

Voda je divná (a díky za to)

Vtipákové občas říkají, že naší planetě Zemi by se mělo říkat Voda, už jen proto, že oceány zaujímají přes 70 % zemského povrchu. Ale důvodů je víc. Bez kapalně vody by to zkrátka nešlo, neexistoval by život v té podobě, jak ho známe, a bez vodní páry v atmosféře, hlavního hráče skleníkového efektu, by se Země stala planetárním „mrazákem“. Voda jako sloučenina má přitom celou řadu podivných vlastností. Některé z nich, jež zásadně ovlivňují fungování sladkovodních ekosystémů, si zde představíme.

Učíme se o ní od dětství, často i ne úplně správně. Třeba běžná chemicky čistá voda není, jak se praví v učebnicích, kapalina bez barvy, ale je lehce namodralá, za čímž stojí vyšší absorpce fotonů v teplejší, červené části světelného spektra. Ale např. těžká voda D_2O (s těžším izotopem vodíku deuteriem) vyšší absorpci červené části světla postrádá a bezbarvost vody splňuje na jedničku.

Namodralá barva však není tou zásadní vlastností vody, o níž by se opíralo fungování světa. Svět spoléhá na jiné z řady vlastností, resp. divností, na které odkazuje titul článku. Mezi ty hlavní patří vysoké teploty bodu tuhnutí/tání a bodu varu, díky nimž máme na Zemi vodu ve všech skupenstvích, a nejen jako vodní páru. Divné je to proto, že hydridy prvků z okolí kyslíku (ve smyslu sousedství v periodické tabulce prvků, jako sulfan H_2S nebo amoniak NH_3), které by měly mít obdobné fyzikální a chemické vlastnosti, mají bod tání a bod varu o mnoho desítek stupňů níže a na Zemi se v běžných podmínkách vyskytují jen jako plyny. Většina neobvyklých vlastností vody se připisuje tendenci jejích molekul propojovat se navzájem pomocí vodíkových můstků.

Hustotní anomálie

Divnou vlastností vody, zásadní pro fungování sladkovodních ekosystémů v mírném pásu, je hustotní anomálie. Nejde o nic

jiného než o skutečnost, že sladká voda dosahuje nejvyšší specifické hmotnosti nikoli těsně před změnou do pevného skupenství, tedy při $0\text{ }^\circ\text{C}$, ale při $4\text{ }^\circ\text{C}$ (pro chemicky čistou vodu je to při tlaku jedné atmosféry přesně $3,984\text{ }^\circ\text{C}$). O anomálii jde proto, že jiné běžné tekutiny s klesající teplotou plynule zvyšují svou hustotu („těžknou“) až do změny na pevné skupenství, které navíc mívá vyšší hustotu než tekutá fáze. Ne tak u vody, u níž je led lehčí než kapalná voda asi o 8,5 % a na její hladině plave.

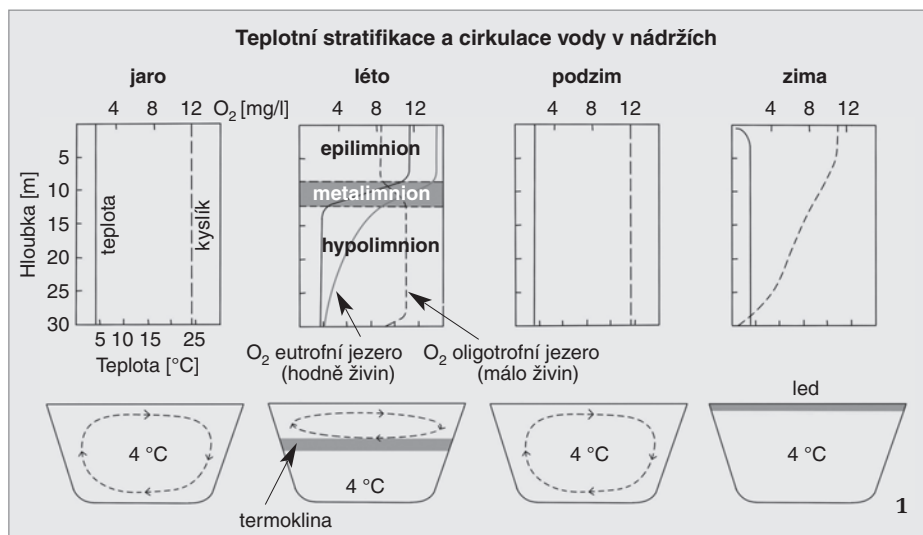
Ale vraťme se k hustotní anomálii vody v tekutém stavu. Proč má nejvyšší hustotu při $4\text{ }^\circ\text{C}$? Respektive proč ji nemá těsně před změnou skupenství jako všechny ostatní hydridy? Dosavadní vysvětlení se opírala o již zmíněné vodíkové můstky, ale ty má i amoniak (hydrid dusíku), který se chová „spořádaně“ a hustotu mění monotónně. Hustotní anomálie vody by mohla být výsledkem jiné, teprve zcela nedávno poznávané vlastnosti, totiž její „dvojtekté“ podoby. Řada prací zabývajících se teplotními vlastnostmi a strukturou vody naznačuje, že při nízkých teplotách je kapalná voda vlastně směsí dvou tekutin sice stejného chemického složení (pořád zůstává známou H_2O), ale různých fyzikálně-chemických vlastností závislých na vzájemné poloze a interakcích jednotlivých molekul.

Proč je existence hustotní anomálie pro vodní svět tak důležitá? Představme si, co by se stalo, kdyby se voda chovala „normálně“ jako jiné kapaliny. V takovém fiktivním světě by se teplota povrchové (a nakonec i hlubinné) vody stejně jako v našem známém světě odvíjela největší měrou od teploty atmosféry. Nás budou zajímat oblasti daleko od rovníku, kde se teploty vzduchu dostávají pod bod mrazu. Od vzduchu se ochlazuje voda u hladiny, v důsledku toho dochází ke zvýšení její hustoty a ochlazená těžší voda klesá ke dnu. To se opakuje, voda postupně chladne, teplota celého vodního sloupce se blíží nule a nakonec od hladiny až ke dnu zamrzá (nezávisle na tom, jestli by ve fiktivním světě „normální vody“ měl led hustotu vyšší, nebo nižší než voda kapalná). Nastal by konec kontinuity sladkovodních ekosystémů. Kdybychom tento scénář domýšleli do důsledků, tak by většina trochu hlubších jezer mírného a polárního pásu byla u dna věčně zmrzlá a ryby nebo jiní živočiškové žijící déle než jednu sezonu by v nich vůbec nebyli nebo by se museli adaptovat na každoroční zamrzání do ledu. Opustíme ale fiktivní svět s „normálně“ se chovající vodou a vraťme se do našeho, anomálního.

Míchání a teplotní stratifikace jezer

Hustotní anomálie, při níž je sladká voda těsně před zmrznutím lehčí než voda čtyřstupňová, vede v mírném pásu ke specifickému sezonnímu chování hlubších stojatých vod (jezer nebo jejich obdob vytvořených člověkem – přehradních nádrží, zatopených lomů apod.). Střídají se zde období míchání celého vodního sloupce s obdobími tzv. teplotní stratifikace, kdy je jezero rozděleno na vrstvy o různých teplotách. Toto střídání má zásadní dopad na fungování ekosystémů hlubších stojatých vod. Už víme, že v zimě díky hustotní anomálii nepromrzne až ke dnu, ale co se vlastně v takovém hlubším jezeře v mírném pásu děje během roku?

Začneme na jaře, kdy roztál led, voda se u hladiny postupně ohřívá, až se dostane na teplotu oněch $4\text{ }^\circ\text{C}$. V tomto okamžiku má tedy celý vodní sloupec od hladiny až ke dnu v podstatě stejnou teplotu i hustotu. A i když jezera řadíme do kategorie stojatých vod, neznamená to, že se v nich voda nehýbe. Jakmile začne nad hladinou foukat alespoň trochu vítr, voda začne proudit a vodní sloupec se bude míchat. Větrné počasí je (nejen) v našich krajích víceméně



1 Sezonní průběh míchání a stratifikace dimiktických (dvakrát se míchajících) nádrží mírného pásu. Jaro – míchá se celý vodní sloupec. Léto – teplotní stratifikace vede k vytvoření míchaného epilimnia a nemíchaného hypolimnia, toto rozdělení ovlivňuje řadu dalších chemických a fyzikálních parametrů včetně koncentrace kyslíku. Podzim – míchání celého vodního sloupce. Zima – stagnace, pod ledem se vodní sloupec nemíchá a může docházet k výraznému úbytku kyslíku. Plná linie – teplota, čárkovaná nebo šedá linie – koncentrace kyslíku, šedě – termoklina/metalimnion. Blíže v textu. Upraveno podle různých zdrojů, kreslila R. Bošková

pravidlem a obvykle dokáže zajistit, že se vodní sloupec promíchává od hladiny až ke dnu. Intenzita míchání závisí především na síle větru, ale také na ploše hladiny, o kterou se vítr opírá, a na okolním terénu (může vítr usměrnit, nebo naopak může vodní plochu před ním chránit). Ve velkých jezerech je běžný silný vítr schopný vyvolat promíchání vodního sloupce až do hloubky 200 m. Těto epizodě se říká jarní cirkulace.

Jak jaro pokračuje, vzduch se ohřívá a spolu s ním i voda. Koncem jara může nastat situace, kdy vítr na několik dnů výrazně zeslábně nebo úplně ustane a intenzivní míchání vodního sloupce se zastaví. Horní vrstvy vody se však nadále ohřívají, a jelikož nehybná voda vede teplo velmi špatně, ohřátá voda s nižší hustotou zůstává při hladině, zatímco teplota vody jen několik decimetrů či metrů hlouběji je stále nízká. Když bezvětří vydrží, vrstva hladinově teplé vody bude dostatečně mocná a v této situaci zase začne foukat vítr, nastane zásadní změna – prohrátá horní vrstva s nižší hustotou se „utrhne“ od chladnější vody a začne se míchat nezávisle na zbytku vodního sloupce. V tuto chvíli, koncem jara nebo začátkem léta, lze tedy v jezeře rozlišit vrstvy vody s různou teplotou (ale i dalšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi), vzniká letní teplotní stratifikace. V teplém období roku se tak vodní masa v jezeře mírného pásu rozdělí na dvě „nezávislé“ části. Horní, míchané vrstvě, která bývá běžně 3–5 m hluboká, říkáme epilimnion, zatímco spodní, v tuto chvíli nemíchanou vrstvu chladné vody nazýváme hypolimnion. Mezi oběma vrstvami je relativně ostrý přechod (metalimnion, česky někdy skočná vrstva) se strmou změnou teploty a hustoty – termoklinou. Tato přechodová vrstva, v níž teplota s každým metrem hloubky klesá o jeden nebo i několik stupňů Celsia, má mocnost v řádu několika metrů. Pokud si ale vzpomenete na to, jak vám je při letním koupání v rybníku za bezvětří dole zima na nohy, jde sice také o teplotní stratifikaci, ta je ale dočasná, na škále několika málo stupňů, a při nejbližším větru se zruší. Hloubka epilimnia během léta obvykle lehce narůstá (o jednotky metrů), protože část tepla se přeče jen do metalimnia přenáší a při silném větru se z něj postupně ohřívá voda do epilimnia přimíchává.

Stav letní teplotní stratifikace, kdy se míchá jen svrchní vrstva vody, trvá celé léto, přičemž čtenáři je už jasné, co se děje na podzim: totéž co na jaře. Při říjnovém/ listopadovém ochlazení epilimnia na teploty blízké teplotám hypolimnia se opět vyrovná hustota vody obou vrstev a ty tím zaniknou, při větru se začne míchat znovu celý vodní sloupec a nastane období podzimní cirkulace. Tím ale sezonní cyklus jezerního ekosystému nekončí. Když v zimě uhoří mrazy, vodní plochy, které se až dosud větrem míchaly, na povrchu zamrznou. Led dalším mícháním větrem brání a vodní sloupec se zase teplotně rozdělí, tentokrát mluvíme o zimní stratifikaci. Teplotní rozdíl mezi různými vrstvami sloupce sice nejsou tak výrazné jako během léta (voda těsně pod ledem má teplotu blízko nule, voda u dna okolo 4 °C), ale stejně jako v létě je podstatná absence míchání.

A co na to jezerní ekosystém?

Střídání období cirkulace a stratifikace má zásadní dopady na fungování jezerního ekosystému. V první řadě jarní a podzimní míchání znamená prokysličený celý vodní sloupec. Jelikož se míchá chladná voda, v níž se plyny rozpouštějí lépe než ve vodě teplejší, jezerní ekosystém vstupuje do období letní či zimní stratifikace se slušnou zásobou kyslíku (obr. 1). Kyslík se během stagnace („nemíchání“) postupně spotřebovává v důsledku respirace vodních organismů (hlavně při bakteriálním rozkladu organické hmoty), a zvláště v eutrofních vodách s vysokou koncentrací živin (fosforu a dusíku) může u dna dojít k výraznému poklesu koncentrace kyslíku (hypoxii) nebo i k jeho úplnému vyčerpání (anoxii, blíže v tomto čísle na str. 75–77). Čím je jezero hlubší, tím má nemíchaná vrstva vody v něm větší mocnost a zásoba kyslíku v hypolimnionu je od počátku větší, což pravděpodobnost vzniku anoxie snižuje.

Druhým efektem jarního a podzimního míchání je obohacení celého vodního sloupce o živiny, které se uvolňují při bakteriálním rozkladu organického materiálu sedimentujícího na dno, tedy mrtvých buněk řas, zooplanktonu a jejich svlečků, v neposlední řadě i výkalů obyvatel vodního sloupce (zooplanktonu a ryb). Mezi nejdůležitější prvky dostávající se zpět do vodního sloupce patří zejména fosfor (ve formě fosforečnanových iontů), který bývá ve sladkých vodách klíčovou limitující živinou.

Dynamika fosforu ve stojatých vodách souvisí nejen s mícháním vodního sloupce, ale je navíc ovlivněna dostupností kyslíku u dna. Pokud má voda dostatečnou zásobu kyslíku, povrch sedimentu je prokysličený a v něm se typicky nachází fosfor ve formě fosforečnanu železitého, který není ve vodě rozpustný. Okysličená vrstvička sedimentu tedy tvoří bariéru pro uvolnění fosfátu ze dna – výsledný efekt, kdy se živiny do dna ukládají, označujeme jako fosfátovou past. Pokud se ale u dna vyčerpá kyslík (což je v eutrofních vodách spíše pravidlem než výjimkou), trojmocné železo redukuje na dvojmocné, fosfáty jsou ve formě fosforečnanu železnatého rozpustné ve vodě a ze sedimentu se uvolňují do vody, čímž navyšují koncentrace fosforu v už beztak živinami zatížených nádržích – a dále posilují jejich eutrofizaci.

Významný biologický efekt má i letní rozdělání vody na svrchní promíchávaný epilimnion a spodní nemíchaný hypolimnion. To, že voda cirkuluje jen poblíž hladiny, přináší zásadní výhodu pro fotosyntetizující obyvatele vodního sloupce – řasy a sinice (fytoplankton). Pokud se v epilimnionu udrží, zůstávají blízko světla, které ke svému životu nutně potřebují. Intenzita pronikajícího záření se samozřejmě mění i v rámci epilimnia, ale pro fytoplanktonní společenstvo je rozdíl, cirkuluje-li pod hladinou do hloubky jen 3–4 m, kdy je za dne na světle nebo v šeru, než kdyby cirkulovalo v rozsahu celého vodního sloupce, jak se to děje na jaře či na podzim, kde bude převážně ve tmě. Pro buňky řas a sinic je přitom rozhodující, po jakou dobu kde budou, protože jejich fotosyntéza, běžící jen v takto omezených intervalech, musí pokrýt náklady nejen na udržovací meta-

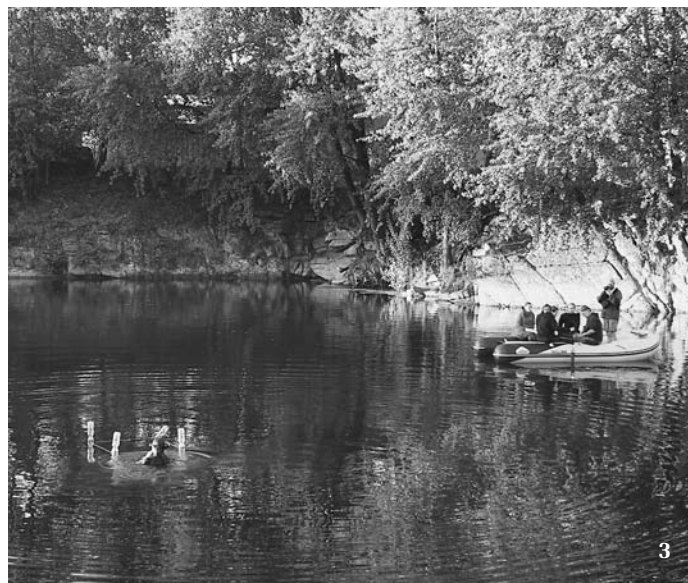
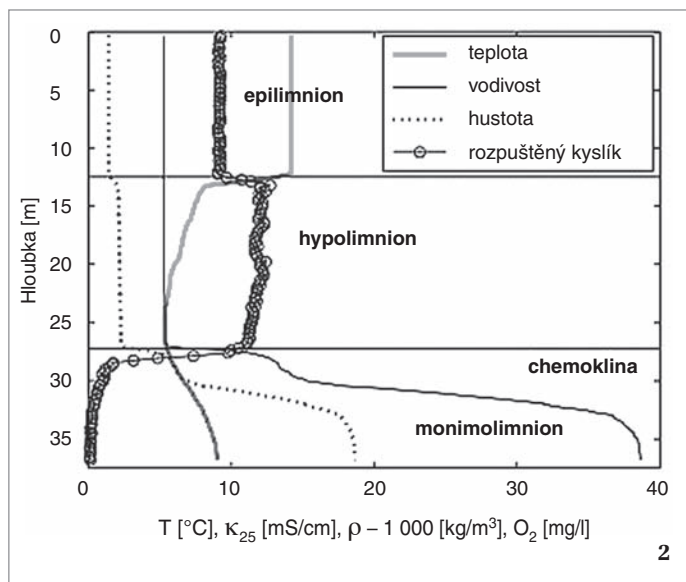
bolismus buněk, ale získat i dostatek energie na jejich růst a dělení.

Z pohledu fytoplanktonu je zásadní i rychlost, s jakou míchání probíhá. Setravává řasy při cirkulaci celého objemu jezera ve tmě hlubin týdny, dny, nebo hodiny? A pokud cirkulují pouze v rámci mělkého epilimnia, jak často se ocitnou u hladiny? Jednou, nebo vícekrát denně? Rychlost cirkulačního proudění je samozřejmě závislá na rychlosti větru a velmi komplikovaně se stanovuje a měří, odhady ale naznačují až překvapivě rychlý obrát. Pro jezero hluboké kolem 40 m se při rychlostech větru nad 5 m/s odhaduje rychlost „otočení“ celého vodního sloupce, a tedy jeden světelný cyklus pro řasovou buňku, v řádu pouhých několika desítek minut. Pokud se míchá jen několikametrový epilimnion, fytoplankton cirkuluje v jeho tloušťce pouze v řádu několika málo minut. Což nám zároveň dává odpověď na otázku, jak se fytoplankton může rozvíjet i během jarního míchání celého vodního sloupce, a také je zřejmé, že při letní stratifikaci, při cirkulaci mělkým epilimniem, nemusí světelně příliš strádat ani při vysokých hustotách, kdy je průhlednost vody na pohled blízka hrachové polévce.

Ne všechna jezera se míchají stejně

Vratme se ale k sezonnímu průběhu míchání a stagnaci. Naše modelové jezero, typické pro mírný pás, se míchá dvakrát ročně (jaro/podzim) a dvakrát ročně je stratifikované (léto/zima). Takovým jezerům říkáme dimiktická, doslova dvakrát se míchající. Kdybychom ale vyrazili do oblastí mírného pásu, kde nejsou zimy příliš tuhé a jezera nezamrzají, nevzniká zimní stratifikace pod ledem a podzimní a jarní míchání splývají do jedné dlouhé epizody. Takovým jezerům říkáme teplá monomiktická (jednou se míchají). Typická jsou pro teplejší oblasti na jih od nás (v Evropě třeba nízká položená jezera na Balkáně nebo Apeninském poloostrově), ale nezamrzají monomiktická jezera se běžně vyskytují i severněji, např. v Anglii, kde panují příslušně deštivé zimy, způsobené oceánským klimatem. A třeba Slapská přehradní nádrž na Vltavě, která zamrzá jen v opravdu chladných zimách, se v posledních letech obvykle také chová jako monomiktické jezero.

Opačným případem jsou studená monomiktická jezera, u nichž je vynechána letní stratifikace. Ta bychom našli na velmi chladných místech, kde nastane krátké léto a brzy poté, co led na jezeře rozmrzne, už zase začíná mrznout. V krátkém období volné hladiny se voda v jezeře sotva stačí ohřát na 4 °C, ale letní stratifikace se nerozvine. Typicky se studená monomiktická jezera nacházejí v polárních oblastech zhruba mezi 70° a 75° zeměpisné šířky a čím více se posouváme do nižších zeměpisných šířek, tím je musíme hledat ve vyšších polohách – ve střední Evropě až v nejvyšších velehorách. Možná trochu neintuitivně ve většině nížin Arktidy přes typické chladné klima letní stratifikace v jezerech vzniknout stihne – důvodem je velký přísun slunečního záření v létě, kdy slunce zapadá jen na krátko (pokud vůbec). V nejchladnějších oblastech na Zemi jsou jezera trvale zamrzlá – ta se nemíchají



2 a 3 Typický profil chemických a fyzikálních parametrů meromiktické nádrže (obr. 2). Blíže v textu. Upraveno podle: B. Boehrer, M. Schultze (2005)
 U nás meromixii často najdeme v zatopených lomech, které jsou díky tomu zajímavým objektem pro terénní cvičení studentů (3). Odběr vzorků z Řečického lomu na okraji Blatné. Foto A. Petrussek

vůbec a nazýváme je amiktická, většinu jich najdeme v Antarktidě.

Od teplých monomiktických jezer mírného pásu dále směrem k rovníku to máme už jen kousek do subtropů a tropů. Voda v jezerech se tam nemá kdy ochladit a výrazné teplotní gradienty platné pro mírný pás nenajdeme – zejména čtyřstupňovou vodu u dna bychom hledali marně (i jihoamerické jezero Titicaca ve výšce 3 812 m n. m. má hypolimnion o teplotě 11 °C). V hlubších níže položených tropických jezerech je voda obecně teplá až ke dnu, ale i u nich se vytváří jistý gradient s teplejší míchanou vrstvou u hladiny, a tudíž relativně stabilní teplotní stratifikací. Vítr ji naruší jen občas, u většiny tropických jezer se to ale obvykle v určité části roku stává.

Relativně mělká a větru hodně otevřená jezera, ať už v mírném pásu, nebo v tropech, si ale stratifikaci zpravidla dlouhodobě neudrží – při silnějším větru se celý vodní sloupec promíchá. Takovým jezerům, která se míchají často a nepravidelně a nemají stálejší teplotní stratifikaci, říkáme polymiktická. Vyskytují se v subtropích, tropech i v mírném pásu. Do této kategorie patří nejrůznější mělká evropská jezera (např. maďarský Balaton), ale i naše rybníky.

Tím by se zdál výčet typů míchání jezer kompletní, ale vše se tu točí kolem větru a víme, že vítr je schopen míchat jezera do hloubky řádově „jen“ 200 m. Slovo jen dáváme do uvozovek, i to je ohromující hloubka, avšak existuje hodně hlubších jezer, některá i mnohonásobně. V extrémně hlubokých jezerech vítr nedokáže promíchat celý vodní sloupec a pod určitou hloubkou vznikne stabilní, nikdy nemíchaná vrstva vody. Těmto jezerům říkáme meromiktická, na rozdíl od holomiktických, kompletně míchaných až ke dnu.

Meromixie nemusí mít příčinu jen v extrémní hloubce, stačí, když je vodní hladina

na dobře ukrytá před větrem (příkladem u nás jsou zatopené lomy s úrovní hladiny pod terénem, kde vítr míchá třeba jen horních 10–15 m; obr. 3). Jinou příčinou meromixie může být hustotní rozdíl vrstev vody způsobený nikoli rozdílem teplot, ale vyšším obsahem rozpuštěných minerálních látek – např. kvůli minerálním pramenům ústícím do nádrže nebo vrstvě slané vody u dna mnohých přímořských jezer. Ať už je příčinou meromixie cokoli, jejím důsledkem je nehybná masa vody v nejnižší části vodního sloupce. Obrazně řečeno, tato „netečná“, nikdy se nemíchající vrstva vody – monimolimnion – tvoří jakési první dno jinak normálně fungujícího jezerního ekosystému nad ním (obr. 2).

Monimolimnion (v trvale meromiktických jezerech má chemické vlastnosti zcela odlišné od míchané části vodního sloupce nad ním, nazývané mixolimnion. Komunikace s mixolimniem je ve své podstatě výrazně asymetrická. Do monimolimnia padá veškerý organický materiál vytvořený pelagickým jezerním společenstvem nebo přinesený přítoky, ale kvůli absenci míchání se z něj mnoho do vrchních vrstev nevrací (pomineme-li uvolněné bubliny plynů ze dna, jde to pouze difuzí). Hranice mezi míchaným vodním sloupcem a monimolimniem se vyznačuje dramatickou změnou chemických vlastností vody, proto se jí říká chemoklina. Není výjimečné, že kromě výrazných chemických změn je voda v monimolimniu i o něco teplejší než voda nad ním. Tento zdánlivý paradox má jednoduché vysvětlení. Nižší hustota teplejší vody (jež může prosakovat do monimolimnia třeba z podzemních pramenů) je tu kompenzována vyšším podílem rozpuštěných látek, které hustotu roztoku naopak zvyšují.

Velmi typickou a zcela zásadní charakteristikou trvale nemíchané vrstvy je absence kyslíku – v monimolimniu panuje téměř vždy anoxie. Samozřejmě má kyslík tendenci ze svrchních vrstev do monimolimnia difundovat, ale tento proces je oproti jeho bakteriální spotřebě tak pomalý, že ztrátu kyslíku nedokáže vyrovnat. Ovšem i bez kyslíku se dá žít, takže kromě anaerobních bakteriálních rozkladačů můžeme v anoxické vrstvě či na jejím rozhraní najít i bakteriální autotrofy, ať už takové, co získávají energii oxidací různých redukova-

ných látek (typicky sulfanu, ale nejen jeho), nebo – pokud na horní okraj monimolimnia dosáhne světlo – třeba anoxygenní fototrofní, tzv. zelené či purpurové sírné bakterie, které ve fotosyntéze využívají sirovodík místo vody (a uvolňují tak do okolí místo kyslíku molekulární síru). Dalo by se říci, že monimolimnion je poměrně pestrá bakteriologická zahrada.

Extrémně hluboká jezera by tedy měla být meromiktická, s anoxickou vrstvou počínající v desítkách metrů či oněch hraničních 200 m hloubky. To platí mimo jiné pro hluboká africká jezera, klasickým příkladem může být druhé nejhlubší jezero světa, 1 470 m hluboká Tanganika. Ale co nejhlubší jezero světa Bajkal se svými rekordními 1 642 m hloubky? Kyslíku je v něm překvapivě dost až ke dnu. Jak je to možné? Vítr za to může jen částečně. Bajkal je totiž příkladem studených jezer mírného pásu, kde dochází k termobarickému míchání (přesněji termobarické nestabilitě) vody. Principem je, že hustota vody se mění nejen s teplotou, ale i s tlakem vodního sloupce. Teplota, při které má voda maximální hustotu, se rostoucím tlakem posouvá asi o $-0,1$ °C na každých 100 m vodního sloupce. To znamená, že voda v hloubce třeba 200 m má nejvyšší hustotu ne při 4 °C, ale při 3,8 °C. V hlubokých jezerech, jejichž teplota se v určité části roku může přiblížit těmto hraničním hodnotám (logicky to mohou být pouze jezera v dostatečně chladných oblastech), tak může dojít k situaci, kdy je „balík“ chladnější povrchové, prokysličené vody „pošťouchnut“ větrem a zanoří se, třeba při břehu, hlouběji do jezera, kde se ale vlivem zvyšujícího se tlaku zvýší hustota této vody a ta pak dále klesá, přičemž naopak vytlačí jiný balík původně hlubinné vody k hladině. Tímto způsobem se prý každoročně v Bajkalu vymění více než 100 km³ vody (týká se to zejména jižní části jezera), což stačí na stále zhruba 80% nasycení hlubinných vod kyslíkem. Tento fenomén může obdobně fungovat i v jiných velmi hlubokých jezerech mírného pásu.

Bez anomálií vody by byl náš svět zkrátka o poznání jinačí. Voda, jsi divná – a díky za to!

Použitá literatura uvedena na webu Živý.