudácia v m^3/km^2 za rok, P – plocha povodia v km^2 , Q_i – prietok v l/s za časový interval Δt_i , d_i – celkový objem minerálnych látok rozpustených za daný časový interval Δt_i , Δt_i – časový interval. Celkový objem minerálnych látok rozpustených za daný časový interval sa vypočíta nasledovne:

$$d_i = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} \quad ,$$

kde d_i – celkový objem minerálnych látok rozpustených za daný časový interval Δt_i , m_j – množstvo minerálu v g/dm^3 a ρ_j – hustota minerálu j v g/dm^3 .

Rzonca a Buczynski (2013) použili pre výpočet denudácie v Sudetách (povodie toku Jaskinie) spôsob založený na porovnaní množstva iónov, ktoré skutočne opúšťajú skúmané povodie a množstva, ktoré by bolo z povodia odstránené, ak by vodný tok odnášal iba síranové vody (ktoré sú pre dané územie typické, čiže ako keby sa proces vylúhovania karbonátových hornín v povodí nevyskytoval). Koncentrácia iónov Ca^{2+} a HCO_3^- generovaná procesom lúhovania karbonátových hornín sa nazýva pridaná koncentrácia iónov (ΔS). Je definovaná ako rozdiel medzi priemerným obsahom iónov vo vode opúšťajúcej povodie a priemerným obsahom iónov v síranových vodách, ktoré sa považujú za typické koncentrácie iónov pozadia v nekarbonátovej časti povodia. Pojmy „pridané ióny“ a „pridané koncentrácie iónov“ používajú na označenie nadbytočných koncentrácií, ktoré sa vyskytli v dôsledku procesu denudácie krasu (rozpúšťanie uhličitanu vápenatého) v porovnaní s koncentráciou týchto iónov v síranových vodách. Počítaním molárnych hmotností na základe stechiometrie reakcie je možné ukázať, že rozpustením 100,08720 g CaCO_3 sa získa 162,11228 g iónov Ca^{2+} a HCO_3^- . Preto na zistenie ročnej hmotnosti rozpusteného CaCO_3 (označeného K) je potrebné ročné množstvo pridaných iónov Ca^{2+} a HCO_3^- (L_a) vynásobiť redukčným koeficientom, ktorý je podielom vyššie uvedených hodnôt a rovná sa 0,617394.

Veľkosť denudácie teda určuje tento vzťah:

$$D_A = \frac{K}{\rho} \quad ,$$

kde D_A – veľkosť denudácie, K – ročná hmotnosť rozpusteného CaCO_3 a ρ je hustota CaCO_3 , K je možné vypočítať podľa vzťahu:

$$K = 0,617394 \cdot L_a \quad ,$$

kde hodnota 0,617394 predstavuje vyššie spomínaný redukčný koeficient a L_a sa vypočíta ako:

$$L_a = 31\,536\,000 \cdot Q_D \cdot (\Delta S_{Ca} + \Delta S_{HCO_3}) ,$$

kde L_a – hmotnosť iónov Ca^{2+} a HCO_3^- v mg pridaných ročne počas krasového procesu a odnesených z povodia, Q_D – prietok v l/s, ΔS_{Ca} je zmena koncentrácie Ca v mg/l počas procesu denudácie a ΔS_{HCO_3} – zmena koncentrácie Mg v mg/l počas procesu denudácie. Hodnota 31 536 000 predstavuje počet sekúnd za rok.

Podľa Whitea (2015) treba denudáciu počítat' so zohľadnením viacerých faktorov:

$$D_n = \frac{M_{cal}}{\rho \cdot \sqrt[3]{4}} \cdot \left(\frac{K_C K_1 K_{CO_2}}{K_2 \gamma_{Ca} \gamma_{HCO_3}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot P_{CO_2}^{\frac{1}{3}} \cdot (P - E) ,$$

kde D_n – denudácia, M_{cal} – mólová hmotnosť kalcitu, ρ – hustota kalcitu, $(P - E)$ – precipitácia mínus evapotranspirácia, P_{CO_2} – parciálny tlak CO_2 , γ_{Ca} – aktivitný koeficient Ca^{2+} , γ_{HCO_3} – aktivitný koeficient HCO_3^- , K_1 – prvá disociačná konštanta H_2CO_3 , K_2 – druhá disociačná konštanta H_2CO_3 , K_C – súčin rozpustnosti kalcitu a K_{CO_2} – Henryho konštanta rozpustnosti CO_2 vo vode. Ford a Williams (2005) uvádzajú, že rovnica vyjadruje lineárnu zmenu denudácie s odtokom $(P - E)$ a indikuje, že rozpúšťanie sa mení s treťou mocninou parciálneho tlaku CO_2 . Komplexné účinky teploty na rýchlosť denudácie sa započítavajú v rovnovážnych konštantách. White tiež tvrdí, že teplota je najmenej dôležitá z klimatických premenných v rovnici a v praxi je často viac ako kompenzovaná vplyvom iných faktorov.

Gabrovšek (2007) predstavil matematický model, ktorý umožňuje vypočítať denudáciu v krasovom prostredí. Zaznamenáva sa vertikálny prietok vody, ktorý je rovnomerne infiltrovaný na povrchu. Rýchlosť denudácie sa vypočíta z času potrebného na odstránenie určitej hrúbky horniny. Toto sa konkrétne vykonáva na vápencom bloku, ktorý je rozdelený vertikálnym zoskupením zlomov. Ukazuje sa, že rýchlosť denudácie sa zvyšuje s hrúbkou odstránenej vrstvy a približuje sa hornej hranici, ktorá je definovaná maximálnymi denudačnými rovnicami, ktoré sú založené na predpoklade, že všetok potenciál rozpúšťania je premietnutý do povrchovej vrstvy horniny.

3 DISKUSIA

Porovnanie veľkosti chemickej denudácie z rôznych oblastí Slovenska

Droppa (1976, 1978) spomína, že rozdielne vstupné údaje, ktoré autori pri konštrukcii matematických vzťahov používajú vedú k rozdielnym výsledkom veľkosti denudácie (tab. 1). Podobne to uvádzajú tiež Štelcl et al. (1977), ktorí to overovali na Hornej Morave (tab. 2), a takisto to potvrdzujú aj naše výpočty z územia Slovenského krasu (Drienovecká vyvieracia, povodie Drienovca, Jasovská planina), ktoré sme vykonali pomocou vyššie uvedených vzťahov na základe údajov nameraných

v teréne Dr. Gessert a jej spolupracovníkmi. Je možné ich porovnať s údajmi, ktoré publikoval Droppa (1976, 1978, 2013) z územia Nízkych Tatier (Demänovská a Jánska dolina), keďže iné údaje získané podobnou metodikou z územia Slovenska nie sú k dispozícii (tab. 3).

Tabuľka 1 Intenzita korózie krasových vôd Jánskej doliny vypočítaná podľa rôznych metód za rok 1975

Lokalita	Plocha povodia vkm ²	Denudácia vmm/1000 rokov (vm ³ /km ² za rok) podľa vzorca					
		Corbela	Williamsa	Čikiševa	Gamsa	Pulinu	Droppu
Jánska dolina, Nízke Tatry	32,8	47,97	64,74	47,92	48,70	44,20	41,03

Zdroj: Droppa (1978)

Tabuľka 2 Intenzita chemickej denudácie krasu podľa rôznych autorov

Lokalita	Odnos vm ³ /km ² .rok				
	Pulina	Čikišev	Corbel	Williams	Štelcl, Viček, Paňovský
Horní Morava, pramen: Jeskyně	47,25	47,25	46,8	158,537	47,282
Lanovka	87,05	87,05	84,08	104,8	85,75

Zdroj: Štelcl et al. (1977)

Tabuľka 3 Porovnanie chemickej denudácie krasu na území Slovenska podľa rôznych autorov

Lokalita	Časové obdobie	Plocha povodia vkm ²	Denudácia vmm/1000 rokov podľa vzorca*			Denudácia vmm/1000 rokov na jednotku plochy podľa vzorca*		
			Droppu (2013)	Pulinu (1999)	Gamsa (1969)	Droppu (2013)	Pulinu (1999)	Gamsa (1969)
Demänovská dolina, Nízke Tatry	rok 1974	16,4	46,3	55,3	x	2,82	3,37	x
Jánska dolina, Nízke Tatry	rok 1975	32,8	41,03	44,2	48,7	1,25	1,35	1,48
Drienovecká vyvieraciačka, Slovenský kras	rok 2015	2,8	8,2	8,5	13,0	2,94	3,03	4,63
Drienovecká vyvieraciačka, Slovenský kras	rok 2016	2,8	12,4	12,8	19,5	4,43	4,57	6,96

Zdroj: Droppa (1976, 1978), Gessert et al. (2022)

* výpočet na základe vzťahov uvedených v kapitole „Vývoj rôznych prístupov k intenzite chemickej denudácie krasu“

Terénne merania prameňa Drienovecká vyvieračka (reprezentujúceho povodie Drienovca s rozlohou 2,8 km²) prebiehali každý mesiac počas hydrologických rokov 2013 – 2016 (Gessert, in pers. comm.). Merali sa pH, teplota vody a konduktivita, a to konduktometrom Hanna HI 98130, ďalej prietok (pomocou hydrometrického krídla FP 111, Global water) a alkalinita (pomocou titrimetrickej sady Aquamerck Alkalinity Test 1.11109.0001). Zároveň prebiehal odber vzoriek na ďalšie analýzy chemického zloženia krasovej vody, ktoré vykonalo laboratórium environmentálnych vied Inštitútu jadrového výskumu Maďarskej akadémie vied v Debrecíne. Koncentrácie hlavných iónov (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, F⁻, Cl⁻) boli analyzované na spektrofotometri Shimadzu UV-2600 UV-VIS a na chromatografe Metrohm TitrIC 7. Tieto dáta boli použité k výpočtu chemickej denudácie podľa metodík Droppu (1976, 1978, 2013), Pulinu (1974, 1999) a Gamsa (1969), ktoré sú popísané vyššie. Tieto metodiky boli vybrané kvôli porovnaniu s už skôr publikovanými výsledkami Droppu (1976, 1978) z oblasti Nízkych Tatier. Porovnanie prírodných podmienok oboch území uvádza tab. 4.

Tabuľka 4 Porovnanie fyzickogeografických podmienok severnej strany Nízkych Tatier a východnej časti Slovenského krasu

Parameter	Nízke Tatry (Demänovská a Jánska dolina)	Slovenský kras (Jasovská planina)
Nadmorská výška (m n. m.)	715 – 2023 (Demänovská dolina), 647 – 2043 (Jánska dolina)	400 – 500 (Miglinc, Palanta)
Geologická stavba	granodiority, ortoruly, svory, vápence, dolomity	waxenecké vápence, drienovecké zlepence
Hydrogeologické pomery	priepustnosť puklinová a puklinovo- krasová, zvýšené zvodnenie na tektonických poruchách, hladina podzemnej vody prevažne voľná	priepustnosť krasovo-puklinová, zvýšené zvodnenie na tektonických poruchách, predisponované zóny prúdenia podzemných vôd, hladina podzemných vôd voľná až napätá
Geomorfologické pomery	konsekventné doliny	tektonické svahy
Geomorfologický typ krasu	rozčlenený kras monoklinálnych hrebeňov a chrbtov	planinový kras
Priemerná teplota (°C)	3 – 6	8 – 9
Množstvo zrážok (mm)	900 – 1500	601 – 700
Výpar (mm/rok)	300 – 400	500 – 600
Pôdny typ	rendzina	rendzina
Vegetačné pomery	jedľové a jedľovo-smrekové lesy, smrekovo-smrekovcové lesy a travinné spoločenstvá	dubovo-cerové lesy, dubovo-hrabové lesy

Zdroj: Droppa (2013), Geologická mapa Slovenska M 1: 50 000 [online], Hydrogeologické mapy [online], Klimatický atlas Slovenska (2015), Michalko et al. (1986), Petrválská (2014), Tomlain (2002)

Drienovecká vyvieračka je situovaná na juhovýchodnom okraji Slovenského krasu, konkrétne na južnom úpätí Jasovskej planiny. Ide o jednu z najvýznamnejších výverových jaskýň s aktívnym tokom v tejto časti Slovenského krasu. Povodie jas-

kyne zasahuje do masívu Palanty (336 m n. m.), ktoré je tvorené svetlými waxenec-kými vápencami lagunárneho typu a čiastočne drienoveckými zlepenkami. Vyskytuje sa tu aj vrchná krieda a pokryvné terciérne a kvartérne sedimenty (Mello et al., 1996). Z geomorfologického hľadiska predstavuje okolité územie tektonické svahy (Petrválská, 2014).

Demänovská a Jánska dolina sa rozprestierajú v severnej časti Nízkych Tatier. Obidve doliny sú z geologického hľadiska zložené z dvoch častí. Južná časť je vyhlbená v kryštalickom jadre (granodiority, ortoruly, svory), severná časť v sedimentárnom obale (vápence, dolomity, slienité vápence atď.). Z geomorfologického hľadiska ide o konsekventné doliny, ktorých tvary závisia od geologickej stavby. Južné časti majú hladko modelovaný reliéf, severné časti ostro členené vrcholy a úzke doliny (Droppa, 1957, 1978).

Z porovnania obidvoch lokalít (tab. 4) je zrejmé, že ide o rozdielne typy krasu, ktoré sa líšia jednak nadmorskou výškou a z nej vyplývajúcimi rozdielmi v klimatických podmienkach a vegetačných pomeroch, ako aj (hydro)geologickými a geomorfologickými pomermi. Územie Slovenského krasu sa od Nízkych Tatier odlišuje vyššou priemernou teplotou, nižším množstvom zrážok a vyšším výparom. Z toho vyplýva menšie množstvo vody, ktoré môže infiltrovať do podzemia a podieľať sa na rozpúšťaní karbonátových hornín. Dôležitú úlohu však zohráva CO_2 . Vody Slovenského krasu sa vyznačujú vyššími obsahmi rozpusteného CO_2 , kým oblasti Jánskej a Demänovskej doliny sú s nižšími obsahmi rozpusteného CO_2 vo vode. Nízka teplota vody a ovzdušia spomaľuje uvoľňovanie CO_2 z vody (Droppa, 2013).

Z tab. 3 vyplýva, že po prepočítaní veľkosti denudácie na jednotu plochy je Demänovská dolina porovnateľná s povodím Drienoveckej vyvieracky, a to ako podľa vzťahu Pulinu (1974, 1999), tak aj Droppu (1976, 1978, 2013). Naopak Jánska dolina s podobnými prírodnými podmienkami ako Demänovská dolina, vykazuje oproti nej nižšie hodnoty chemickej denudácie. Droppa (1978) uvádza nižší obsah iónov Ca^{2+} a Mg^{2+} vo vodách vyvieracky Štiavnice v Jánskej doline, čo je s najväčšou pravdepodobnosťou príčinou nižšej denudácie v tejto doline. Nami vypočítané hodnoty pre Drienoveckú vyvieracku za rok 2016 sú vyššie ako v roku 2015, čo pravdepodobne súvisí s vyššou výdatnosťou prameňa v roku 2016.

Úloha CO_2 v procese krasovej korózie

Vyššie uvedené vzťahy pre výpočet intenzity chemickej denudácie krasu dávajú predstavu o veľkosti krasovej korózie, ale niektoré z nich nezohľadňujú faktory, ktoré majú na chemickú denudáciu vplyv, napr. neberú do úvahy množstvo oxidu uhličitého, ktorý má rozhodujúci podiel na rozpúšťaní hornín, pretože jeho prítomnosť vo vode ju mení na kyselinu uhličitú schopnú rozpúšťania. Príspevok dokumentujúci kľúčový význam oxidu uhličitého publikovali Lánczos a Filipčíková (2017). Taktiež Bajtoš et al. (2017) dokázali rozhodujúci vplyv CO_2 na rozpúšťanie karbonátových hornín a následnú tvorbu chemického zloženia vody. Ženišová a Fláková (2012) uvádzajú vzťah medzi koncentráciou Ca^{2+} iónov a parciálnym tlakom CO_2 . Tento vzťah je odvodený z rovnice pre výpočet rovnovážnej konštanty reakcie rozpúšťania kalcitu (Appelo a Postma, 2005):

$$m_{Ca^{2+}} = \sqrt[3]{\frac{10^{-6} \cdot p_{CO_2}}{4}},$$

kde $m_{Ca^{2+}}$ – mólová koncentrácia Ca^{2+} iónov, p_{CO_2} – parciálny tlak CO_2 .

Takisto uvádzajú, že pomocou tejto rovnice je možné určiť rýchlosť denudácie, ktorú charakterizujú ako dekalifikáciu. Pri nej dochádza k vyplavovaniu Ca^{2+} a HCO_3^- iónov vplyvom rozpúšťania karbonátových minerálov. Preto by možno bolo vhodné uprednostniť tie matematické vzťahy pre výpočet denudácie, ktoré zahŕňajú aj množstvo CO_2 .

Ďalšie faktory ovplyvňujúce krasovú koróziu skúmali napr. Droppa (1996) a Himmel (2000). Droppa (1996) preukázal vyššiu agresivitu zrážkových vôd už infiltrovaných v pôde oproti zrážkovým vodám na povrchu krasu. Príčinou je obohatenie infiltrovanej vody o pôdny CO_2 . Ten zase závisí od typu vegetačného krytu a od teploty pôdy ako uvádza Himmel (2000). Opadom lístia sa totiž do pôdy vracia určité množstvo organickej hmoty, ktorá pri svojom rozklade produkuje CO_2 . Pri vyššej teplote sa zase zvyšuje činnosť pôdnych baktérií, ktoré produkujú CO_2 . Ale naopak so zvyšujúcou sa teplotou klesá rozpustnosť plynov vo vode, čiže aj CO_2 . K podobným záverom prišli aj Roda et al. (1986). Vo svojej práci dôsledne popísali vplyv prírodných podmienok na proces krasovatenia. Analyzujú vplyv klímy, vody, pôdnych pomerov (pórovitosti pôd, pôdneho vzduchu, teploty pôdy, humusu a pôdneho edafónu), vegetácie a výparnosti.

Účinok krasovej korózie počas roka nie je rovnaký. Zistilo sa (Himmel, 2000), že najväčší účinok majú zimné a skoré jarné vody. Je to dané tým, že najväčšia rozpúšťacia schopnosť presakujúcej vody je práve v zimnom období (počas chladnejšieho obdobia sa vo vode rozpustí viac CO_2) a zároveň v zime je najväčšia infiltrácia pri minimálnej evapotranspirácii.

Bajtoš et al. (2017) geochemickým modelovaním na príklade Krásnohorskej jaskyne zistili, že na stálosť chemického zloženia vody v jaskyni má rozhodujúci vplyv obsah CO_2 v jaskynnej atmosfére a naopak zanedbateľný vplyv má teplota prostredia a chemické zloženie iniciálneho roztoku pochádzajúceho zo zrážkovej vody (príčinou je vysoká pufrčná schopnosť karbonátových hornín, cez ktoré zrážková voda preteká pri infiltrácii do podzemia). Pri meniacich sa podmienkach parciálneho tlaku CO_2 sa totiž chemické zloženie krasovej vody významne mení aj v prípade, že iniciálny roztok a teplota prostredia sú stabilné. V prípade, že parciálny tlak CO_2 a iniciálny roztok sú stabilné, dochádza k zmenám v chemickom zložení roztoku len vtedy, keď sa teplota prostredia rapidne mení. Pri stabilnom parciálnom tlaku CO_2 a stálej teplote prostredia vzniká krasová voda s prakticky zhodným zložením, aj keď iniciálne roztoky majú rôzne chemické zloženie.

Ford a Williams (2007) pripomínajú, že síce hovoríme o rozpúšťaní v súčasných klimatických podmienkach, ale je samozrejme, že environmentálne podmienky sa oproti minulosti zmenili s významnými dôsledkami na proces krasovatenia. Takáto extrapolácia výpočtov rozpúšťania do minulosti je obtiažna. Napríklad na základe fosílnych a izotopických záznamov nie je pochýb o tom, že za posledných 60 miliónov rokov bol stabilný pokles priemerných globálnych teplôt a atmosférické hod-

noty P_{CO_2} sa tiež výrazne zmenili (obidva pravdepodobne spojito kvôli skleníkovému efektu). Atmosférický P_{CO_2} bol pravdepodobne štyrikrát vyšší pred 50 miliónmi rokov ako dnes, čo je relevantné pre krasový vývoj počas terciéru. Počas kvartéru boli hodnoty P_{CO_2} relatívne nízke, ale kolísali o 30 % počas glaciálnych cyklov a na dnešnej Zemi sú v skutočnosti blízko k minimu (Edmond a Huh, 2003). Hydrologický cyklus takisto reagoval na zmeny globálnej teploty. Hodnoty P_{CO_2} , P a E v rovnici Whitea (2015) uvedenej vyššie môžu podliehať značným zmenám počas minulosti.

Štelcl et al. (1977) uvádzajú, že pre výpočet intenzity denudácie sú rozhodujúce údaje o množstve vody, ktorá pretečie krasovým územím, ďalej o množstve rozpustených látok vo vode, o veľkosti povodia a v ňom o ploche, ktorú zaberajú vápence.

Je vhodné podotknúť, že aj tá najčistejšia hornina obsahuje nerozpustný zvyšok, ktorý zostáva v krase ako kôra zvetrávania, príp. môže byť odnesený prostredníctvom mechanickej erózie. To znamená, že výsledný obraz o celkovej denudácii reliéfu nám môže dať len súčet chemickej a mechanickej erózie. Takže veľkosť samotnej chemickej denudácie nám nedáva úplnú predstavu o celkovej denudácii územia. Existujú aj vzťahy pre výpočet mechanickej denudácie, ale ešte nie sú tak rozpracované ako vzťahy pre výpočet chemickej denudácie. Vzhľadom na to, že v krase Slovenska prevažujú chemicky čisté horniny, domnievame sa, že veľkosť mechanickej denudácie by nemala mať výrazný vplyv na celkovú denudáciu krasového reliéfu.

4 ZÁVER

V predkladanom príspevku sme sa pokúsili zhodnotiť niektoré prístupy k zisťovaniu veľkosti chemickej denudácie krasu (krasovej korózie). Je evidentné, že rozdielne vstupné údaje, ktoré autori pri konštrukcii matematických vzťahov používajú vedú k rozdielnym výsledkom veľkosti denudácie. Takisto pociťujeme nedostatok údajov o chemickej denudácii krasu z rôznych oblastí Slovenska. Najkomplexnejšie je spracovaná severná strana Nízkych Tatier (Droppa, 1976, 1978, 1996, 2013), existujú aj údaje z oblasti Slovenského raja (Hochmuth a Vadelová, 2010) a východnej časti Slovenského krasu (Hochmuth a Vadelová, 2010; Gessert et al., 2021). Najdôležitejšími faktormi majúcimi vplyv na intenzitu krasovej korózie sú vlastnosti krasovej horniny, množstvo vody a obsah CO_2 vo vode, ktoré závisia od prírodných podmienok danej oblasti.

Ako už bolo spomínané, denudácia sa okrem hydrochemických metód dá určiť aj metódou vápencových doštičiek, ktorej priekopníkom bol Gams (1985). Na Slovensku túto metódu aplikovali Droppa (2013) v Nízkych Tatrách a Hochmuth a Vadelová (2010) v Slovenského raji a Slovenskom krase.

Výskum chemickej denudácie krasu predstavuje typ interdisciplinárneho výskumu, pri ktorom sa uplatňujú poznatky viacerých vedných disciplín. Okrem geológie (študuje horninové prostredie vhodné pre kras) a geomorfológie (krasové formy reliéfu) je to predovšetkým geochemia (skúma procesy rozpúšťania a zrážania vedúce k vzniku krasu), tiež meteorológia s klimatológiou (zrážky, vyparovanie atď.),

hydroológia a hydrogeológia (obeh vody v krase), pedológia (pôdny CO₂), biovedy (organizmy majúce vplyv na produkciu CO₂) a samozrejme štatistika (spracovanie a analýza dát). To poskytuje možnosť uplatnenia odborníkov z rôznych oblastí a formovanie interdisciplinárnych výskumných tímov.

Pod'akovanie

Chceli by sme vyjadriť pod'akovanie grantu KEGA 016UPJŠ-4/2021 za umožnenie venovať sa problematike krasu, ako aj vedúcej projektu RNDr. Alene Gessert, PhD. za poskytnutie nameraných dát z územia Slovenského krasu potrebných k výpočtu chemickej denudácie.

Literatúra

- APPELO, C. A. J., POSTMA, D. 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd Edition, Balkema, Rotterdam.
- BAJTOŠ, P., MALÍK, P., REPKOVÁ, R., MÁŠA, B. 2017. Geochemické modelovanie tvorby chemického zloženia vody Krásnohorskej jaskyne v Slovenskom krase. *Mineralia Slovaca*, 49, 73-94.
- BARTOSZEWSKI, S., MAGIERSKI, J. 1989. *Denudacja chemiczna w zlewniach rzecznych w okolicy Calypsobyen (Zachodni Spitsbergen)*. Wyprawy geograficzne UMCS w Lublinie na Spitsbergen 1988 – 89, Sesja polarna 1989. Lublin, 69-77.
- CORBEL, J. 1959. Erosion en terrain calcaire. *Annales de Géographie*, H. 68, Paríž, 9-120.
- ČIKIŠEV, A. G. 1976. O primenenii količestvennych metodov dlja ocenki intensivnosti karstovej denudacii. In *Proceedings of the 6th Inter. Congress of Speleology*. Academia, Praha, vol. II, 65-70.
- DROPPA, A. 1976. Intenzita korózie krasových tokov v Demänovskej doline. *Slovenský kras*, XIV, 3-30.
- DROPPA, A. 1978. Intenzita korózie tokov v Jánskej doline. *Slovenský kras*, XVI, 39-67.
- DROPPA, A. 1996. Vplyv ročných období na koróziu Demänovského krasu. Kras a jaskyne – výskum, využívanie a ochrana. In *Zborník referátov z vedeckej konferencie, Liptovský Mikuláš 10. – 11. 10. 1995*. SMOPAJ, Liptovský Mikuláš, 63-70
- DROPPA, A. 2013. Korózný účinok krasových tokov na severnej strane Nizkych Tatier. *Slovenský kras*, 51, Suppl. 1, 104.
- EDMOND, J. M., HUH, Y. 2003. Non-steady-state carbonate recycling and implications for the evolution of atmospheric P_{CO2}. *Earth and Planetary Science Letters*, 216, 125-39.
- ELLAWAY, M., SMITH, D. I., GILLIESON, D. S., GREENAWAY, M. A. 1990. Karst water chemistry – Limestones Ranges, Western Australia. *Helictite*, 28(2), 25-36.
- FORD, D., WILLIAMS, P. 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester.
- GABROVŠEK, F. 2007. On denudation rates in karst. *Acta Carsologica*, 36(1), 7-13. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v36i1.203>
- GAMS, I. 1966. Faktori in dinamika korozije na karbonatnih kameninah slovenskega, dinarskega krasa. *Geogr. Vestnik*, 38, 11-68.
- GAMS, I. 1969. Zur Ergänzung der vergleichenden Forschungen der Karstkorrosionsintensität. In *Abh. Des 5. int. Kongres fur Speläologie*, B 2, Mnichov, 25.
- GAMS, I. 1985. International Comparative Measurements of surface solution by means of standard limestone tablete. In *Razprav IV. razreda SAZU-Zbornik I. Rakov. XXVI*, Ljubljana, 361-386.

- Geologická mapa Slovenska M 1: 50 000. Bratislava, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, 2013. [online] [cit. 2023-05-20]. Dostupné na: <<http://apl.geology.sk/gm50js>>
- GESSERT, A., SLÁDEK, I., STRAKOVÁ, V., BRAUN, M., HEIM, E., CZÉBELY, A., PALCSU, L. (2021). Ionic Runoff as a Way to Determine the Degree of Karst Denudation (Case Study Jasov Plateau, Slovak Karst, Slovakia). *Water*, 13, 11, 1449.
- GESSERT, A., SLÁDEK, I., BRAUN, M., HEIM, E., CZÉBELY, A., PALCSU, L. (2022). Factors and chemical denudation dynamic in the area of Drienovec Cave basin (Slovak karst, Slovakia). *Geografické informácie*, 2, 79-90.
- HIMMEL, J. 2000. Intenzita krasovnění vápenců zóny vertikální krasové cirkulace v Moravském krasu. *Speleo*, 29, 12-18.
- HIPMAN, P. 1981. Podzemný hydrologický systém Krakova hoľa. *Spravodaj SSS*, XII, 4, 16-19.
- HOCHMUTH, Z., VADELOVÁ, I. 2010. Výskum kvantitatívnych aspektov povrchovej korózie krasových hornín v Slovenskom raji a Slovenskom krase. *Slovenský kras*, 48, 2, 241-251.
- Hydrogeologické mapy. Bratislava: Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, 2008. [online] [cit. 2023-05-20]. Dostupné na: <<http://apl.geology.sk/hydrogeol>>
- CHMIEL, S., BARTOSZEWSKI, S., SIWEK, K., SPOSÓB, J. 2012. Chemical and mechanical denudation rates in the Scott River catchment (Svalbard) during the summer season 2005. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska*, Vol. LXVII, 1, Sectio I, Lublin, 93-107.
- CHMIEL, S., BARTOSZEWSKI, S., SIWEK, K. 2011. Chemical denudation rates in the Wyrzyca catchment (Bellsund, Spitsbergen). *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska*, Vol. LXVI, 1, Sectio B, Lublin, 115-128.
- JAKÁL, J., ABONYI, A., BARTA, J., GULIČKA, J., HIPMAN, P., MITTER, P., RAJMAN, L., RODA, Š., SLANČÍK, J. 1982. *Praktická speleológia*. Osveta, Martin.
- JAKÁL, J. 2005. Vlastnosti geologickej štruktúry a ich odraz v usmernení procesov krasovania. *Geomorphologia Slovaca*, 5, 2, ASG, Bratislava, 16-22.
- KOLEKTÍV 2015. *Klimatický atlas Slovenska*. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava.
- LÁNCZOS, T., FILIPČIKOVÁ, N. (2017). Speleogenetický význam CO₂ pre vývoj vybraných jaskýň Plaveckého krasu v Malých Karpatoch. *Slovenský kras*, 55, 1, 5-22.
- MALECKI, J. J., SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA, M. 2008. Wykorzystanie modelu numerycznego obliczeń denudacji chemicznej zlewni potoku Białego (Tatry Zachodnie). *Buletyn państwowego instytutu geologicznego*, 431, 127-134.
- MICHÁLKO J. 1986. *Geobotanická mapa ČSSR: Slovenská socialistická republika*. Veda, Bratislava.
- PANCURÁKOVÁ, M. 2009. *Chemická denudácia vo vzťahu k mineralizácii krasových vôd v jaskyni Zlá diera*. Diplomová práca, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Košice.
- PANOŠ, V. 2001. *Karsologická a speleologická terminologie. Výkladový slovník s ekvivalenty ve slovenštině a jednacích jazycích Mezinárodní speleologické unie (UNESCO)*. Knižné centrum, Žilina.
- PETRVALSKÁ, A. 2014. *Reliéf Jasovskej planiny v Slovenskom krase*. UPJŠ, Košice.
- PRELOVŠEK, M. 2012. The dynamics of the present-day speleogenetic processes in the stream caves of Slovenia. *Carsologica*, 15, Založba ZRC, Ljubljana – Postojna.
- PŘIBYL, J., LOŽEK, V., KUČERA, B., BOSÁK, P., CÍLEK, V., JANČAŘÍK, A., KIRCHNER, K., PANOŠ, V., SKLENÁŘ, K., SLAČÍK, J., ŠMEJKAL, V., ŠTĚRBA, O., VAŠÁTKO, J., VLČEK, V. 1992. *Základy karsologie a speleologie*. Academia, Praha.
- PULINA, M. 1974. Denudacja chemiczna na obszarach krasu weglanowego. *Prace geograficzne*, 105, PAN Warszawa.
- PULINA, M. 1999. *Kras. Formy i procesy*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.

- PULINA, M., POSTNOV, J. 1989. Karst gypseux dans la partie N-W Terre Nordenskiöld. Spitsberg occidental. *Kras i Speleologia*, 6 (XV), 40-57.
- PULINA, M., FAGUNDO, J. R. 1992. Tropical karst and chemical denudation of western Cuba. *Geographia Polonica*, 60, PAN Warszawa, 196-216.
- RODA, Š., RAJMAN, L., ERDÖS, M., SZABOVÁ, T. 1986. Vznik a vývoj sintrových foriem v piatich jaskyniach Slovenského krasu. *Gemerské vlastivedné pohľady*, 76, Osveta, Martin.
- RODIONOV, V. N. 1949. *Nekotoryje dannyje o skorosti rozvitija karsta*. Trudy lab. gidrogeolog. problem, G. Moskva.
- RZONCA, B., BUCZYNSKI, S. 2013. Intense karst denudation in a crystalline basin with a small share of carbonate rocks (Sudety Mountains, SW Poland). *Catena*, 107, 154-164.
- SLÁDEK, I. 2013. Vplyv chemickej čistoty vápencov Slovenského krasu na proces krasovatenia. *Mineralia Slovaca*, 45, 4, Geovestník (2013), 19.
- SLÁDEK, I. 2014. Predbežné výsledky výskumu vplyvu obsahu dolomitovej zložky vo vápencoch východnej časti Slovenského krasu na proces krasovej korózie. *Geographia Casoviensis*, 8, 2, 173-180.
- ŠAVRNOCH, J. 1978. Kvantitatívne metódy výskumu chemickej denudácie krasu. *Spravodaj SSS*, 1, Liptovský Mikuláš, 18-25.
- ŠTELCL, O., VLČEK, V., PANOVSÝ, K. 1977. Intenzita korozie rôznych typů karbonátových hornin v ČSR. *Československý kras*, 28, Academia, Praha, 29-48.
- TOMLAIN, J. 2002. Priemerné a extrémne úhrny potenciálnej a aktuálnej evapotranspirácie na území Slovenska. *Štúdia XIX*, roč. XVI. Slov. bioklim. spoločnosť SAV, Bratislava, Nitra.
- VADELOVÁ, I. 2008. *Regionálne rozdiely v chemickej denudácii krasu*. Diplomová práca, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Košice.
- WHITE, W. B. 2015. Chemistry and karst. *Acta carsologica*, 44/3, 349-362.

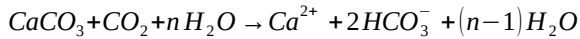
Development of methods for calculating the quantity of chemical denudation of karst by hydrochemical methods

Summary

Chemical denudation of karst (karst corrosion) is the basic process of creating karst relief. Therefore, it has been the subject of research by carsologists both in the world and in Slovakia for many years, which is documented by a number of publications in this area. For all of them, we can mention e.g. work of Corbel (1959), Gamsa (1966, 1969), Pulina (1974, 1999), in the recent period e.g. Gabrovšeka (2007, 2009), Chmiela et al. (2011, 2012), Plana (2005) and others. Droppa (1976, 1978, 2013) was a pioneer in this area in Slovakia, later he was followed by Pančuráková (2009), Hochmuth and Vadelová (2010), or Sládek (2013, 2014). There are several ways to determine the size of chemical denudation. We can divide them into direct and indirect. Direct methods include e.g. limestone plate method. Other methods (indirect) are based on field measurements of various quantities that are involved in karst corrosion (so-called hydrochemical methods). Mitter (1982, in Jakál, 1982) defines hydrochemical methods as methods used to determine the intensity of chemical denudation of carbonate rocks on the surface and underground in various climatic zones of the Earth.

Hydrochemical methods make it possible to calculate the intensity (size) of karst corrosion using various mathematical relations. These relationships are more or less accurate depending on the input data used.

The process of karst corrosion is quite complicated, but its essence is expressed by the following equation (Pulina, 1999):



It follows that in order for corrosion to take place, the presence of karst rock (limestone, etc.), water and carbon dioxide, which is dissolved in water, is necessary, thus converting it into carbonic acid. According to other factors, Jakál et al. (1982) important importance of climate, relief and topography of the territory, soil and biocomponent. From the properties of karst rocks, the chemical purity of the rocks, the thickness and storage conditions of the rocks are important, as well as the porosity and cracking of the rocks. After the carbon dioxide escapes, the dissolved rock can precipitate in the form of a secondary fill directly in the caves or in the form of bicarbonate it is transported by karst waters outside the karst massif to the surface, where it can precipitate in the form of foams and travertines. This process denudates the relief and creates karst forms. This process can be evaluated both in terms of dynamics (changes in corrosion intensity during different time periods) and in terms of factors that affect corrosion (amount of water in the karst area, amount of carbon dioxide, purity of karst rock, climatic conditions, etc.).

The relationships for calculating the intensity of chemical denudation of karst given in this paper give an idea of the size of karst corrosion, but do not take into account some factors that affect chemical denudation. Some of them do not take into account the amount of carbon dioxide, which plays a decisive role in the dissolution of rocks, because its presence in water turns it into a soluble carbonic acid.

Therefore, we recommend using such relationships when calculating chemical denudation, which also include the amount of carbon dioxide.

It should be noted that even the purest rock contains an insoluble residue, which remains in the karst as the weathering bark, or can be carried away by mechanical erosion. This means that the resulting picture of the total denudation of the relief can only give us the sum of chemical and mechanical erosion. There are also relationships for the calculation of mechanical denudation, but they are not yet as developed as the relationships for the calculation of chemical denudation. Given that chemically pure rocks predominate in the karst of Slovakia, we believe that the size of the mechanical denudation should not have a significant effect on the overall denudation of the karst relief.