

Vostok

Úvahy o biologii podle dovcového jezera

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

S. T. Coleridge: Kublaj Chán¹

V druhém únorovém týdnu roku 2012 byla Česká republika sevřena v mrazivém objetí zimní studené vlny, nejtuzší 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 podtrženo: **Vrt antarktickým ledovcem dosáhl hladiny subglaciálního jezera Vostok.**

Podle dovcová 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 nevkrčila, ale na které byl zatím do značné míry krátký i lidský intelekt. Přitom 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) vyvednuta 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. Nález nejruznějších extremofilních organismů z posledních let v nás vyvolávají opodstatněnou naději na nález 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.

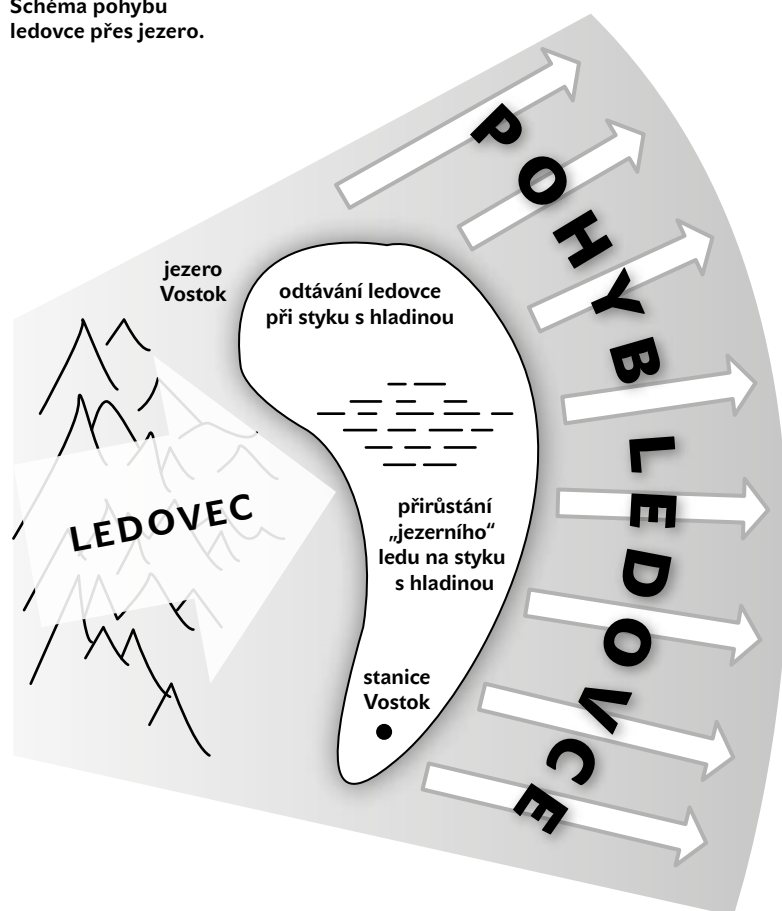
řadě prokaryotických organismů by nedělalo sebemenší problém přežít zde v neaktivních dormantních stádiích. Kromě toho mnoho z nich dokáže aktivovat i za teplot okolo $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, někteří snad i při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teoretické limity nám známých extremofilů z hlediska 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 nemusejí být nijak mimořádné a na první pohled odlišné od těch z antarktického povrchu. Rada expertů upozorňuje, že evoluce prokaryot je velice pomalá. Vždyť například miliardy let staré prvohorní zkamenněliny 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 ne jeden 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. Příkladně v ledu se však nacházejí ve velice malých koncentracích. Asi nejzajímavější je přítomnost *β*-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 neobvykle zajímavá eventualita.² 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 přítomny 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 výzkumníci postavili 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 „pouštějí“ 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 třetíhroní 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 25 miliony let.

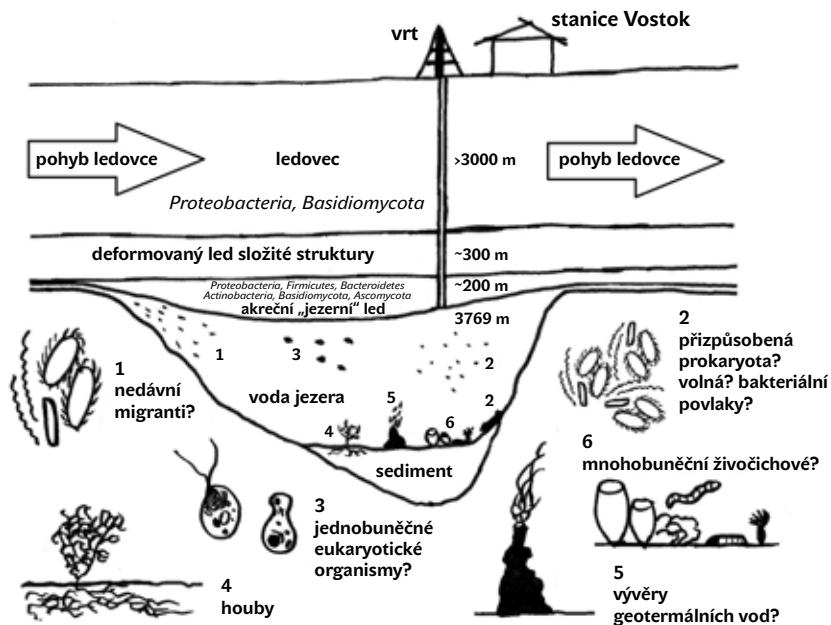
Očekává se, že voda jezera má asi $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (nezmrzne kvůli enormnímu tlaku) a je mimořádně nasycená atmosférickými plyny – zejména kyslíkem a dusíkem – a to až na hodnotu padesátinásobně vyšší, než jakou mají jezera povrchová. Možná stratifikace jezera a proudy způsobující míšení, 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 vostočských 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 výzkumníci 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 výzkumníků mimořádně mazaný přístup, jak přítomnost hub otestovat. Uvědomili si, že jak ledovec nad jezerem pomalu teče, je do jeho spodní strany postupně vtačována 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 stopkovýtusné houby. V jezerním ledu také převažovaly houby stopkovýtusné, ale vyskytovaly se zde i vřeckovýtusné; 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 „řas“ 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 otevřená.



Příčný řez jezerem a nadložím.

jezera se nachází velmi různorodé společenstvo jednobuněčných prokaryot a eukaryot.

Nejpřitažlivější 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 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Největší překážkou je nedostatek živin. Je pravda, že pokud bychom uvažovali o Vostoku jako o homogenním prostředí, můžeme existenci mnohobuněčných živočichů (přínejmenším 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 vířnících, možná i o některých korýších, živočišných houbách, žahavcích, mechovkách, želvuškách a dalších malých a na energii náročných organismech. Jisté je, že by museli projít značnými adaptacemi na odlišné a pro ně nevhodné 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 přínejmenším některé – existence jezera před zaledněním, nepřepřepování 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 nezatelným tempem zdánlivě nekonečná podhoubí mrazuvzdorných hub a v pomalém proudu vlají závěsy jejich plodnic, nebo zde kypí životem bohatá společenstva všech zmíněných, na kterých se pasou mnohobuněční živočichové navrátivší se ke způsobu života svých dávných předků; ať již platí cokoli, máme se při průzkumu Vostoku v následujících letech rozhodně na co těšit.

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>