

# Súčasný limnologický výskum tatranských jazier

Bitušík, P.: Recent Limnological Survey of the Tatra Mountain Lakes. *Životné prostredie*, 2013, 47, 3, p. 134 – 139.

*The paper shortly summarises the results of limnological research activities in lakes of the Tatra Mountains. Recent limnological research has an international and multidisciplinary character. In the last decades, it has been a part of integrated studies of European lake ecosystems within environment projects of European Commission, recently is supported by national scientific agencies. Interest on the Tatra lakes increased since the beginning of the 1980s due to acidification – derived changes in lake chemistry followed by changes in planktonic and benthic communities. A dramatic decrease in the deposition of acidifying compounds in the beginning of the 1990s started intensive studies on a reversal of lake chemistry and biological recovery. The analyses of long-term chemical-biological interactions have been based on recent and historical data, chemistry reconstructed by the dynamic models and paleolimnological records. Recently, the studies of temperature characteristics and palaeolimnological analyses are employed to reconstruct lake ontogeny and climate patterns.*

*Key words: lakes, acidification, recovery, climate change, limnology, palaeolimnology, Tatra Mountains, Slovakia*

Pre prírodovedcov boli Tatry vždy atraktívnym miestom na štúdium a plesá a horské potoky neboli výnimkou. Prví bádatelia začali zhromažďovať a publikovať údaje o flóre a faune tatranských vôd pred viac ako 100 rokmi. Zvlášť jazerá pútali pozornosť prírodovedcov pre ich glaciálny pôvod, nízke teploty, krátke obdobie bez ľadu, nízky obsah živín, neporušenosť, čo boli podmienky diametrálne odlišné od tých, ktorými sa vyznačovali jazerá v nižších polohách a ktoré boli dovtedy predmetom ich záujmu.

História skutočných hydrobiologických, resp. limnologických výskumov sa však začala písať len pred polstoročím a zahájil ju výskum Popradského plesa v roku 1961, ktorý realizovala skupina odborníkov okolo dr. Milana Ertla z vtedajšieho Laboratória rybárstva a hydrobiológie (Juriš a kol., 1965). Výskum bol motivovaný obavami o kvalitu jeho vody, ktorú znečisťovali odpadové vody z turistickej chaty, v tom čase najnavštevovanejšej v Tatrách. Treba poznamenať, že aj vďaka výsledkom tohto výskumu sa našlo vhodnejšie riešenie na ich odvádzanie tak, aby priamo neovplyvňovali život v plese.

Čoskoro však bolo identifikované iné, oveľa vážnejšie nebezpečenstvo, ktoré pôsobilo nadregionálne a v rôznom rozsahu postihlo všetky tatranské vody. Tým nebezpečenstvom bola ich *acidifikácia* ako dôsledok znečistenia atmosféry oxidmi síry a dusíka. Nová situácia vyvolala zvýšený záujem o štúdium jazier situovaných nad hranicou lesa. Od začiatku 90. rokov minulého storočia začali slovenskí, českí a poľskí odborníci participovať na niekoľkých, na seba nadväzujúcich, medzinárodných a multidisciplinárnych projektoch (AL:PE – *Alpine Lakes: Palaeolimnology and Ecology*, MOLAR – *MOuntain LAke Research*, EMERGE – *Europaean Mountain Lake Ecosystems: Regionalisation, DiaGnostics, Socio-economic Evaluation*) fi-

nancovaných Európskou úniou, zameraných na výskum odľahlých jazier Európy. Bol to impulz na prehĺbenie spolupráce a zintenzívnenie výskumu tatranských jazier, ktorý pokračuje bez prerušenia dodnes.

## Acidifikácia a jej vplyv na jazerné ekosystémy

Následky acidifikácie tatranských jazier boli identifikované a popísané začiatkom 80. rokov minulého storočia (Stuchlík a kol., 1985). Autori vyhodnotili v rokoch 1981 – 1983 súbor 268 lokalít, ktorými boli, okrem jazier, tiež ich prítoky a odtoky, potoky, pramene, vlhké skalné steny a rašeliniská. Získané hodnoty pH, alkalinity a vodivosti a biologické dáta predstavovali v tom čase prvý rozsiahly súbor exaktných meraní, ktoré mali a stále majú nesmierne význam ako referenčné údaje pre ďalšie výskumy. Porovnaním so staršími dostupnými údajmi o chemickom zložení vody z niektorých jazier na slovenskej a poľskej strane Tatier zistili výrazný nárast koncentrácie iónov silných kyselín ( $\text{NO}_3^-$  a  $\text{SO}_4^{2-}$ ) zo zrážok a súčasne zníženie podielu  $\text{HCO}_3^-$ . Zo 132 sledovaných jazier a malých stojatých vôd bola takmer polovica (42 %) acidifikovaná. Aj neskoršie výsledky štúdia chemizmu vody 52 jazier vo Vysokých a 13 jazier v Západných Tatrách poukázali na zhodu meraní vykonaných tímom dr. Stuchlíka začiatkom 80. rokov 20. storočia a súčasne naznačili, že v rokoch 1986 – 1990 sa priemerné hodnoty pH znížili o 0,2, čo bolo dôkazom stále pokračujúceho procesu acidifikácie (Tomajka, 1996).

Acidifikácia postihla vody prakticky vo všetkých dolinách žulovej časti Tatier, ale jej dôsledky sa prejavili len tam, kde hodnoty alkalinity nezabezpečovali dostatočnú pufracnú kapacitu vody. Najlepšia situácia bola v Temnosmrečinskej, Bielovodskej, Javorovej, Mengusovskej

a časti Veľkej Studenej doliny, zatiaľ čo najviac postihnuté boli malé a plytké plesá s malými povodiami závislé od zrážkovej vody (napr. Malé Batizovské, Slavkovské, Starolesnianske – obr. 1, Vyšné Kozie pleso, Satanie plieska, Sesterské plesá, Vyšné Strelecké plesá, Hrubé plesá). Okyslenie výrazne modifikovalo produktivitu jazier situovaných nad pásmom lesa. V acidifikovaných jazierách bola koncentrácia celkového fosforu, organického uhlíka, organického dusíka, ale aj chlorofylu-*a* najnižšia, naopak v silne acidifikovaných jazierách najvyššia, dokonca vyššia ako v jazierách neacidifikovaných, čo sa prejavovalo aj v priehľadnosti.



Obr. 1. Starolesnianske pleso patrilo k najviac acidifikovaným jazierám Tatier (2009). Foto: Peter Bitušík

Zatiaľ čo priehľadnosť v acidifikovaných jazierách bežne prevyšovala v tom čase 10 m, v silne acidifikovaných jazierách nedosahovala väčšinou ani 2 m.

Zmeny chemického zloženia vody spôsobené acidifikáciou pôsobia na organizmy priamo a nepriamo. Priame efekty sú spojené s toxickými účinkami zvyšovania koncentrácie  $H^+$ , toxických kovov (zvlášť Al) a ďalších zlúčenín, ktoré môžu presahovať limity tolerancie citlivých druhov. Výsledkom je mortalita alebo subletálny stres, ktorý sa prejavuje ako poruchy v reprodukcii, spomalenie rastu, zníženie príjmu potravy, zníženie rýchlosti respirácie a prežívania. Nepriame vplyvy sú väčšinou spojené s narušením, resp. modifikovaním potravných vzťahov a zvyšovaním parazitácie.

Vzhľadom na to, že o druhovom zložení zooplanktónu existuje relatívne najviac starších údajov publikovaných ešte pred nástupom acidifikácie, stala sa táto skupina organizmov modelom, na ktorom bolo možné najlepšie demonštrovať vplyv acidifikácie na biotickú zložku ekosystémov tatranských jazier. V porovnaní s inými acidifikovanými jazernými oblasťami sveta bol efekt acidifikácie na zooplanktón oveľa drastickejší. Z mnohých acidifikovaných tatranských jazier pôvodný zooplanktón vymizol úplne a hľadanie príčin tohto tatranského fenoménu sa stalo výzvou pre ďalší výskum. Ďalšie štúdie ukázali, že absenciu zooplanktónu z acidifikovaných jazier nespôsobilo ani tak samotné pH (5,1 – 6,1), ale oligotrofizácia (zníženie obsahu živín), ktorá neumožnila rozvoj fytoplanktónu ako potravného zdroja pre zooplanktón. Ten vyhynul v dôsledku dlhodobého nedostatku potravy.

Bezstavovce obývajúce dno jazier (bentická makrofauna, resp. makrozoobentos) sa využívali ako organizmy skorého varovania, to znamená, že ich monitorovaním bolo možné odhaliť už veľmi skoré fázy acidifikácie ešte predtým, než sa negatívne vplyvy začali prejavovať na rybách. Druhové bohatstvo bentickej makrofauny v te-

úcich i stojatých vodách je značné, jednotlivé druhy majú rozdielne nároky na podmienky prostredia, vrátane pH. Detailné štúdium má potenciál priniesť informácie nielen o tom, či voda je alebo nie je okyslená, ale aj o tom, aký je rozsah acidifikácie.

V rokoch 1981 – 1987 bol vyhodnotený rozsiahly materiál litorálneho makrozoobentosu odobraného z 51 vysokotatranských plies, pričom pozornosť bola sústredená predovšetkým na nápadné skupiny vodného hmyzu: podenky, pošvatky a potočníky. Krno (1991) popísal spoločenstvá jednotlivých typov plies, zaradil druhy do kategórií tolerantnosti voči pH a na základe indikačných druhov stanovil stupeň ich acidifikácie. Ukázalo sa, že okrem eliminácie najcitlivejších druhov acidifikácia najviac ohrozila celý potravný reťazec smerujúci od konzumentov nárastových rias po ich predátorov. Už vtedy bolo zrejmé, že niektoré druhy nereagujú na aciditu vody tak, ako to uvádzal pôvodný model vyvinutý v Škandinávii. Výskumy v ďalších rokoch viedli k doplneniu údajov o ekologických nárokoch jednotlivých druhov v podmienkach Tatier, čo vyústilo aj do zmien v ich zaradení do jednotlivých kategórií tolerantnosti. Vznikol tak nový zoznam indikátorov rozšírený o skupinu druhov schopných rozlíšiť miernejšie stupne acidity. Nový model, tzv. *Tatra Acidification Index* (TAI) (Bitušík et al., 2006) tak umožnil rozlíšiť až 5 stupňov acidifikácie tatranských plies.

Výskum bentickej makrofauny 13 západotatranských plies v rokoch 1988 – 1990 ukázal, že druhové bohatstvo bolo zhruba o tretinu nižšie ako v plesách Vysokých Tatier a že zloženie spoločenstiev bolo v niektorých plesách (Bystré plesá, Račkove plesá, Nižné Jamnícke) výrazne ovplyvnené prítomnosťou populácií hlaváča pásopľutvého (*Cottus poecilopus*). Predačný tlak rýb prevyšoval svojím dopadom aj efekt takých faktorov, ako je nadmorská výška a pH, preto hodnotiť acidifikačný status týchto plies bolo veľmi problematické (Vranovský et al., 1994).

Získať predstavu o vplyve acidifikácie na benthické spoločenstvá nie je vždy jednoduché. Na rozdiel od zooplanktónu sú staršie publikované údaje, ktoré by zachytávali stav pred acidifikáciou, pomerne vzácne a ich interpretácia naráža na viaceré problémy. Chýbajúce dlhodobé dáta z klasického limnologického výskumu je možné doplniť alebo nahradiť údajmi zaznamenanými v ich sedimentoch. Neporušené jazerné sedimenty sú doslova archívom, v ktorom sa, obrazne povedané, rok čo rok zapisujú udalosti odohrávajúce sa nielen v jazere samotnom, jeho povodí, ale aj v širšom okolí.

*Paleolimnológia* ako vedná disciplína sa začala intenzívne rozvíjať v 70. – 80. rokoch minulého storočia a na Slovensku boli jej metódy aplikované po prvýkrát práve v tatranských jazeroch. Cieľom prvých štúdií bolo získať spoľahlivú predstavu o tom, ako vyzerali spoločenstvá v predindustriálnom období a identifikovať rozsah ich poškodenia acidifikáciou. Tieto informácie boli súčasne aj východiskom pre prognózovanie ich obnovy v budúcnosti. Analýzy biologických zvyškov (larvy pakomárov, perloočky, rozsievky, cysty žltých rias), ale aj ďalších zástupných (tzv. proxy) dát, napr. množstva organickej hmoty, zmien v zastúpení pigmentov, koncentrácie sférických uhlíkatých častíc (SCPs), umožnili sledovať reakcie niekoľkých typov jazier na acidifikačný stres. Najvýraznejšie zmeny v spoločenstvách boli, podľa očakávania, zistené v silne acidifikovaných jazeroch, ale na acidifikačný stres reagovali aj spoločenstvá v jazeroch, ktoré po chemickej stránke neboli postihnuté acidifikáciou (Šporka et al., 2002; Bitušik et al., 2006).

### Zotavovanie jazier a obnova spoločenstiev po acidifikácii

Zmeny chemického zloženia vôd tatranských jazier nastali začiatkom 90. rokov minulého storočia ako dôsledok podstatného zníženia emisií síry a dusíka v celej Európe. Prakticky za jedno desaťročie došlo v Tatrách k poklesu depozície síry o viac než 50 % oproti maximu v 80. rokoch. Súčasne sa znížila depozícia  $\text{NO}_3$  o 30 – 35 % a depozícia  $\text{NH}_4$  klesla na úroveň rokov 1900 – 1950 (Kopáček et al., 2001). Tieto zmeny vyústili do globálneho zotavovania tohto územia z acidifikácie, ktoré svojim rozsahom patrí k najväčším medzi európskymi horskými celkami. Obdobie po odznení acidifikácie ešte stále predstavuje pre vedcov unikátnu a v budúcnosti pravdepodobne už neopakovanú príležitosť študovať procesy obnovy jazerných ekosystémov. Zmeny v chemickom zložení jazernej vody boli niekedy naozaj rýchle, ale v mnohých prípadoch bol proces zotavovania pomalší, ako by zodpovedalo zníženiu emisnej záťaže. Príčinou sú zložité interakcie medzi vlastnosťami samotného jazera a jeho povodím (Kopáček et al., 2002). Dôležitú úlohu zohrávajú pôdy v povodí, ktoré pôsobili ako pasca na síran, zadržovali ho a len pomaly uvoľňovali do jazera, takže jazerá s dobre vyvinutými pôdami v povodiach sa okysľovali pomalšie,

pretože pôdy zachytávali a zadržovali síran. V súčasnosti však je ich zotavovanie pomalšie, pretože síran z pôd stále odteká do vody. Naopak, jazerá s povodiami tvorenými prevažne skalami a s malou zásobou pôd sa acidifikovali rýchlo a aj proces ich zotavovania prebieha rýchlejšie. Zmeny koncentrácie anorganického dusíka, predovšetkým dusičnanov v jazernej vode ako reakcie na pokles emisií nie sú, na rozdiel od síranu, zreteľné vo všetkých typoch jazier. Zvýšený prísun dusíka počas acidifikácie spôsobil, že jeho množstvo v pôdach prekročilo úroveň, ktorú dokážu spotrebovať rastliny a mikroorganizmy a nespotrebovaný dusík, hlavne vo forme dusičnanov, odteká z povodia do jazier. Tento proces sa najviac prejavil v jazeroch s prevažne skalnatými povodiami, kde sa málo vyvinuté pôdy rýchlo saturovali dusíkom a jeho odtok do jazier naďalej pretrvával (Bitušik et al., 2006).

Zlepšenie kvality vody sa stalo základom pre obnovu biotickej zložky jazerných ekosystémov. Proces biologickej obnovy, chápaný ako návrat pôvodných druhov, je však oveľa zložitejší než chemické zotavovanie. Proces biologickej obnovy nie je totiž kontrolovaný len zvýšením pH vody a znížením koncentrácie toxického hliníka, ale je výsledkom zložitých procesov prebiehajúcich nielen v jazere samotnom, ale aj v systéme jazero – povodie. Súvisí tiež s ekologickými nárokmi druhov a ich schopnosti znovu osídliť pôvodné biotopy, navyše môže byť komplikovaný sprievodnými javmi globálnej klimatickej zmeny. Preto je proces biologickej obnovy zle čitateľný a jeho smerovanie ťažko predvídateľné. Pochopiť ho a správne interpretovať je možné len vtedy, ak je známy predacidifikačný stav a ak sú k dispozícii údaje z dlhodobého výskumu. Našťastie sledovanie procesu biologickej obnovy tatranských plies mohlo stavať na takomto type údajov, hoci ich kvalita nebola pre všetky jazerá a pre všetky skupiny organizmov rovnaká.

Na príklade zooplanktónu je dobre vidieť, že výsledné trajektórie obnovy sú ovplyvňované jednak zložitými biochemickými procesmi v jazeroch, jednak trofickými vzťahmi medzi populáciami. V roku 2001 bol úplný návrat pôvodných druhov zooplanktónu pozorovaný len v troch zo skupiny jedenástich, predtým acidifikovaných plies a v troch ďalších sa zistili len čiastočné znaky obnovy. Obnovenie stabilizovanej populácie predtým dominantnej perloočky *Daphnia pulicaria* znemožňuje to, že druh nie je schopný tolerovať dlhodobo nízke koncentrácie potravy (fytoplanktónu), čo je stav typický pre niektoré z predtým acidifikovaných plies. V týchto podmienkach prežívajú veslonôžky *Arctodiaptomus alpinus* a *Cyclops abyssorum tataricus* a tvoria základ čiastočne obnovených spoločenstiev. Dôsledkom oligotrofizácie predtým silne acidifikovaného Starolesnianskeho plesa bol pokles biomasy fytoplanktónu, čo viedlo k opätovnému vymiznutiu perloočky *Ceriodaphnia quadrangula*, ktorá sa v plese objavila v roku 2000.

V rámci kategórie v minulosti acidifikovaných plies sa určite najrozsiahlejšia obnova benthickej fauny odohrala vo Vyšnom Wahlenbergovom plese (obr. 2). V rokoch

2000 – 2001 tu bolo zaznamenané druhovo bohaté litorálne spoločenstvo, v ktorom nechýbali acidosenzitívne druhy (Bitušík et al., 2006; Čiamporová-Zaťovičová et al., 2010). V ostatných plesách nie sú signály obnovy také zreteľné. Dobrým príkladom ilustrujúcim zložitosť biologickej obnovy môže byť detailná štúdia vývoja spoločenstiev pakomárov v predtým silne acidifikovanom Starolesnianskom plese. Na vyhodnotenie rozsahu obnovy bola použitá kombinácia paleolimnologických a neolimnologických metód. Stratigrafický záznam zvyškov lariev zachytával obdobie trvajúce približne 350 rokov a končil sa v roku 1993, keď bola



Obr. 2. Vo Vyšnom Wahlenbergovom plese bola obnova pôvodných bentických spoločenstiev po skončení acidifikácie pomerne rýchla (2013). Foto: Peter Bitušík

vzorka sedimentu odobraná. Na tieto paleolimnologické informácie nadviazali údaje získavané odbermi živých lariev z litorálu jazera medzi rokmi 1993 a 2010. Starolesnianske pleso vykazovalo typický trend chemického zotavovania, aký bol pozorovaný aj u iných tatranských jazier. Hodnoty pH sa postupne zvyšovali od ich minima 4,5 – 4,8 v 80. rokoch minulého storočia na približne 5,6 v roku 2010, obnovil sa uhlíčanový pufrčný systém a hodnoty anorganického hliníka klesli pod  $10 \mu\text{g.l}^{-1}$ . Spoločenstvo sa stalo druhovo bohatšie, jeho štruktúra sa však stále odlišuje od toho, ktoré jazero osídľovalo do začiatku 20. storočia. Chýba v ňom predtým dominantný druh, a to aj napriek tomu, že chemické zloženie vody jazera zodpovedá úrovni pred rokom 1950. Významným zistením tejto štúdie však bolo, že okrem zmien pH je viac ako 20 % variability v zložení spoločenstiev pakomárov zapríčinených zmenami teploty. Zvýšenie podielu niektorých druhov nielen v súčasnosti, ale aj v období medzi rokmi 1781 – 2010, ku ktorému bol modelovaný trend teplôt vzduchu, je v pozitívnom vzťahu k nárastom teploty. Predpokladaná globálna zmena teploty môže teda významne ovplyvňovať výsledný efekt biologickej obnovy a s najväčšou pravdepodobnosťou spoločenstvo v tomto jazere nedosiahne pôvodný stav, ale obnoví sa v odlišnej štruktúre.

### Tatranské jazerá a klimatická zmena

Globálna zmena klímy so svojimi závažnými ekologickými a sociálno-ekonomickými dôsledkami je jedným z najviac diskutovaných problémov v súčasnosti. Merané dáta naznačujú, že zmeny klímy sú výraznejšie vo vyšších nadmorských výškach než v nižších polohách. Preto sa jazerá ležiace nad prirodzenou hranicou lesa považujú za mimoriadne citlivé senzory klimatických výkyvov.

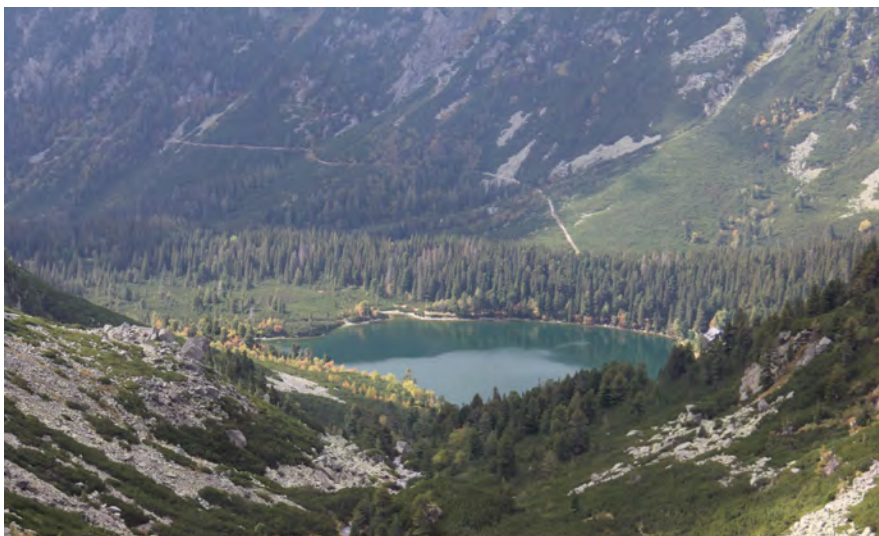
Rozdiely v teplote vzduchu súvisiace s nadmorskou výškou sú hlavným riadiacim faktorom života v horách.

Tento výškovo-teplotný gradient má na horskú biotu celý rad priamych a nepriamych účinkov. Povrchová teplota jazernej vody veľmi úzko súvisí s teplotou vzduchu, a tak akákoľvek jej zmena ovplyvní dĺžku zamrznutia a dobu trvania snehovej pokrývky. Zvlášť v jazerách vo výškach 1 500 – 2 000 m n. m. majú takéto zmeny veľmi výrazný dopad na biologické a chemické procesy a tieto efekty sa prejavujú už pri pomerne malých rozdieloch nadmorskej výšky.

V rámci projektu EMERGE bol vytvorený koncept tzv. *gradientových jazier*, v ktorom jazerá situované v rôznych nadmorských výškach reprezentovali prirodzený klimatický gradient a slúžili ako model na pochopenie ekologických dopadov klimatickej zmeny a predikciu budúceho vývoja jazerných systémov.

V európskych pohoriach boli vybrané modelové jazerá tak, aby sa minimalizovali geologické, chemické a morfometrické rozdiely a naopak, aby boli zdôraznené rozdiely v nadmorskej výške a tým aj v ich teplotnom režime. Pre Tatry boli vybrané tri plesá veľmi podobnej morfometrie a ležiace v nadmorských výškach s odstupom približne 200 m: Vyšné Temnosmrečinské (1 725 m), Nižné Terianske (1 940 m) a Vyšné Wahlenbergovo pleso (2 175 m).

Cieľom štúdie týchto jazier bolo zistiť rozdiely v štruktúre bentických spoločenstiev pozdĺž výškového gradientu a identifikovať druhy, resp. zoskupenia druhov, ktoré by najlepšie indikovali klimatické zmeny a na ktorých by bolo možné postaviť budúci monitoring tatranských jazier. Súčasne sa vyhodnotili teplotné charakteristiky všetkých plies a množstvo nerozpustenej organickej hmoty uložené v litoráli, ktorá je jedným z potravných zdrojov pre bentickú faunu. Výsledky tohto výnimočného výskumu určite napomohli vytvoriť lepšie čitateľný scenár budúcich možných zmien v jazerných systémoch Tatier (Hammerlík, Bitušík, 2009; Čiamporová-Zaťovičová et al., 2010).



Obr. 3. Pohľad na Popradské pleso zo Zlomiskovej doliny (2013). Foto: Peter Bitušík

Fyzikálne a chemické procesy, s ktorými súvisí život horských jazier, sú priamo alebo nepriamo kontrolované celým radom klimatických faktorov. Dĺžka obdobia, kedy je jazero pokryté ľadom a snehom, zohráva kľúčovú úlohu: ovplyvňuje rozsah spotreby kyslíka, rozptyl živín zo sedimentov, časovanie miešania (cirkulácie) vody počas obdobia bez ľadu a má tak dopad na biologické procesy v jazere. Toto obdobie sa tiež označuje ako bioklimatický výškový gradient vzhľadom na jeho zmeny pozdĺž nadmorskej výšky. Paneurópska štúdia na súbore 235 arktických a alpínskych jazier, vrátane skupiny tatranských (Catalan et al., 2009), odhalila, že 190 dní trvajúce obdobie zamrznutia jazera predstavuje jeden zo štyroch kľúčových ekologických prahov pre biotu jazier a v Tatrách je v súčasnosti charakteristická pre jazerá subalpínskeho stupňa. Za predpokladu kontinuálneho zvyšovania globálnej teploty (Lapin a kol., 1995) dosiahne táto hranica v krátkom čase mnohé jazerá vo výške približne 2 000 m n. m. so závažným dopadom na ich fyzikálno-chemické a biologické procesy. Táto schéma je však príliš zjednodušená, aby mohla byť všeobecne aplikovateľná na všetky jazerá Tatier. V skutočnosti sa typ a intenzita reakcie jednotlivých jazier na klimatické zmeny môžu zásadne líšiť v závislosti od geografickej polohy, morfológických charakteristík povodia, plochy a hĺbky jazera, prítomnosti prítokov a odtokov. Všetky tieto zložky majú silný vplyv na termické cykly jazier.

Medzinárodný tím nadviazal na prelome tisícročí na pomerne krátku históriu merania povrchovej teploty vody tatranských jazier (Bitušík et al., 2006). Na rozdiel od ich predchodcov boli však ich výsledky založené nie na bodových meraniach ortuťovým teplomerom, ale na kontinuálnom meraní s použitím termistorov inštalovaných na polystyrénových plaváčkach na hladine jazier. Získané údaje umožnili vôbec po prvýkrát vytvoriť schému sezónnych procesov topenia a tvorenia ľadu, ohrievania

a ochladzovania povrchovej vrstvy vody v jazerách situovaných v rôznych nadmorských výškach. Ukázalo sa však, že teplotné charakteristiky niektorých tatranských jazier sa odlišujú od schémy lineárnych zmien pozdĺž výškového gradientu, čo dávalo tušiť, že v takýchto jazerách by sa mohol redukovať klimatický signál a spomaliť efekty klimatickej zmeny. Tieto jazerá by sa tak stali poslednými refúgiami reliktných spoločenstiev v období pokračujúceho globálneho otepľovania.

V rokoch 2010 – 2011 sa na území Vysokých a Západných Tatier realizoval projekt orientovaný na identifikáciu jazier

s anomálnymi teplotnými charakteristikami. Výber súboru jazier pre štúdium sa uskutočnil na základe modelu ich osvetlenia vytvoreného metódami GIS. K jazerám s najnižšími hodnotami sledovaných parametrov boli vybrané ich „dvojčky“ z opačnej strany gradientu, pričom sa dbalo na to, aby sa s nimi čo najviac zhodovali svojou morfológiou a nadmorskou výškou a žiadne nevykazovalo znaky doznievajúcej acidifikácie. Takýmto kritériám zodpovedalo deväť dvojíc jazier. Tento výskum po prvýkrát exaktne hodnotil a potvrdil význam zatienenia vysokohorských jazier pri modifikácii priebehu teplôt, času zamrznutia a dĺžky trvania ľadovej pokrývky (Novikmec et al., 2013). Dosiahnuté výsledky majú potenciál využitia na lepšie pochopenie zmien fyzikálnych vlastností horských jazier súvisiacich s predpokladaným otepľovaním klímy, lepšiu interpretáciu výsledkov paleolimnologických štúdií zameraných na rekonštrukciu historického vývoja klímy a, v neposlednom rade, pre lepšie pochopenie faktorov pôsobiacich na zloženie a rozšírenie spoločenstiev. Potvrdil sa aj predpoklad, že rozdiely v teplotných charakteristikách spôsobených zatienením budú mať aj významné biologické dôsledky, výsledky tejto parciálnej štúdie však ešte zatiaľ neboli publikované.

V ostatnom desaťročí bol dosiahnutý výrazný pokrok v mnohých oblastiach týkajúcich sa modelovania a predikcie vývoja klímy v budúcnosti. Pre posudzovanie súčasných a budúcich klimatických zmien je mimoriadne dôležité poznať dávne zmeny podnebia, ktoré poskytujú informácie o základných mechanizmoch jeho prirodzenej variability a umožňujú lepšie pochopiť význam a príčiny trendov súčasného otepľovania. Pretože historické a súčasné klimatické záznamy sú príliš krátke, je potrebné využívať iné prostriedky, aby bolo možné rekonštruovať klímu Zeme v minulosti. Sedimenty jazier v subalpínskej a alpínskej zóne sú schopné zaznamenať

teplotné signály aj takého rozsahu, ktoré sú príliš slabé na to, aby ovplyvnili terestrické i vodné ekosystémy v nižších polohách, a sú preto cennými archívmi pre paleoekologické, resp. paleolimnologické štúdie.

Bitušík et al. (2009) analyzovali cca 30 cm dlhé vrstvy sedimentov z už spomínaných troch gradientových jazier s cieľom zistiť, do akej miery je schopný stratigrafický záznam v sedimentoch zachytiť historické zmeny prostredia v oblasti Tatier. Najstaršie analyzované vrstvy sedimentov pochádzali pravdepodobne z 11. resp. 14 storočia. Hodnotil sa obsah organickej hmoty v sedimentoch ako zástupný (proxy) parameter pre odhad zmien teploty a produktivity jazera a zloženie dvoch indikátorových skupín: subfosílnych rozsievok a zvyškov lariev pakomárov, ktoré sa veľmi často používajú na rekonštruovanie zmien klímy a iných environmentálnych podmienok.

Ukázalo sa, že zmeny v zástupných dátach identifikovali významné klimatické oscilácie (vrátane tzv. malej doby ľadovej a jej najchladnejšieho výkyvu) v ostatných storočiach a veľmi dobre korešpondovali s výsledkami získanými analýzou sedimentov z dvoch plies na poľskej strane Tatier (*Niżni Staw Toporowy a Zielony Staw Gąsienicowy*).

Podobné paleolimnologické štúdie, ktoré rekonštruujú klímu v minulosti, sú v oblasti strednej Európy stále pomerne zriedkavé a územie Západných Karpát je výrazne podhodnotené. V roku 2012 však začal tím odborníkov z troch slovenských univerzít a dvoch pracovísk Slovenskej akadémie vied riešiť projekt, ktorý využíva analýzu viacerých abiotických a biotických zástupných dát, tzv. proxy dát (obsah organickej hmoty, obsah uhlíka, chemické zloženie, magnetické vlastnosti sedimentov a stabilné izotopy, peľové zrná, subfosílné zvyšky rastlín a živočíchov) na vypracovanie spoľahlivo datovanej a vysokorozlišovacej rekonštrukcie prostredia na základe analýz sedimentov z Popradského plesa (obr. 3). Tento typ paleolimnologických štúdií je v Západných Karpatoch unikátny tak s ohľadom na množstvo použitých zástupných dát, ako aj na dĺžku sledovaného obdobia (neskorý glaciál – holocén). Výsledky budú dôležité na vytvorenie podrobnej rekonštrukcie environmentálnych zmien nielen z regionálneho hľadiska, ale mali by aj vyplniť medzeru medzi kvalitnými paleoenvironmentálnymi a paleolimnologickými štúdiami v európskom priestore.

\* \* \*

V priebehu niekoľkých desaťročí sledovania a výskumov sa pomyselná databáza vedomostí o organizmoch osídľujúcich tatranské vody výrazne rozrástla. Obsahuje údaje o druhoch prvýkrát popísaných práve z územia Tatier, o druhoch reliktných a endemických, o štruktúre a rozšírení spoločenstiev vodných organizmov v závislosti od faktorov prostredia, o vplyve acidifikácie a možných dopadoch klimatickej zmeny, ale aj poznatky, ktoré odhaľujú skutočnosti o historickom vývoji jazier a ich povodí.

*Súčasný limnologický výskum tatranských jazier je podporovaný projektmi VEGA 0/0180/12, 2/0081/13 a projektom APVV-0059-11.*

## Literatúra

- Bitušík, P., Kopáček, J., Stuchlík, E., Šporka, F.: Limnology of Lakes in the Tatra Mountains. *Biologia*, Bratislava, 2006, 61, 18, p. 1 – 221.
- Bitušík, P., Kubovčík, V., Štefková, E., Appleby, P. G., Svitok, M.: Subfossil Diatoms and Chironomids along an Altitudinal Gradient in the High Tatra Mountain Lakes: A Multi-Proxy Record of past Environmental Trends. *Hydrobiologia*, 2009, 631, 1, p. 65 – 85.
- Catalan, J., Barbieri, M. G., Bartumeus, F., Bitušík, P., Botev, I., Brancelj, A., Cogalniceanu, D., Manca, M., Marchetto, A., Ognjanova-Rumenova, N., Pla, S., Rieradevall, M., Sorvari, S., Stefková, E., Stuchlík, E., Ventura, M.: Ecological Thresholds in European Alpine Lakes. *Freshwater Biology*, 2009, 54, p. 2494 – 2517.
- Čiamporová-Zafovičová, Z., Hamerlík, L., Šporka, F., Bitušík, P.: Littoral Benthic Macroinvertebrates of Alpine Lakes (Tatra Mts) along an Altitudinal Gradient: A Basis for Climate Change Assessment. *Hydrobiologia*, 2010, 648, p. 19 – 34.
- Hamerlík, L., Bitušík, P.: The Distribution of Littoral Chironomids along an Altitudinal Gradient in High Tatra Mountain Lakes: Could they be Used as Indicators of Climate Change? *Annales de Limnologie – International Journal of Limnology*, 2009, 45, p. 145 – 156.
- Juriš, Š., Ertl, M., Ertlová, E., Vranovský, M.: Niektoré poznatky z hydrobiologického výskumu Popradského plesa. *Zborník prác o Tatranskom národnom parku*, 1965, 8, s. 33 – 44.
- Kopáček, J., Veselý, J., Stuchlík, E.: Sulphur and Nitrogen Fluxes and Budgets in the Bohemian Forest and Tatra Mountains during the Industrial Revolution (1850 – 2000). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001, 5, p. 391 – 405.
- Kopáček, J., Stuchlík, E., Veselý, J., Schaumburg, J., Anderson, I. C., Fott, J., Hejzlar, J., Vrba, J.: Hysteresis in Reversal of Central European Mountain Lakes from Atmospheric Acidification. *Water, Air and Soil Pollution, Focus*, 2002, 2, p. 91 – 114.
- Krno, I.: Macrozoobenthos of the Tatra Lakes Littoral (the High Tatras) and its Affection by Acidification. *Biológia (Bratislava)*, 1991, 46, p. 495 – 506.
- Lapin, M., Nieplová, E., Faško, P.: Regionálne scenáre zmien teploty vzduchu a zrážok na Slovensku. *Zborník NKP SR*, 1995, 3, 97 s.
- Novikmec, M., Svitok, M., Kočícký, D., Šporka, F., Bitušík, P.: Surface Water Temperature and Ice Cover of Tatra Mountain Lakes Depend on Altitude, Direct Insolation and Bathymetry. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2013, 45, p. 77 – 87.
- Stuchlík, E., Stuchlíková, Z., Fott, J., Růžička, L., Vrba, J.: Vliv kyselých srážek na vody na území Tatranského národného parku. *Zborník prác o Tatranskom národnom parku*, 1985, 26, s. 173 – 211.
- Šporka, F., Štefková, E., Bitušík, P., Thompson, A. R., Agustí-Panareda, A., Appleby, P. G., Grytnes, J. A., Kamenik, C., Krno, I., Lami, A., Rose, N., Shilland, N. E.: The Paleolimnological Analysis of Sediments from High Mountain Lake Nižné Terianske pleso in the High Tatras (Slovakia). *Journal of Paleolimnology*, 2002, 28, p. 95 – 109.
- Tomajka, J.: K problému acidifikácie jazier vo Vysokých Tatrách. *Štúdie o Tatranskom národnom parku*, 1996, 1, s. 33 – 54.
- Vranovský, M., Krno, I., Šporka, F., Tomajka, J.: The Effect of Anthropogenic Acidification on the Hydrofauna of the Lakes of the West Tatra Mountains (Slovakia). *Hydrobiologia*, 1994, 274, p. 163 – 170.

**Prof. RNDr. Peter Bitušík, CSc., [peter.bitusik@umb.sk](mailto:peter.bitusik@umb.sk)**  
**Katedra biológie a ekológie Fakulty prírodných vied**  
**Univerzity Mateja Bela v Banskej Bystrici, Tajovského**  
**40, 974 01 Banská Bystrica**