



# Cesty do hlubin zamrzlého času

*Trudné řemeslo antarktických ledovcových vrtů má zlaté dno*

**PETR POKORNÝ**

*Dne čtvrtého února letošního roku pronikl tým ruských vědců a inženýrů téměř čtyřmi kilometry antarktického ledu k vodám jezera Vostok – největšího z asi sto padesáti dosud známých antarktických jezer ukrytých dosud nedobytně pod mohutným ledovcovým příkrovem. [1] Vladimír Putin, před novými volbami ministerský předseda, celý tým pochválil a přislíbil jeho členům vysoká státní vyznamenání. Už v roce 1998 se Rusové tvrdým nadložním ledovcem provrtali 3623 metrů hluboko. Zbývalo jim sotva 130 metrů poměrně měkkého, houbovitého ledu, aby dosáhli volné vodní hladiny. Následujících sedm let váhali, nanečisto testovali technologii a prováděli výpočty, aby na konci roku 2005 opět započali s vrtáním. Ale odpor vědecké veřejnosti byl takový, že plánovaná akce byla znovu přerušena. Největší obavy vyvolávalo 60 tun směsi petroleje a freonu, kterou je dutina vrtu vyplněna a která*

*neustále hrozila proniknout do podledovcových vod. Vzrušené debaty kolem možné kontaminace údajně 15 milionů let izolovaného vodního tělesa (minimálně tak dlouho totiž Antarktidu svírá souvislý ledovcový příkrov) [2] by mohly působit dojmem, že hlavním smyslem antarktických ledovcových vrtů je výzkum starých jezer. Původní cíle takových kampaní ovšem spočívají v něčem docela jiném.*

## **Přírodopis ledovce**

Když padá sníh na povrch ledovcového tělesa, jeho váha tlačí na starší vrstvy sněhu v podloží. Tím postupně vzniká kompaktní led s lehce bělavým nádechem – bělavým proto, že jsou v něm uzavřeny bublinky vzduchu. V horách se tlustá vrstva ledu neudrží, protože ledovce pomalu tečou ze svahu a na dně teplých údolí roztávají. Jenom v plo-

Dr. Petr Pokorný (\*1972)  
viz Vesmír 91, 308, 2012/5.

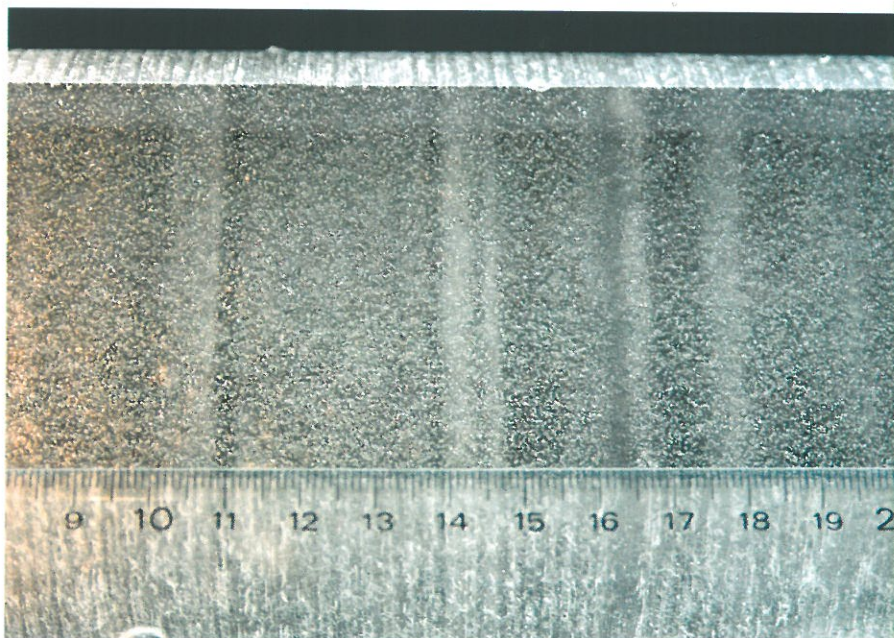
← Na protější straně: Obří lednice sloužící jako sklad ledovcových vrtů. Zdroj: <http://dels-old.nas.edu/climatechange>.

chém Grónsku a v Antarktidě vznikly ledovcové příkrovy mocné hodně přes tři kilometry (největší mocnost – 4780 m – byla dosud zjištěna ve východní Antarktidě západně od evropské výzkumné stanice Dome C). Tlak nadložního ledu při bázi je obrovský, takže i kontinentální ledovce pod jeho vlivem nakonec odtávají. Jenomže se to děje odspodu, částečně pod vlivem geotermálního tepla pronikajícího z nitra Země. Voda pomalu odtéká do stran. Někdy na rozhraní ledu a horninového podloží vznikají jezera stejného typu, jako je právě Vostok. Skoro všechno, co o nich víme, ovšem pochází pouze z nepřímých zdrojů – radarových, seizmických a gravitačních měření. Dnes nejsme daleko od okamžiku, kdy se dozvíme, jestli tato jezera vůbec představují nějaký specifický ekosystém. Absolutní tma, teplota pod bodem mrazu, vysoký tlak a kritický nedostatek živin příliš mnoho naděje na existenci složitého života nedávají. Nejspíš se tam jako v lednici dochovaly jen staré zbytky organismů a možná nějakého oživení schopné řasy, sinice a bakterie. Život na naší planetě je ale houževnatý a tajuplný, takže žádné překvapení není vyloučeno. I hluboká naftová ložiska mají své živáčky, tak proč ne i mrazivé vodní slujce?

Mocnost ledovců nemůže narůstat nad určitý, teplotou a tlakem jasně určený limit. Mocnost obou velkých ledovcových těles – grónského a antarktického – je skutečně téměř identická a pohybuje se právě na horní hranici. Jenže v Grónsku je celkově mnohem vlhčeji. Akumulační rychlost sněhu, potažmo ledu, je tam o hodně vyšší. Bylo zjištěno, že 3 kilometry pod povrchem grónského ledovce je uložen led starý zhruba 100 000 let, zatímco v Antarktidě jsou ve stejné hloubce vrstvy ledu staré až tři čtvrtě milionu let. (Snadno si spočteme, že antarktický ledovec se skládá z asi 750 tisíců každoročně ukládaných vrstviček, jejichž průměrná tloušťka odpovídá čtyřem milimetrům. Naproti tomu v Grónsku vznikne za jediný rok vrstva ledu mocná 3 centimetry.) Masa ledu je plastická a pod vlivem zemské tíže se pomalu přelévá. Nejvíce směrem od vyklenutého středu do stran, kde se na hladině oceánů odlamují kry. Z toho důvodu není vůbec jednoduché ztotožnit určitou hloubku v ledovci s určitým stářím ledu. Dnes pro to existují složité matematické modely založené na fyzikálních vlastnostech ledu a na přímo naměřených pohybech ledovcových mas.

### Z prehistorie ledovcových vrtů

Hmota ledovců se hromadí plynule a po velmi dlouhou dobu. Někdy jsou každoroční přírůstkové vrstvičky dokonce vidět pouhým okem a dají se snadno spočítat. Byl to nejspíš německý polární badatel Alfred Wegener (viz Vesmír 89, 164, 2010/3; 89, 242, 2010/4), kdo si při pohledu na ně poprvé uvědomil,



že se led může stát prvořadým archivem informací o vzdálené minulosti. Psala se ale dvacátá léta století minulého a tenkrát nikdo pořádně nevěděl, jak informační potenciál ukrytý v ledu zužitkovat. Snad změřit tloušťku jednotlivých vrstviček pro informaci o vývoji množství srážek, odhadnout množství prachových částic jako indikátor prašnosti atmosféry a změřit kyselost (pH) ledu pro informaci o intenzitě globální vulkanické činnosti (sopky totiž chrlí vysoko do stratosféry kyselinotvorné oxidy).

Až rozvoj geochemie po druhé světové válce připravil půdu pro opravdu mnohostranné využití ledovcových vrtů. Bohatství a vyspělá technologie Západu navíc otevřely podmínky pro to, aby vůbec bylo možné dostatečně dlouhé ledovcové vrty pořídit. V roce 1957 ukázal dánský paleoklimatolog Willi Dansgaard, že izotopické poměry mezi atomy kyslíku konzervovanými ve starém ledu mohou být využity k rekonstrukci dávných teplot v místě vrtu. [3] Proto byl v roce 1966 na americké vojenské základně Camp Century v severozápadním Grónsku pořízen první hluboký ledovcový vrt. Jeho chronologie byla sice hodně nejistá (roční přírůstky ledu nešly ve všech úsecích spočítat) a časový odstup jednotlivých analyzovaných vzorků byl hodně velký, nicméně se ukázalo, že analýzy ledu pro paleoklimatologické účely mají před sebou skvělou budoucnost. Ve vrtu se podařilo rozlišit klimatické události spojené s průběhem poslední ledové doby a na jeho bázi se dokonce rýsovalo jedno výrazně teplé období, které se dalo přisoudit poslední meziledové době (interglaciálu). A to byla nejlepší zpráva ze všech možných: Velké polár-

Detail jádra ledovcového vrtu s přírůstkovými vrstvičkami a vzduchovými bublinkami. Zdroj: [http://www.awi.de/fileadmin/user\\_upload/News/Press\\_Releases/2006/1\\_Quarter/AEROICE-4.p.jpg](http://www.awi.de/fileadmin/user_upload/News/Press_Releases/2006/1_Quarter/AEROICE-4.p.jpg).

**Abstract:** Journeys into the depth of frozen time by Petr Pokorný. Cores through the polar ice sheets provide a remarkable record of past environmental conditions. Ice coring evolved as a specific science since 1960s through pioneering effort of scientists from USA and other nations. Snow accumulating on polar plateaus of Antarctic and Greenland does this in a regularly ordered fashion that preserves a stratigraphic sequence accessible by drilling vertical borings into the ice. Collecting these cores is a specialized engineering challenge. Because ice is a deformable material, and flows, ice coring locations must be chosen carefully to extract the most reliable information. Deep cores require large equipment, and fluid-filled boreholes to avoid freezing and collapse of the hole. The deepest cores are collected during multi-year campaigns and provide views more than 700 000 years deep into the past.

*Následující seznam stručně shrnuje tradičně sledované vlastnosti ledovcových vrtů a krátce komentuje smysl jejich zkoumání.*

● **Tloušťka ročních přírůstkových vrsteviček.** Charakterizuje množství srážek z roku na rok. Pochopitelně pouze v případě, že lze vrstvičky vůbec nějak odlišit.

● **Přítomnost vrstev čírého ledu bez vzduchových bublinek.** Jde o led vzniklý letním rozmrazáním sněhu na povrchu ledovce. Jeho výskyt nese rovněž paleoklimatologickou informaci, ale zároveň upozorňuje na možné trhliny (hiáty) v jinak souvislém ledovcovém záznamu.

● **Relativní obsah stabilních izotopů  $\delta^{18}\text{O}$  a  $\delta\text{D}$ .** Jeden z hlavních parametrů využívaných k rekonstrukci dávné teploty. Teplotní závislost poměru izotopů souvisí s průběhem frakcionace při transportu molekul vody od zdroje odparu po místo definitivního uložení na povrchu ledovce. Proces je ve skutečnosti hodně komplikovaný a mnohastupňový. Základní princip spočívá v tom, že intenzita izotopické „destilace“ závisí na teplotě prostředí. Obecně platí, že čím chladnější je klima, tím víc je v ledu lehčích molekul vody.

● **Obsah biogenních plynů ( $\text{CO}_2$ , metanu a oxidů dusíku).** Protože jsou důležitou složkou biogeochemických cyklů, ukazují na minulé stavy globální biosféry. Jakožto skleníkové plyny navíc hrají důležitou roli ve zpětnovazebném fungování klimatického systému planety.

● **Teploty naměřené ve vrtech.** Nechce se tomu pomalu ani věřit, ale tepelná kapacita ledu je taková, že je v jeho vrstvách přímo uchována minulé teplota. Prudké změny teploty v minulosti jsou pouze vyhlazeny tepelnou difuzí. Do ukončených vrtů plněných nemrznoucí kapalinou stačí zanořit přesný teploměr, spouštět ho pomalu dolů a průběžně registrovat teplotu. Takto se dají zjistit harmonické nárůsty a poklesy teploty, které odpovídají dávným oteplením a ochlazením. Funguje to pochopitelně pouze v relativním smyslu – tepleji/chladněji.

● **Stanovení obsahu rozpuštěných síranů.** Jde o měřítko globální vulkanické aktivity, která má, jak známo, značný dopad na klima celé planety.

● **Obsah solí, hlavně NaCl.** Parametr popisující obsah mořského aerosolu. Závisí na vzdálenosti místa od moře (i ta se mohla v minulosti měnit) a na vývoji lokální meteorologické situace.

● **Obsah rozpuštěného vápníku.** Měřítka celkové prašnosti atmosféry, která mimo jiné ovlivňuje odrazivost – albedo.

● **Množství a kvalita minerálního prachu.** Jiné měřítko prašnosti atmosféry. Lze rozlišit prach sopečného původu, meteorického původu a ostatní prachové částice, jejichž množství ukazuje na rozšíření pouští na Zemi. Na základě minerálního složení lze mnohdy určit i zdrojovou oblast prachu (v Antarktidě je to hlavně jižní polovina Jižní Ameriky, v Grónsku Sahara).

● **Obsah izotopů  $^{10}\text{Be}$  a  $^{36}\text{Cl}$ .** Jde o kosmogenní izotopy, jejichž obsah odpovídá síle kosmického záření, která je modulována slunečním větrem. Tato měření mají největší význam mimo oblast vlastního studia ledovcových vrtů. Poskytují paralelní informaci důležitou pro kalibraci radiokarbonového datování. Vznik radioaktivního izotopu uhlíku ( $^{14}\text{C}$ ) v horních vrstvách atmosféry je na intenzitě kosmického záření totiž bezprostředně závislý.

ní ledovce neodtály ani v mimořádně teplém posledním interglaciálu, a záznam se tudíž dochoval neporušený.

Teď konečně nastala chvíle pro Antarktidu. Očekávání bylo veliké, protože každý metr hloubky tady znamená několikánásobně víc let směrem do minulosti oproti vlhkému Grónsku. První solidní antarktický vrt byl získán hned v roce 1968 na americké stanici Byrd. Jeho analýza ukázala překvapivě podobnosti s grónským vrtem, a tak se vůbec poprvé podařilo prokázat, že kvartérní klimatické změny měly skutečně globální ráz. Tím byly položeny první kameny mozaiky vedoucí k složitému obrazu moderní paleoklimatologické vědy a ke komplikovaným úvahám o procesech řídících dlouhodobý vývoj klimatu, včetně vlivu lidské civilizace.

**O nic snaží, než dovést kámen z Měsíce**

Inženýrské umění ledovcových vrtů je kapitola sama pro sebe. Na první pohled to nevydává, ale provrtat se několika kilometry ledu je mnohem větší oríšek než dostat se stejně hluboko do nejtvrďší skály. Přesně řečeno provrtat se tam a nepřijít přitom o křehký a jemně zvrstvený ledovcový záznam.

Pro ilustraci si popíšeme technické obtíže spojené s jedním nedávným, dost ambiciózním projektem. [4] Ambiciózním proto, že si jeho protagonisté usmysleli dostat se až na úplné podloží antarktického ledovce. Jde o vrt na japonské základně Dome Fuji. Základna stojí v nadmořské výšce 3810 metrů ve východní Antarktidě (na kótě  $39^\circ 42'$  východně a  $77^\circ 19'$  jižně). Mocnost ledu pod základnou byla před počátkem vrtání odhadnuta na rovné tři kilometry a matematické modely dávaly naději, že horizontální pohyb ledu je na tomto místě relativně omezený. Chronologický model takového vrtu (křivka popisující vztah hloubky a času) by měl tedy být relativně jednoduchý a měl by poskytnout solidní oporu pro odhad stáří událostí zachycených následnými analýzami. Nepředpokládalo se ani, že by mezi ledovcem a podložím v daném místě vězelo nějaké jezero.

První pokus o vrt na základně Dome Fuji spadá ještě do devadesátých let. Až do prosince roku 1996 šlo všechno hladce. Byla použita dosud obvyklá technologie mechanického vrtání s vyplachováním ledových pilin rovnou do vyvrtaného otvoru. Každé z vyzvednutých ledových jader mělo délku dva metry. Zamrznutí vrtáku a kolapsu otvoru bránila směs na bázi petroleje (kerosenu). Jak vrtání postupovalo, byly potřeba další a další hektolitry této organické smě-

Pohled do otvoru ledovcového vrtu vzniklého v průběhu výstavby neutrinového detektoru Icecube.  
Zdroj: [http://spiff.rit.edu/classes/phys200/lectures/icecube/drill\\_small.jpg](http://spiff.rit.edu/classes/phys200/lectures/icecube/drill_small.jpg).



si. V okamžiku, kdy bylo dosaženo hloubky 2503 metry, nemrznoucí kapalina nečekaně došla. Ani to ještě nevypadalo jako velký problém. Tým jako už několikrát předtím zastavil průnik do větších hloubek a jal se pouze udržovat dosavadní otvor průchozí. Vrtákem pořád nahoru a pak zase dolů, než dorazí další cisterna s petrolejem. Jenže v jednom momentě zařízení nečekaně zatuhlo. Pokus o jeho záchranu nástřikem kapaliny s vysokou hustotou (hydrofluorkarbonu) se nezdařil, a tak nakonec musel být vrt úplně opuštěn.

Pět následujících let vyvíjeli v Japonsku novou technologii a v Antarktidě se připravovali na otevření nového vrtu ve vzdálenosti 43 metrů severně od toho původního. Nový vrták byl vyroben v průběhu roku 2001. Následující dva roky probíhaly přímo v Antarktidě testovací vrty a budovala se vyhřívaná stavba, ve které bude celé zařízení provozováno. V průběhu testování vyšlo najevo, že japonští inženýři dokázali vyrobit malý zázrak. Nejenže byly použity špičkové materiály, ale i celá konstrukce zařízení byla úplně jiného druhu než ta předchozí. Tubus vrtáku mohl odebírat naráz celé čtyři metry neporušeného ledového jádra. To znamená dvakrát méně vytahování a opětovného spouštění ve srovnání se starším zařízením. Aby se nepříjemné ledové piliny netrousily do vyvrtaného otvoru, byly jímány do dlouhé vnitřní komory nad odběrovým tubusem. Teprve nad komorou pro ledové piliny byl umístěn motor, který zajišťoval rotační pohyb níže položené řezné hlavice ze speciálně vyvinutých slitin. Celá soustava byla v průběhu operace hydraulicky proplachována butyl acetátem, což je nemrznoucí kapalina, která si při teplotách kolem  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  udržuje nízkou viskozitu a má zhruba stejnou hustotu jako okolní led. Brání proto zamrznutí a zároveň udržuje správný tlak ve vyvrtaném otvoru, takže v žádné hloubce nemůže dojít k jeho kolapsu. Touto kapalinou se vyvrtaný otvor celý napouštěl. (Jak velký objem butyl acetátu bylo v ten který moment potřeba zajistit, to si můžeme opět snadno spočítat – vrt o kruhovém průřezu měl poloměr 67,5 mm.)

V sezoně 2003/2004 se začalo s vrtáním naostro. Počasí bylo bídné a vážlo zásobování stanice. Technici časem získali potřebnou zručnost, a tak bylo v témže roce dosaženo hloubky 362 m. V následující sezoně 2004/2005 šlo všechno mimořádně hladce. Byla dosažena hloubka 1850,35 m, a co je nejdůležitější, byla vyzvednuta ledová jádra prvotřídní kvality. Pod dojmem zdárného průběhu sezony bylo na příští rok naplánováno triumfální dosažení podloží. Zbývalo zhruba 1200 metrů ledu. Na základnu bylo potřeba dorazit co nejdříve po skončení antarktické zimy.

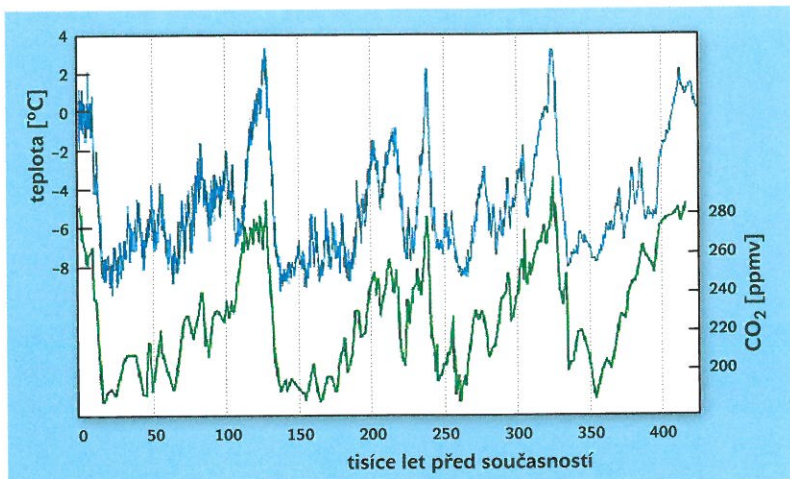
Vrtání poslední plánované sezony začalo 17. listopadu 2005. Vrt postupoval rychlostí 133 metrů za týden a 12. ledna oslavili výzkumníci dosaženou hloubku 3000 metrů. Skalní podloží už muselo být nedaleko, protože vysoce stlačený led dosahoval téměř bo-



du tání. A tehdy nastaly další vážné problémy. Ledové piliny uvnitř vrtáku okamžitě tuhly v kompaktní ledovou masu a celé zařízení se začalo ucpávat. Vyvrtat jedno ledové jádro trvalo najednou víc než čtyři hodiny a situace se neustále zhoršovala. Nakonec se na každý zátah dařilo vyzvednout sotva 10 centimetrů jádra. Celou soustavu přitom bylo potřeba opakovaně nořit do hloubky tří kilometrů a zase ji vytahovat zpátky. 23. ledna bylo dosaženo hloubky 3028,52 m a na této úrovni byla práce zastavena. Nejvyšší čas balit kufry před vypuknutím polární zimy. Dome Fuji nepatří mezi základny uzpůsobené pro celoroční pobyt.

Zbývajících 6,7 metrů bylo dovrženo během 39 dnů až v následující sezoně 2005/2006. V samotném závěru operace do vyvrtaného otvoru začala pronikat voda z podloží ledovce. Měla teplotu  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ve vrtáku ihned mrzla a úplně ho vyřadila z provozu. Byly v ní nalezeny částičky horniny z podloží ledovce. Nastal moment, kdy byla terénní část projektu Dome Fuji prohlášena za dovršenou. Podloží ledovce bylo dosaženo.

**Hlava ledovcového vrtáku s vrtným jádrem. Zdroj: [http://depts.washington.edu/isolab/IsoLabimages/WAIScore\\_large.jpg](http://depts.washington.edu/isolab/IsoLabimages/WAIScore_large.jpg).**



Jeden z oblíbených a často reprodukováných výsledků analýz antarktického ledovcového vrtu Vostok. Modrá křivka představuje rekonstruovanou teplotu (hodnoty na svislé ose znamenají rozdíl oproti současnosti) a byla získána interpretací výsledků analýz stabilních izotopů kyslíku v ledu. Zelená křivka představuje koncentraci oxidu uhličitého ve vzduchových bublinkách. Zdroj: en.wikipedia.org.

### Co s nimi?

Po každém hlubokém ledovcovém vrtání jsou terénní sklady napěchovány několika kilometry ledových válců – vrtných jader. Může začít jejich převoz a zdoluhavá práce na analýzách.

Jako první je třeba pokusit se o co nejpřesnější datování každého centimetru starého ledu. Některé chemické parametry (poměry stabilních izotopů, elektrická vodivost, obsahy určitých prvků) mají roční periodicitu a dají se použít k odpočítávání jednotlivých let v případě, že přírůstkové vrstvičky nejsou viditelné pouhým okem. V hlubokých částech vrtů, tam, kde už jsou rozdíly mezi ročními přírůstkovými vrstvičkami vysokým tlakem úplně setřeny, nezbyvá než se pokusit o nepřímé datování srovnáním s jinými záznamy (nemusejí být jenom ledovcové, může jít třeba o kontinentální spraše nebo o vrty hlubokomořskými sedimenty). V nejhorších případech pomohou numerické modely rychlosti akumulace ledu a později, po provedení klimatických rekonstrukcí, přispěje k datování i korelace klimatického záznamu s vypočtenými harmonickými změnami Milankovičových orbitálních parametrů (viz Vesmír 74, 488, 1995/9; 89, 164, 2010/3 a 89, 242, 2010/4). Velmi vítané jsou stopy jednorázových událostí známých a přesně datovaných z nezávislých zdrojů – například velké sopečné výbuchy nebo přepólování magnetického pole Země (nejznámější, ale nikoliv jediná je magnetická reverze *Brunhes-Matuyama*, ke které došlo před 780 000 lety).

Věk nejstaršího ledu ve vrtu Dome Fuji, jehož získání bylo popsáno v předchozím odstavci, byl stanoven na 720 000 let. Záznam se tudíž zařadil mezi vůbec nejdelší. Absolutní rekord zatím drží 3259 metrů hluboký vrt ze stanice Dome C provozované Evropy. Led, který z něj pochází, dosahuje stáří 810 000 let. [5]

V ledovcových vrtech je možné provádět spoustu fyzikálních a chemických analýz a vztahovat je pak k různým aspektům minulých environmentálních změn. Takových postupů je dnes k dispozici nepřeberné množství, a proto jsou vzorky ledu ve světových laboratořích vyvažovány zlatem. Zřejmě nejzajímavější vlastností ledovcových vrtů je přítomnost vzduchových bublinek, které tam uvízly v průběhu postupné přeměny sněhu v led (děje se to hlavně na bázi *firnu*, typicky v hloubce 50–100 metrů pod povrchem). Bylo zjištěno, že mezi bublinkami uzavřenými v ledu téměř nedochází k difuzi plynů, a proto představují dokonalé vzorky někdejší atmosféry.

### K DALŠÍMU ČTENÍ

- [1] Gramling C.: A Tiny Window Opens Into Lake Vostok, While a Vast Continent Awaits. *Science* 335, 788–789, 2012.
- [2] Inman M.: The Plan to Unlock Lake Vostok, *Science* 310, 611–612, 2005.
- [3] Taylor T.: History of Research, Greenland and Antarctica, *Encyclopaedia of Quaternary Sciences*, s. 1284–1288. Elsevier 2007.
- [4] Motoyama H.: The Second Deep Ice Coring Project at Dome Fuji, Antarctica, *Scientific Drilling* 5, 41–43, 2007.
- [5] Wolff E., Brook E.: Antarctic ice cores, *PAGES News* 15, 11–12, 2007/2.

## Poznávejte přírodu!

S časopisem Naše příroda je to jednoduché! V každém čísle přinášíme zajímavé články se zaměřením na faunu, flóru a zajímavá místa České republiky. Samozřejmostí jsou špičkové fotografie a kvalitní zpracování.

Využijte předplatné jako dárek, který potěší 6x ročně!

### Kontakt:

redakce@nasepriroda.cz  
tel. 585 204 862

### Předplatné:

www.send.cz, tel. 225 985 225

**Roční předplatné: 348 Kč**



Bližší informace o časopise najdete na [www.nasepriroda.cz](http://www.nasepriroda.cz)

nebo na [www.facebook.com/nasepriroda](https://www.facebook.com/nasepriroda)



INZERCE

# Vostok

## Úvahy o biologii podledovcového jezera

*Dal zbudovat svůj letohrad  
V Xanadu velký Kublaj Chán,  
kde svatá řeka Alf má spád  
skrz obřích slují tmu a chlad  
v neslunný oceán.*

S. T. Coleridge: Kublaj Chán<sup>1</sup>

V druhém únorovém týdnu roku 2012 byla Česká republika sevřena v mrazivém objetí zimní studené vlny, nejužší za poslední desetiletí. Příroda jako by úmyslně vytvořila tu správnou kulisu pro jedno ze žhavých vědeckých oznámení letošního roku. Ve středu 8. února potvrdil Petrohradský institut pro výzkum Arktidy a Antarktidy kolující dohady, že předchozí neděli dosáhl ruský antarktický výzkumný tým pod vedením Alexandra Jegalina klíčového úspěchu. Zpráva to byla o to šťastnější, že přišla za pět minut dvanáct – antarktické léto již téměř skončilo. Shrnutí a potvrzení: **Vrt antarktickým ledovcem dosáhl hladiny subglaciálního jezera Vostok.**

Podledovcová jezera vyvolávají téměř verneovské vzrušení jak mezi laiky, tak mezi odbornou veřejností. Zcela oprávněně. Jedná se o jedno z mála prostředí, kam nejenže lidská noha zatím nevkročila, ale na které byl zatím do značné míry krátký i lidský intelekt. Přítom nejde o nějaké „mikroskopické loužičky“ zajímavé jen pro pár odborníků. Vostok má objem větší než severoamerické jezero Ontario a zcela srovnatelný povrch. Takový výstup na Mount Everest byl jistě milníkem lidských schopností, ale přiznejme si, že jsme celkem dobře tušili, jak to tam vypadá. Oproti tomu naše znalost prostředí subglaciálních jezer sestává z nepřímých důkazů, dohadů a počítačových modelů. Z nejednoho důvodu tak průzkum Vostoku připomíná spíše expedice k jiným planetám...

Geologie a geografie jezera, modelování jeho prostředí, limnologie (jestli vůbec tento pojem zcela vystihuje tak bizarní prostředí), chemismus a další vlastnosti, historie i technika jeho zkoumání jsou neobyčejně zajímavé obory a příslušní odborníci jistě co nevidět přinesou své poznatky (pár základních faktů viz Vesmír 79, 253, 2000/5; 79, 323, 2000/6 a 90, 276, 2011/5, ve zkratce též rámeček na s. 445). Už samotný akt vrtání do jezera vzbudil jisté kontroverze (viz článek Petra Pokorného na s. 438). Standardně používají ruští výzkumníci při hloubení jako nemrznoucí činidlo toxický kerosin, ale

kvůli oprávněné obavě ze znečištění jezera přešli v posledním úseku na freon. Ze stejného důvodu použili v posledních deseti metrech a k proražení hladiny jen tenčí tepelnou sondu. Voda následně pod obrovským tlakem vyletěla šachtou několik desítek metrů nahoru, než se proud zastavil zamrznutím vody v tenké dolní části. Horní část vody bude příští rok (samozřejmě už jako led) vyzvednuta a podrobena průzkumu. Vědci tímto postupem vyřešili hned několik problémů jednou ranou – nemusejí se prozatím obávat znečištění, protože nepronikli dovnitř jezera, ale naopak voda pronikla pod tlakem ven. Vrt je navíc nyní v dolní části pevně uzavřen a horní část šachty se tlakem zezdola vyčistila od značného množství toxických chemikálií – možných kontaminantů. Ty stačí svrchu odčerpat.

Příští rok by se mělo začít s chemickými a biologickými analýzami vody odebrané z jezera. Slibné výsledky lze očekávat především od environmentálního sekvenování, jinými slovy od analýzy přítomné DNA či RNA ve vzorku, neboť tyto mimořádně citlivé techniky jsou schopny detekovat přítomnost jakýchkoli živých organismů či jen zbytků jejich genetické informace. Po případném objevení organismů můžeme očekávat další analýzy, například fylogenetické příslušnosti k taxonomickým skupinám, odhady doby jejich oddělení od příbuzných linií pomocí technik molekulárních hodin či přímou vizualizaci v optickém či elektronovém mikroskopu. Ruští výzkumníci také vyvíjejí robotické sondy, které by snad už od sezony 2013/2014 mohly prozkoumávat spodní partie jezera, analyzovat jeho dynamiku a možné rozvrstvení, sbírat zde vzorky a analyzovat sediment na dně. V neposlední řadě nám průzkum jezera Vostok slouží jako trénink na daleko komplikovanější výzkum podobných prostředí, která se nalézají na některých měsících vnějších planet, zejména na Jupiterově Evropě.

Největší vzrušení oprávněně vyvolává představa možných živých obyvatel jezera Vostok. Nálezy nejrůznějších extremofilních organismů z posledních let v nás vyvolávají opodstatněnou naději na nalezení podobných tvorů i zde.

Paradoxně největším překvapením by bylo, kdybychom zjistili, že jezerní voda je zcela sterilní a žádné organismy zde nežijí. Tato možnost však můžeme téměř jistě vyloučit. Jakkoli je místní prostředí extrémní, dlouhé

JAN TOMAN

Jan Toman (\*1988) je v magisterském studiu teoretické a evoluční biologie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Nyní se zabývá převážně studiem, v budoucnu by se rád věnoval (nejen) evoluční biologii.

1) Jedna z nejpůsobivějších scén v opiové snově básni *Kublaj Chán* od S. T. Coleridge. Těžko si nevšimnout, že v případě subglaciálních jezer jde o věc značně přitažlivou pro širokou veřejnost i z psychologického hlediska. Variace na archetypální kombinaci vlastností hluboko – skryto – vlhko, voda – temno procházejí lidskou kulturou od pradávna. Šamani v duchu cestují vírem do vod plných démonů hluboko pod zemí, studna v klasických příbězích i moderních hororech značí něco skrytého a ohrožujícího atd.

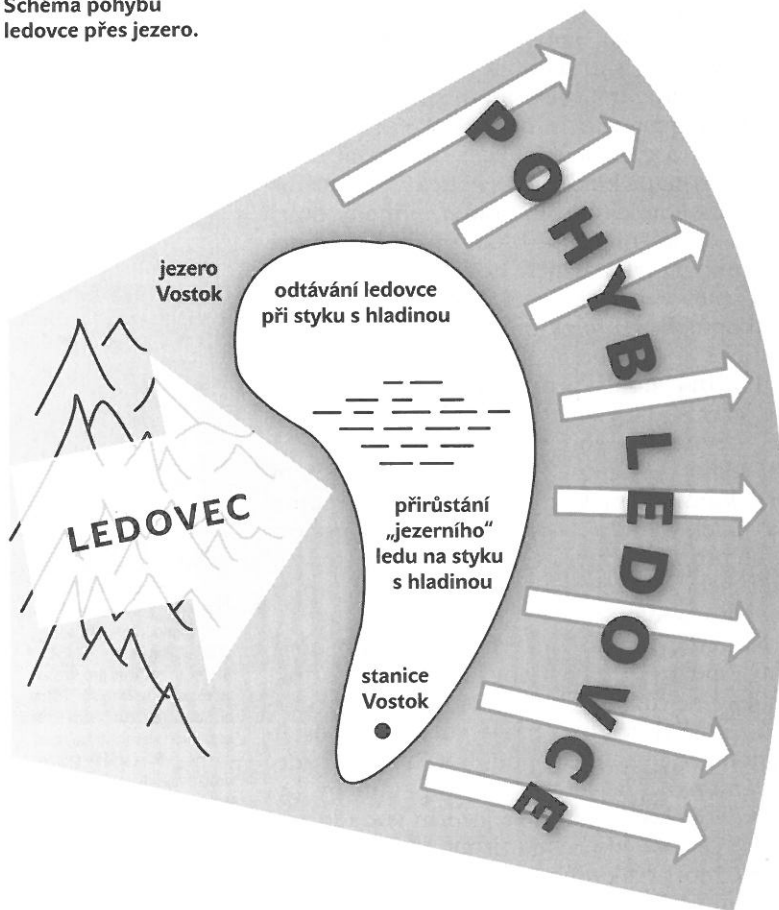
řadě prokaryotických organismů by nedělalo sebemenší problém přežít zde v neaktivních dormantních stádiích. Kromě toho mnoho z nich dokáže aktivovat i za teplot okolo  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , někteří snad i při  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a teoretické limity nám známých extremofilů z hlediska metabolismu mohou být někde mezi  $-80$  a  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mohla by zde přežít i některá eukaryota. Ve vzorcích ledu nad hladinou (jezerní led, viz rámeček) se navíc již podařilo identifikovat mnoho mikroorganismů. Dříve se objevovaly relevantní námitky, že může jít jen o degradované zbytky mikrobů kdysi zachycených ledovcem. Ty ale byly v posledních letech vyvráceny – velká část buněk je nepoškozená, a některé se dokonce podařilo kultivovat. Část z nich téměř jistě pochází z jezera, ale nemalá frakce, zejména v horních partiích ledovce, jsou mikroorganismy zanesené sem z povrchu. Tak vyvstává jiný problém.

Je možné, že jezero není tak izolované, jak se zdá, a ve skutečnosti probíhá pomalá výměna mikroorganismů s nadložním ledovcem a potažmo s povrchem? Místní organismy by tak byly pouhými nedávnými migranty, ve velké většině asi dormantními stadii prokaryot. Někteří by zde mohli aktivovat, ale nebylo by to žádné „terno“. Spíše by jen skomírali. Šlo by prakticky o stejné kryofilní mikroorganismy, jaké známe odjinud z Antarktidy. Tuto nepřilíš lákavou eventualitu nemůžeme vyloučit a je jednou z celkem pravděpodobných alternativ. Ve spodních partiích ledovce (ale nad jezerním ledem) skutečně byly nalezeny např. proteo-

bakterie. Uvědomme si ale, že není nevyloučena ani lákavější možnost, že zde mezitím první migranti mohli získat speciální adaptace a vytvořit specifickou biosféru.

Nejpravděpodobnější možností je, že ve Vostoku nakonec nalezneme původní, desítky milionů let oddělené linie prokaryotických mikroorganismů. Ani tak ale nemusí být nijak mimořádné a na první pohled odlišné od těch z antarktického povrchu. Řada expertů upozorňuje, že evoluce prokaryot je velice pomalá. Vždyť například miliardy let staré prvohorní zkameněliny sinic jsou od dnešních zástupců téměř k nerozeznání. Proč by zde za několik málo milionů let měla evoluce postupovat rychleji? Zde se podle mě skrývá základní nepochopení problému. Prokaryota se z mnoha hledisek nemění, protože jsou dokonale přizpůsobená svému prostředí. Neustálý tlak abiotického prostředí a koevoluce s jinými organismy jim vymodelovaly například ideální morfologii. Z mnoha dalších hledisek jsou ale proměnlivá naprosto mimořádně – uvědomme si, jak rychle, za nějakých padesát let, část z nich získala rezistenci na antibiotika. To samé platí i pro řadu jiných metabolických změn, což potvrdil nejen laboratorní experiment. Navíc u nich nefunguje jen obligátní přirozený výběr, ale i silný horizontální přenos genetické informace. Spíše tak platí pravý opak – prokaryota jsou schopna měnit se relativně rychle a hlavně důkladně. Když dosáhnou ideálního stavu, dlouho se ho potom drží. Pokud je tento pohled správný, ve Vostoku bychom mohli očekávat skutečně zajímavé objevy. Vždyť právě prostředí je zde naprosto unikátní a mohlo by vyprodukovat i unikátní prokaryotické ekosystémy. Například metabolismus místních organismů by v takovém případě jistě stál za pozornost. Evoluci místních obyvatel by ale mohl zpomalit extrémní chlad a nedostatek živin, oboje obecně zpomaluje životní procesy. Celkový vliv těchto faktorů však poznáme až při konkrétním výzkumu. V jezerním ledu byly prozatím nalezeny stopy několika eubakteriálních skupin, konkrétně Proteobacteria, Firmicutes, Bacteroidetes a Actinobacteria. Část z těchto organismů se dokonce podařilo kultivovat. Ačkoli zde straší stín kontaminace vzorků bakteriemi z povrchu, je pravděpodobné, že pozorovaní zástupci opravdu pocházejí z vod jezera. Přinejmenším v ledu se však nacházejí ve velice malých koncentracích. Asi nejzajímavější je přítomnost  $\beta$ -proteobakterie *Hydrogenophilus thermoluteolus*, potvrzené navíc za velmi přísných opatření proti kontaminaci. Jde totiž o termofilní organismus! Běžně se vyskytuje v horkých pramenech – na dně jezera by tudíž mohly být vývěry horkých vod, což je neobyčejně zajímavá eventualita.<sup>2</sup> Poněkud překvapivé je, že se zatím nepodařilo najít stopy archeí – odlišných prokaryotických organismů a po eubakteriích a eukaryotech třetí domény života na Zemi. Archea jsou přitom obecně běžná a o polárních vodách to platí dvojnásob. Jejich zdánlivá nepřítomnost může být

Schéma pohybu ledovce přes jezero.



# Jezero Vostok

Jezero Vostok je největším z více než dvou stovek pozoruhodných útvarů, které se nacházejí pod Antarktickým kontinentálním ledovcem. Subglaciální jezera, přinejmenším o takové rozloze a v takovém počtu, se zřejmě jinde na světě nevyskytují. Pod jediným dalším dnešním kontinentálním ledovcem – v Grónsku – nebyla zatím žádná objevena, pouze jistá variace na ně by se mohla nacházet na Islandu. Vostok má tvar otevřeného písmene V a rozměry zhruba 250 na 50 km. Nachází se nad tektonickým zlomem na východoantarktickém kontinentálním štítu. Maximální hloubka se odhaduje na 800 m. Hladinu jezera překrývá asi čtyřkilometrová vrstva ledu (přesně 3769 m), která na povrchu vytváří rovnou pláň. Právě na ní roku 1957 ruští vědci vystavěli polární základnu Vostok.

Podezření, že může jít o hladinu obrovského zamrzlého jezera, první vyslovil geograf Andrej Petrovič Kapica na základě seismického měření (samotná myšlenka subglaciálních jezer se ale postupně rozvíjela už od konce 19. století). Jeho domněnku potvrdila spolupráce ruských a britských vědců na radarovém profilování v sedmdesátých letech a následně altimetrické snímkování evropské družice ERS-1 roku 1991. Od sedmdesá-

tých let zde probíhají vrty ledovcových jader pro paleoklimatologické rekonstrukce. Jeden z těchto vrtů vede až k hladině jezera. V kapalném stavu jezero udržuje zřejmě spolupůsobení geotermálního tepla z podloží a tlaku nadložního ledovce. Kontinentální ledovec se pomalu pohybuje, pod tlakem nadloží stéká spodní plastická vrstva ledovce ze svahů směrem k hladině jezera a přináší minerální látky a živiny. Navíc při kontaktu s hladinou za určitých podmínek (v severní části jezera) pomalu odtává a zároveň vytlačuje vodu z jezera nahoru – ta za jiných podmínek (ve střední a jižní části) mrzne, což zajišťuje pomalé cyklování materiálu. Nad hladinou tak vzniká akrecí ve spodní části ledovce „jezerní led“ o tloušťce asi 200 m (a dalších asi 300 m ledu komplikované struktury). Celý objem jezera se vymění za několik tisíc let. Z tohoto důvodu nelze využít posledních několik stovek metrů ledu nad hladinou k paleoklimatologickým analýzám.

Geotermální teplo z podloží vyrovnává – byť malou – ztrátu tepla hladinou do ledovce. Některá jezera také zřejmě pod enormním tlakem ledovce „upouštějí“ čas od času vodu periodickými řekami do jiných subglaciálních jezer nebo do moře. Stáří jezera je stále otázkou. Je možné, že jezero se zde nacházelo ještě před vznikem za-

lednění. Jezero Vostok bylo při postupu ledovce zřejmě celkově přetvořeno, ale je možné, že cenný záznam o třetihorní Antarktidě v sedimentech na dně jezera byl z větší části zachován. První ledovce v Antarktidě každopádně začaly vznikat po oddělení Austrálie zhruba před 40 miliony let a jejich tvorba postupně gradovala po oddělení Jižní Ameriky na hranici eocénu a oligocénu (před 34 miliony let) a po plném rozjezdu studeného cirkumpolárního mořského proudu (před 23 miliony let). Plného rozsahu dosáhly zhruba před 15 miliony let a Antarktidu finálně zamklo do zajetí ledu spojení Amerik Panamskou šíjí spolu s celkovým ochlazením Země (před 3 miliony let). Jezero bylo tedy izolováno od okolí před asi 3 až 30 miliony let, s největší pravděpodobností před 15 až 23 miliony let.

Očekává se, že voda jezera má asi  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (nezmrzne kvůli enormnímu tlaku) a je mimořádně nasycená atmosférickými plyny – zejména kyslíkem a dusíkem – a to až na hodnotu padesátinásobně vyšší, než jakou mají jezera povrchová. Možná stratifikace jezera a proudy způsobující míšení, stejně jako chemismus vody a další parametry jsou nyní předmětem dohadů a modelování a finální odpověď nám dá až detailní průzkum. Salinita je pravděpodobně nízká, stejně jako obsah živin – jde o oligotrofní prostředí. Do vodního tělesa ze zřejmých důvodů neproniká žádné sluneční záření. Jde tedy o dlouhodobě stabilní, živinami chudý, mrazivý a věčně temný svět.

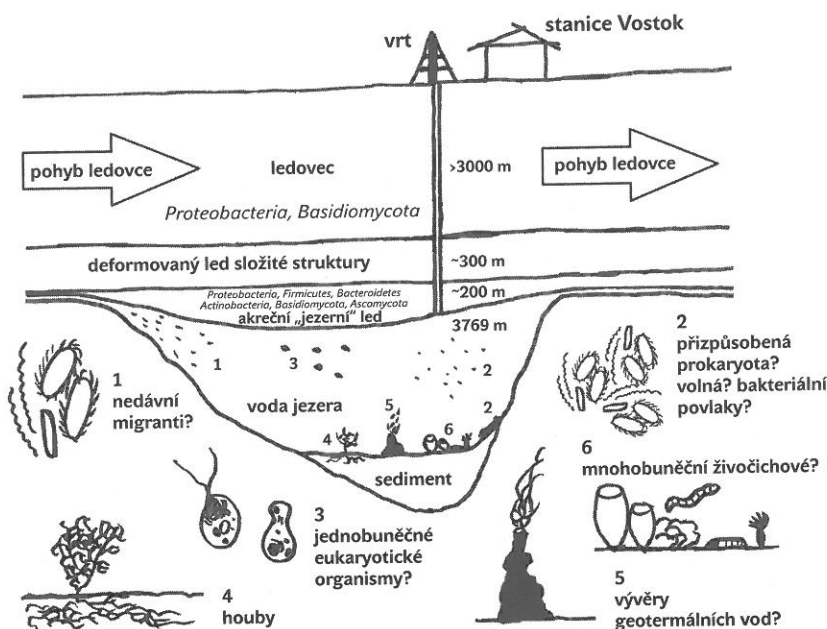
důsledkem technik detekce použitých v tak nestandardním prostředí, ale je docela dobře možné, že jde o jedno z prvních velkých vostockých překvapení. Každopádně zde s velkou pravděpodobností můžeme očekávat rozvinutá prokaryotická společenstva.

Fascinující možností zůstává existence eukaryotických organismů ve vodách Vostoku. Různé skupiny prvoků poměrně hojně obývají povrchová antarktická prostředí. Z hlubších partií ledovců jsou ale zdokumentovány velice chabě a prakticky se omezují na různé skupiny hub. To vyvolává značné podezření, že jsme narazili jen na jejich takřka všudypřítomné spory či zbytky. Je ale čím dál pravděpodobnější, že alespoň v některých případech nejde pouze o podobné „smetí“. V podzemních vodách pod Baltským mořem vědci pozorovali značnou diverzitu různých houbových skupin (zejména morfotypu hlenek a kvasinek) se zřetelnými přizpůsobeními na chladné a živinami chudé prostředí. Podobně tomu bylo i při analýze slaných výmrazků v sibiřském permafrostu. V případě Vostoku navrhla skupina vědců mimořádně mazaný přístup, jak přítomnost hub otestovat. Uvědomili si, že jak ledovec nad jezerem pomalu teče, je do jeho spodní strany postupně vlačována voda z jezera (viz rámeček). Nejprve se vytváří jezerní led nad mělčinou, následně nad otevřenou vodou a nakonec opět na mělčině. Vertikální řez jezerním ledem tedy odhalí lec-

cos o prostředí, nad kterým se usazoval. Naopak materiál z ledovce jen pár desítek metrů výše představuje řádově miliony let starý led bez kontaktu s hladinou. Po provedení příslušných analýz našli vědci ve všech hloubkách stopy hub a jejich životaschopné spory. V starém ledu byly výrazně vzácnější, s nižší diverzitou, a šlo výhradně o stopkovýtrusné houby. V jezerním ledu také převažovaly houby stopkovýtrusné, ale vyskytovaly se zde i vřecovýtrusné; oboje s asi desetinásobnou diverzitou oproti ledu nadložnímu. Jejich zastoupení se mění podle místa vzniku ledu, a naznačuje tak možnou existenci různých společenstev. Největší diverzita i koncentrace buněk, včetně životaschopných, pochází z ledu uloženého na rozhraní mělčiny a otevřené vody. Část z nich jsou druhy psychrotolerantní (schopné přežít i v extrémně studené vodě, ale preferující teploty nad  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), část druhy psychrofilní (ty dávají přednost nízké teplotě a nad  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  hynou). Podařilo se je dokonce kultivovat, část vytváří klasická houbová mycelia. Fylogenetická analýza ukázala, že jde o příbuzné jinak běžných skupin (např. *Penicillium*), což je přesně to, co bychom zde očekávali – běžné organismy se náhodou dostaly do neobvyklých podmínek a musely se s tím vyrovnat. Mimochodem dřívější elektronové mikroskopování ledu odhalilo i zbytky jednobuněčných „žas“ rozsivek, byť vesměs značně degradovaných. Je tedy dost dobře možné, že ve vodách

2) Nicméně analýza poměru izotopů helia  $3\text{He}/4\text{He}$  mluví spíše proti existenci hydrotermálních vývěrů. Celá věc tak zůstává otevřena.





Příčný řez jezerem a nadloží. m.

jezera se nachází velmi různorodé společenstvo jednobuněčných prokaryot a eukaryot.

Nejpřítazlivější možností, ale zároveň tou nanejvýš spekulativní, zůstává otázka existence mnohobuněčných živočichů v temných vodách Vostoku. Paradoxně dva faktory, které nás jako limitní napadnou první – tlak a teplota –, představují nejmenší problém. Hlíští se vyskytují hluboko uvnitř zemské kůry, aniž by je tlak nějak omezoval a himálajský pakomár rodu *Diamesa* je aktivní i při  $-18^{\circ}\text{C}$ . Největší překážkou je nedostatek živin. Je pravda, že pokud bychom uvažovali o Vostoku jako o homogenním prostředí, můžeme existenci mnohobuněčných živočichů (přinejmenším tak, jak je známe) z hlediska jejich energetických nároků zavrhnout. Je ale možné, že se živiny a na ně navázaný ekosystém hromadí v určitých oblastech, stejně jako je zde možnost vývěrů horkých pramenů nebo zpřístupnění usazenin bohatých na organické látky. Potom by se šance na nalezení mnohobuněčných živočichů značně zvýšila. Pokud zde ještě před zaledněním existovalo jezero a pokud nedošlo při

zalednění k jeho výraznému přepracování (nebo pokud se zachovaly alespoň původní sedimenty, kde mohli obyvatelé přežít), šance by mohly být relativně vysoké. Někteří výzkumníci mluví o takové změně normálního jezera na podledovcové jako o „glaciální dietě“. Nynější mnohobuněční obyvatelé by téměř jistě pocházeli z původních obyvatel jezera. Můžeme uvažovat zejména o hlístech či vířnicích, možná i o některých korýších, živočišných houbách, žahavcích, mechovkách, želvuškách a dalších malých a na energii nenáročných organismech. Jisté je, že by museli projít značnými adaptacemi na odlišné a pro ně nevraživé prostředí – byli by pomalí, s extrémně dlouhou generační dobou, vesměs filtrátoři nebo bakteriovorové žijící na hranici vody a sedimentu. Není bez zajímavosti, že v mnoha ohledech podobné prostředí na Zemi zřejmě panovalo ve velkém v obdobích globálního zalednění v Cryogenu na konci Proterozoika, které předcházelo rozvoji mnohobuněčných živočichů (Vesmír 81, 254, 2002/5). Velice podobné životní strategie – bakteriovorie a filtrování – pravděpodobně využívali první mnohobuněční živočichové už tehdy. Mějme však na paměti, že výskyt mnohobuněčných živočichů ve Vostoku vyžaduje až příliš velké množství předpokladů, z nichž přinejmenším některé – existence jezera před zaledněním, nepřeproducování ledovcem – jsou spíše nepravděpodobné. Tuto možnost tak zatím ponechme v rovině spekulací.

Ať už tedy ve vostočském „neslunném oceánu“ skomírá pár nešťastných migrantů, prosperují zde nikým nerušená „proterozoická“ společenstva prokaryot ve svém pomalém tanci spolupráce a manipulace, dnem jezera se rozrůstají nezmatelným tempem zdánlivě nekonečná podhoubí mrazuvzdorných hub a v pomalém proudě vlají závěsy jejich plodnic, nebo zde kypí životem bohatá společenstva všech zmíněných, na kterých se pasou mnohobuněční živočichové navrátilivši se ke způsobu života svých dávných předků; ať již platí cokoli, máme se při průzkumu Vostoku v následujících letech rozhodně na co těšit.  $\infty$

## Laboratory of developmental biology and genomics

is looking for a post-doc

University of South Bohemia,  
Faculty of Science and Biology Centre, Czech Academy of Science

Starting 1st October 2012 or later  
CV by 30th July 2012

<http://kmb.prf.jcu.cz/en/laboratories/en-krejci-lab>

# Stáří vrstev

*Při zkoumání obsahu CO<sub>2</sub> v atmosféře se používají data z ledovcových vrtů, jak se určuje stáří jednotlivých vrstev?*

Jan Doležal, janek.dolezal@gmail.com

Není určitě žádným tajemstvím, že povrchy ledovcových těles nejsou tvořeny ledem, ale čerstvým sněhem. (Tedy v případě, že ledovce v daném místě zrovna neodtávají – o tajících ledovcích tady z pochopitelných důvodů mluvit nebudeme.) Pod čerstvým sněhem leží firn, což je v podstatě starý, ulehlý sníh. Teprve v hloubce 50 až 150 metrů dochází účinkem váhy nadloží k definitivní přeměně firnu na led. Tehdy se uzavírají póry mezi jednotlivými „vločkami“ firnu. Jde o moment, kdy konečně dochází k izolaci bublinek vzduchu – malinkých vzorků atmosféry přichystaných pro potenciální budoucí badatele – od okolní atmosféry. Než k tomu došlo, vzduch všemi meziprostory volně proudil a šířil se difúzí.

V právě uvedených skutečnostech spočívá největší obtíž při datování vzorků staré atmosféry získaných z ledovcových vrtů. K datování samotného ledu máme rozmanité nástroje, jejichž souběžná aplikace je schopná podat dostatečně přesný obraz o stáří jednotlivých vrstev záznamu. Zmíním se o nich za chvíli. Jenomže bublinky vzduchu jsou po každé výrazně mladší než led, který je obklopuje. Rozdíl může činit několik desítek let, ale i celá dlouhá tisíciletí. Záleží na teplotě a hlavně na rychlosti akumulace – tedy na době, za kterou se ona výše zmíněná 50 až 150 metrů mocná vrstva firnu utvoří. Rozdíly mezi stářím ledu a vzduchu přitom nejsou konstantní v čase, protože oba faktory (teplota i rychlost akumulace) se průběžně proměňují. Sebesložitější numerický model parametrizovaný současným pozorováním nám tudíž problém z principu nemůže vyřešit.

Nezbývá tedy, než se soustředit na takové úseky ledovcových záznamů, které vznikly v době prudkých klimatických změn. Charakter čtvrtohorního klimatu nám přitom hraje do karet. Jak známo, jeho prudké změny nebyly v minulosti něčím výjimečným. A tak můžeme porovnat variace v obsahu izotopu <sup>15</sup>N v bublinkách vzduchu s variacemi obsahu izotopu <sup>18</sup>O v ledu. V obou případech tyto variace odrážejí změny minulé teploty. Každá jednotlivá klimatická změna je tak kvazi-simultánně zaznamenána ve dvou odlišných hloubkách. Výše v ledu a o něco níže v bublinkách vzduchu. Takže stačí po-

rovnat oba nezávislé záznamy změn klimatu tím, že se obě křivky pokusíme na sebe vzájemně „napasovat“. Těto metodě se říká *wiggle matching* a technicky je poměrně jednoduché jí zvládnout.

Tímto postupem jsme tedy vyřešili jednu podstatnou část problému datování ledovcového vrtu: Získali jsme dostatečně přesnou představu o relativním stáří záznamu dochovaného ve vzorcích minulé atmosféry vůči záznamu dochovanému v ledu. Teď už víme, o kolik mladší jsou bublinky vzduchu oproti ledu, který je obklopuje. Jenže jedna zásadní obtíž nám k vyřešení pořád ještě zbývá. Potřebujeme znát také absolutní stáří každé jednotlivé klimatické události, jinými slovy její věk vyjádřený konkrétním kalendářním datem („před kolika lety k oné události došlo“).

Absolutní datování ledovcového vrtu je možné provést několika odlišnými způsoby a navíc opět nezávisle ve vzorcích atmosféry a ve vzorcích zmrzlé vody. Bublinky vzduchu obsahují oxid uhličitý, který je přímo datovatelný radiokarbonovou metodou (ta ovšem funguje nanejvýš 50 000 let dozadu). Vedle toho můžeme odpočítávat roční přírůstkové vrstvičky ledu, které jsou často viditelné pouhým okem. Ovšem většinou jen do určité hloubky, protože níže už jsou setřeny ohromným tlakem nadloží. V tomto případě si můžeme pomoci hustě provedenými analýzami takových chemických vlastností ledovcového ledu (připomeňme, že takový led zdaleka není pouhá destilovaná voda!), které odrážejí sezonní proměny v cyklu jaro–léto–podzim–zima. Klasickou metodou je měření poměru mezi stabilními izotopy kyslíku a vodíku (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O a <sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H). Tyto poměry jsou ovlivněny teplotou kondenzace vody v oblačnosti. Ona teplota se pochopitelně mění v průběhu roku. Nebo můžeme proměřit obsah peroxidu vodíku (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), jehož vznik závisí na množství slunečního svitu. V tomto případě nezapomeňme, že se pohybuje v místech blízkých pólům, kde polovinu roku vládne polární noc a druhou polovinu polární den.

Uvedeným seznamem výčet možností absolutního datování ledovcových vrtů zdaleka nekončí. Pro ilustraci obecných principů však, domnívám se, plně postačí. Led akumulovaný v ledovcových tělesech je zdánlivě jednoduchý a neproblematický materiál. Je až neuvěřitelné, jak složitý systém to ve skutečnosti je a jak rozmanitá okna do minulosti nám dokáže otevřít (viz s. 438–446). ☞

PETR POKORNÝ

Dr. Petr Pokorný (\*1972)  
viz Vesmír 91, 308, 2012/5.