



II. Exploze věd o kvartéru ve 20. století

O čtvrtém řádu a o tom, jak se nakonec, neřád, zkomplikoval

PETR POKORNÝ

„Když jsem v kosmické lodi obletěl Zemi, uviděl jsem, jak je naše planeta krásná. Lidé, chraňme a rozmnožujme tuto krásu, ale neničme ji!“ *To jsou údajně slova sedmadvacetiletého Jurije Alexejeviče Gagarina bezprostředně poté, co se 12. dubna roku 1961 vrátil z oběžné dráhy. Naše planeta na sebe poprvé hleděla lidskýma očima. Velká část lidstva poprvé začala vnímat Zemi jako „svoji“ planetu. Získala k ní rázem skoro mateřský, ochranný vztah. Je to přinejmenším zvláštní situace. Sama Země byla odjakživa onou matkou. Ochraňovala a dávala obživu. Teď jako by se role obrátily. V biologii se záhy vynořila (přesněji řečeno znovu vynořila) metafora planety jako živého superorganismu, která je jádrem dodnes populárního konceptu Gaia Jamese Lovelocka a Lynn Margulisové. V ekologii tehdy vrcholil ekosystémový přístup,*

který chtěl vidět v biologických společnostech dokonalé týmy organismů usilovně pracující ve prospěch celku. Že by reakce na ekonomický boom „zlatých šedesátých“ a další z příkladů sociomorfního modelování v biologii?

Pro tehdejší způsob myšlení je charakteristická jedna z původních (1979) Lovelockových definic „živé planety“ jménem Gaia: „komplexní jednotka zahrnující biosféru, atmosféru, oceány a půdy planety Země; celek tvořící zpětno-uzávný či kybernetický systém, který aktivně vyhledává optimální fyzikální a chemické prostředí pro udržení života na planetě.“ Přidržíme-li se konceptu Gaia, máme snad právo ptát se, je-li kvartérní historie naší planety opravdu v souladu s právě uvedenou definicí. Jako každá živá bytost má jistě svou unikátní historii, během které projevuje cosi jako schop-

Dr. Petr Pokorný (*1972) viz
Vesmír 89, 164, 2010/3.

←← 1. Vrcholové plató Děčínského Sněžníku v zimě. Tvary pískovcových skal dokládají intenzivní mrazové zvětrávání v průběhu kvartéru. Po rozsáhlé emisní kalamitě v 70. a 80. letech zarostl vrchol stolové hory březovým náletem, který imituje situaci na samém počátku holocénu, kdy začala postupná sukcese směrem k uzavřenému listnatému lesu. Všechny snímky na s. 242–247 © Petr Pokorný, není-li uvedeno jinak.

nost tvůrčím způsobem reagovat na změny vnucené jí vnějšími okolnostmi. Dějiny těchto reakcí bychom měli s použitím vhodných nástrojů být schopni přečíst a uspokojivě popsat. Jak uvidíme, rozvoj kvartérní vědy v druhé polovině 20. století takové nástroje poskytl v míře víc než hojně. Až nám z toho nakonec začalo být maličko horko...

Pátrání po příčinách kvartérního cyklu

V polovině 20. století se začala rýsovat koncepce velkého množství kvartérních klimatických cyklů různé intenzity a různého trvání, jinými slovy koncepce polyglacialistická. Opět přišla doba, kdy ze zaprášených šuplíků dějin začaly vypadávat polozapomenuté teorie. Tentokrát to byly zejména výpočty astronomů, které se optikou donedávna panujícího kvadriglacialismu jevily jako zcela irelevantní.

Již na konci 19. století se objevila teorie o regulačním působení změn koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře (význam CO_2 jako skleníkového plynu rozpoznal r. 1896 švédský fyzik Arrhenius, který v této souvislosti dokonce spekuloval o vlivu průmyslových emisí na celkové oteplování planety). Rovněž představa o astronomických příčinách ledových dob je překvapivě stará. Jejím autorem je francouzský matematik Joseph Adhemar (1797–1862) a nezávisle na něm skotský učenec James Croll (1821–1890). Croll začínal jako hoteliér a pojišťovací agent. Amatérsky se vzdělával ve fyzice a astronomii. V roce 1864 navázal korespondenci se samotným Charlesem Lyellem nad otázkami klimatických změn a jejich příčin. Přední geolog byl Crollovým vědeckým zápallem stržen do té míry, že mu zařídil placené místo ve státní organizaci pro geologický průzkum (*Geological Survey of Scotland*). Tam Croll získal další významné kontakty a ty mu dopomohly ke konečné formulaci jeho astronomické hypotézy. Vyšel z výpočtů francouzského astronoma Urbaina Leverriera z r. 1846, které popisovaly průběžné změny ve tvaru oběžné dráhy Země kolem Slunce a změny v náklonu zemské osy vůči rovině ekliptiky. Příčinou je gravitační vliv planet, především hmotného Jupitera. Tyto vzorce použil Croll k výpočtu změn orbitálních parametrů za poslední tři miliony let, přičemž podrobně popsal jejich periodické chování. Za klíčovou považoval především excentricitu. Čím oválnější je tvar oběžné dráhy, tím větší jsou rozdíly mezi příjmem sluneční energie v různých ročních obdobích. Taková konstelace, která způsobí prodloužení zimní sezony, může podle Crolla zavinit nahromadění sněhu ve vysokých zeměpisných šířkách. Zvýšené albedo (odraz slunečního záření zpět do kosmického prostoru) může za daných podmínek účinkovat

jako pozitivní zpětná vazba v procesu ochlazování. Výsledkem bude další zesílení efektu orbitálních změn a počátek růstu ledovců v oblasti zemských pólů. Jinými slovy nástup ledové doby.

Přestože se Crollovy i Adhemarovy výpočty časem ukázaly jako nepřesné, otevřely cestu bádání o příčinách ledových dob. Cestu, která zůstala po dalších padesát let téměř bez následovníků. Ovšem až na jednu významnou výjimku. Tou je srbský inženýr a matematik Milutin Milanković (1879–1958), který studoval civilní inženýrství ve Vídni a v jedné soukromé firmě se zabýval konstrukcí přehrad a mostů s použitím tehdy revolučního materiálu – železobetonu. V roce 1909 mu nabídla Bělehradská univerzita místo vedoucího katedry aplikované matematiky. Funkce mimo jiné zahrnovala řešení problémů z oboru nebeské mechaniky. Tehdy se Milanković začal zabývat teoretickým a na první pohled poněkud odtazitým problémem – vlivem slunečního záření na planety sluneční soustavy.

Když r. 1914 vypukla válka, byl čerstvě ženatý Milanković internován do Uher a následující léta strávil v nuceném exilu v Budapešti. Tam měl dostatek času na zdlouhavé astronomické výpočty, jejichž výsledky zveřejnil po válce. Zpočátku jimi vzbudil pouze okrajovou pozornost. První významnější reference se objevila v paleoklimatologické knize V. Köppena a A. Wegenera vydané r. 1924. Na základě starých Crollových úvah se Milanković začal detailněji zabývat vlivem průběžných změn astronomických parametrů na dlouhodobý vývoj klimatu na Zemi. Výpočty neustále zdokonaloval a uprostřed další světové války (v roce 1941) je rozsáhle publikoval v knize s názvem *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem (Kánon oslunění Země a jeho aplikace na problém ledových dob)*. K vysvětlení klimatických změn použil čtyři nezávislé kosmické parametry, které dnes nazýváme parametry Milankovićovými (Vesmír 74, 488, 1995/9).

Teorie Milutina Milankoviće zpočátku vzbuzovala značnou nevoli mezi meteorology, kteří namítali, že popisované proměny orbitálních parametrů jsou příliš slabé na to, aby se vůbec mohly projevit formou klimatických změn. Předpověděný rytmus změn klimatu se navíc vůbec nehodil do kvadriglacialistických představ, které tehdy ovládaly kvartérní geologii.

Jak stará je geologická současnost?

Názory první poloviny 19. století na otázku stáří Země a jednotlivých geologických epoch vězely v tradičních mezích biblické chronologie a operovaly v řádech tisíců, nanejvýš des-

2. Jádru ledovcového vrtu GISP 2 ze středního Grónska z hloubky 1837 metrů, která odpovídá polovině posledního glaciálu. Zřetelně jsou vidět roční přírůstkové vrstvy. Bílé zbarvení pochází od vzduchových bublinek uzavřených v ledové hmotě. Tři kilometry dlouhý vrt pokrývá posledních 100 000 let. Zdroj: Wikimedia Commons.





3. Plošiny stolových hor ve venezuelské Guyaně byly donedávna pokládány za jeden z nejstabilnějších ekosystémů naší planety. Nedávné výzkumy ale ukázaly, že ani jim se nevyhnuly radikální změny klimatu v průběhu kvartéru. V maximech glaciálních výkyvů trpěly tamější populace endemických rostlin a živočichů suchem, což způsobilo fragmentaci populací a pravděpodobně i urychlení evolučního procesu.

titisíců let (6000 let byl tehdy nejběžnější údaj získaný na základě biblického výkladu). Převratnost a zároveň problematičnost Lyellova „uniformitarismu“ spočívala zejména v předpokladu dlouhého geologického času, který byl nezbytně nutný k tomu, aby se výsledky pomalých geologických procesů vůbec mohly projevit. Jakým způsobem ale takový předpoklad testovat? Je vůbec možné měřit geologický čas? S relativním časem (jestli je nějaká událost starší či mladší než událost jiná) by to ještě jakžtakž šlo, k tomu máme například stratigrafický princip, ale jak změřit zpátky do minulosti čas absolutní (kolik let od oné události uplynulo)? Jistá šance spočívala v každoročních cyklech, které jsou provázány vznikem rozlišitelných přírůstkových vrstviček, ukládaných do nějakého přírodního „archivu“. Takovou povahu mají třeba letokruhy opadavých dřevin. Jenže stromy žijí krátce. Delší záznamy s roční periodicitou mohou vznikat za zcela mimořádných okolností v podobě sedimentů některých jezer. Na nich je občas skutečně možné spočítat velké množství různě tmavých přírůstkových vrstviček (lamin). Jenže takové sedimenty jsou nesmírně vzácné.

Zásadním způsobem změnil situaci až objev radioaktivity v osmdesátých letech 19. století. Roku 1906 navrhl Ernest Rutherford postup, při kterém může být změřen geologický čas na základě radioaktivního rozpadu uranu přítomného v horninách. Už první výpočty stáří Země, provedené na základě stanove-

ní množství radia v zemském plášti, ukázaly překvapivě vysoký věk planety, a sice v řádu miliard let. Ve třicátých letech se rozvinuly metody hmotnostní spektrometrie, které umožnily „vážit“ jednotlivé atomy přítomné ve zkoumaných vzorcích. Zároveň byly objeveny rozpadové řady uranu a thoria, jejichž radioaktivní meziprodukty mají různě dlouhé poločasy rozpadu. Byl navržen princip „radioaktivních hodin“.

V roce 1940 američtí fyzikové Martin Kamen a Sam Ruben objevili radioaktivní izotop uhlíku se čtrnácti nukleony v jádře (^{14}C). Jeho existence byla sice předpovězena o šest let dříve, ale nikdo jej zatím přímo nepozoroval. M. Kamen usoudil, že tento těžký, nestabilní uhlíkový atom neustále vzniká v atmosféře z všudypřítomného dusíku (^{14}N) pod vlivem kosmického záření. Napodobil tento proces v laboratoři, takže získal dostatečné množství ^{14}C k tomu, aby mohl stanovit poločas rozpadu – došel k číslu 5700 let.

Z těchto zjištění vyšel chemik Willard F. Libby, rovněž Američan, přičemž učinil a potom experimentálně ověřil následující úvahu: Rostliny během fotosyntézy zabudovávají do svých tkání atomy uhlíku přítomné v molekulách atmosférického oxidu uhličitého. Některé z těchto molekul nesou radioaktivní ^{14}C . Jakmile rostlina odumře, proces fotosyntézy samozřejmě ustane. Přesně v tomto okamžiku jsou „radioaktivní hodiny“ spuštěny. Pak už těžká jádra atomů ^{14}C přítomná v rostlinné tkáni pouze ubývají radioaktivním rozpadem

(po uplynutí 5700 let – jednoho poločasu rozpadu – jich tam zbude polovina). To samé platí o organických materiálech živočišného původu, protože všichni živočichové se přímo či zprostředkovaně (skrze jiné živočichy, které požívají) rostlinami živí.

Z právě řečeného vyplývá, že pokud dokážeme ve vzorku jakékoliv organické látky stanovit poměr stabilních (^{12}C a ^{13}C) a nestabilních (^{14}C) atomů uhlíku, můžeme určit absolutní stáří takového materiálu. Nejsnazší způsob jak to provést je sledovat produkty radioaktivního rozpadu ^{14}C čili změřit intenzitu, s jakou vzorek radioaktivně září (rovněž vy, vážený čtenáři, jste takovým radioaktivním zářičem). Zbývalo ještě vyřešit nemalé technické problémy spojené s přípravou a měřením vzorků, a pak ověřit fungování metody na organickém materiálu známého stáří. Libby koncem čtyřicátých let techniku konečně zvládl, ověření provedl, a ono to skutečně fungovalo! Nejdříve metodu ověřoval na historicky datovaných nálezech z egyptských hrobek. Ukázalo se, že reálné je použití radiokarbonového datování u vzorků starých méně než 50 000 let (přibližně 10 poločasů rozpadu).

A tak se začalo naveliko datovat. Výsledkem bylo jedno senzační zjištění za druhým: Tvůrci nádherných jeskynních maleb (paleolitické Lascaux bylo teprve čerstvým objevem) žili před více než 15 000 lety; první zemědělské osady vznikaly na Předním východě už před 9000 lety. Seznam radiokarbonově datovaných nálezů, situací a vrstev se raketovou rychlostí rozšiřoval a vznikaly nové a nové laboratoře. V roce 1960 byla Libbymu udělena Nobelova cena. Situace s radiokarbonovým datováním se později malinko zkomplikovala, jelikož se nepotvrdil původní předpoklad, že relativní obsah izotopu ^{14}C v atmosféře zůstává dlouhodobě konstantní. Může za to proměnlivá sluneční aktivita. Nepříjemnou situaci se nakonec podařilo vyřešit zavedením kalibrace neboli korekce časových údajů na podkladě křivky popisující vývoj atmosférických koncentrací ^{14}C během minulosti. První takovou křivku se podařilo získat radiokarbonovým datováním jednotlivých letokruhů dlouhověkých borovic (*Pinus aristata*, *P. longaeva*), které rostou na jihozápadě Spojených států a mohou se dožívat stáří téměř 5000 let.

Od šedesátých let do současnosti byla vyvinuta řada dalších metod absolutního datování geologických a archeologických situací. Mají různý dosah, různou přesnost a jsou použitelné v rozmanitém kontextu. Radiokarbonová metoda ale dodnes zůstává klíčová pro datování posledních 50 000 let. Tento čas zahrnuje období od zhruba poloviny posledního glaciálního výkyvu po současnost, čili pouze poslední z mnoha globálních klimatických cyklů, které naši planetu postihly v průběhu uplynulých 2,6 milionu let.

Technologie poznání minulosti

Jak jsme již jednou uvedli, skutečný průlom ve studiu čtvrtohor nastal s výzkumem sou-

vislých sprašových sledů a rozšířováním jejich vztahu s říčními terasami. Od padesátých let se ovšem pozornost čím dál víc soustředovala na vyspělou technologii hlubokomořských vrtů. Díky nepřetržitému ukládání sedimentu na mořském dně (dnes rychlostí zhruba 2 cm za 1000 let; v glaciálech to byl

4. Nahoře: Nejvyšší horou Bolívie je 6542 metrů vysoká sopka *Nevado Sajama*. Přestože leží v extrémně suché oblasti na okraji pouště *Atacama*, tvoří se na jejích svazích ledovec. Vrt tímto ledovcem zachycuje období posledních 25 000 let a umožňuje detailní pohled do klimatické historie jinak málo prozkoumaného území. Ukazuje se, že na vrcholu poslední ledové doby bylo sucho ještě větší než dnes. Na začátku holocénu naopak přišlo výrazně vlhké klima. Počátek zvlhčení časově odpovídá vzestupu hladiny jezera Titicaca, které ve středním holocénu zaplavilo větší část náhorní plošiny. Je to obdoba událostí na Sahaře, na jiném místě, ale zhruba ve stejném čase.

5. Dole: Výzkumy kvartérní minulosti ve střední Evropě jsou na první pohled méně heroické než v pouštích a na ledovcích, což nijak neumenšuje jejich význam. Při vrtání profilu jezerními sedimenty v Českém krasu se sešlo několik osobností, které zásadním způsobem ovlivnily vývoj kvartérní vědy: Vojen Ložek – významný badatel v oboru sprašové stratigrafie a průkopník biologických přístupů k čtvrtohorní minulosti; Herbert E. Wright – jeden ze zakladatelů paleolimnologie a organizátor moderního výzkumu severoamerického kvartéru; Brigitta Ammann – švýcarská paleobotanička, která stála u zrodu moderní kvartérní paleobotaniky.





6. Výzkum pískovcových převisů v druhé polovině devadesátých let přispěl významnou měrou k vzájemné komunikaci mezi našimi archeology, geology a biology. Pod převisy se podařilo nalézt pozůstatky staroholocenního osídlení střední doby kamenné (mezolitu) a spolu s nimi řadu dokladů o vývoji přírodního prostředí. Na základě vyhodnocení nalezených zbytků měkkější fauny formuloval Vojen Ložek hypotézu o místním environmentálním kolapsu. Mělo k němu dojít v pozdní době bronzové, tedy v závěru středního holocénu, a měl se na něm významnou měrou podílet člověk. Paleobotanické doklady dnes rozsáhle potvrzují platnost takových úvah, i když kauzalita procesů vedoucích k příslušným změnám je prozatím spíše nejasná.

zhruba dvojnásobek) je možné získat souvislý záznam, sahající třeba až hluboko do třetihor. Můžeme v něm číst buď biologickými metodami (studovat třeba změny podílu teplotních a chladnomilných mořských mikroorganismů), nebo s použitím různých geochemických nástrojů. Kromě dominantních schránek mořských organismů obsahují hlubokomořské sedimenty také další složky: chemické sraženiny, jemné jíly připravené řekami a tajícími ledovci a prach vyfoukaný z povrchu souše, vychrlený sopkami, nebo vzniklý rozpadem meteoritů (posledně jmenovaná složka není kupodivu zanedbatelná; každoročně přibude na naši planetu 200 000 tun meteorického materiálu).

Zásadním paleoklimatologickým indikátorem v hlubokomořských vrtech se ukázaly být změny relativního podílu těžkého izotopu kyslíku ($\delta^{18}\text{O}$). Autorem objevu je Ital Cesare Emiliani (1922–1995), dnes považovaný za zakladatele paleoocéanografie. Emiliani pracoval ve Spojených státech a v padesátých letech byl u toho, když se začaly provádět první hlubokomořské vrty. Už tehdy se vědělo, že poměry dvou stabilních izotopů kyslíku ^{18}O a ^{16}O v mořské vodě jsou funkcí její teploty a paralelně k tomu také celkového objemu ledu na planetě. Zvýšení teploty mořské vody a zvětšení objemu ledu vedou k růstu poměru ^{18}O ku ^{16}O .

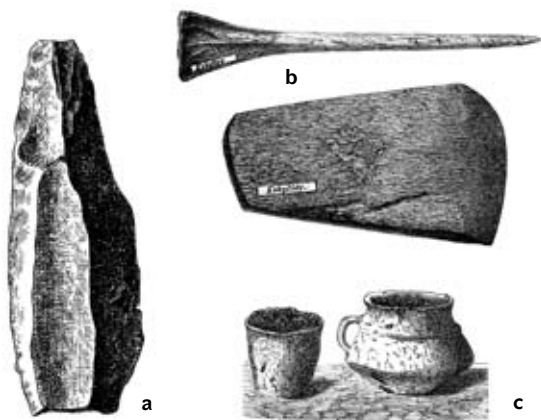
Emiliani využil nápad, že informace o vývoji těchto poměrů by mohly být uloženy v mikroskopických schránkách planktonních dírkovců obsažených v hlubokomořských sedimentech. Skutečně se mu jejich analýzou podařilo získat křivku s nápadně periodickým průběhem odrážejícím střídání glaciálů a interglaciálů. Emiliani předpokládal, že 60 % tohoto signálu padá na vrub vlivu teploty a zbývajících 40 % souvisí se změnami globálního objemu ledu. Zarazilo ho ovšem, že v jednom hlubokém karibském vrtu objevil těchto cyklů sedm a v ještě hlubším vrtu pacifickém dokonce patnáct. Tehdy si on a jeho kolegové poprvé jasně uvědomi-

li, že koncepce čtyř kvartérních glaciálních cyklů definitivně patří minulosti.

S tímto epochálním objevem pokračoval vývoj technologie hlubokomořských vrtů zvýšeným tempem. V roce 1976 publikovali američtí klimatologové J. D. Hays, J. Imbrie a N. J. Shackleton studii založenou na vyhodnocení jednoho zvláště dlouhého atlantického vrtu. Potvrdila platnost Milankovičových výpočtů pro vysvětlení načasování a intenzity kvartérních klimatických změn v průběhu posledních 450 000 let. Byla to velká syntéza poznatků, které se souběžně rodily zhruba jedno století. Začalo být zřejmé, že shodným rysem všech hlubokomořských záznamů je průběžná přítomnost klimatických oscilací s amplitudou přibližně 23, 40 a 100 tisíc let, tj. střídání glaciálů a interglaciálů. Nejenže to přesně odpovídá původním Milankovičovým výpočtům, ale navíc to definitivně potvrzuje polyglacialistický model čtvrtohor, neboť za posledních 2,6 milionu let se můžeme dopočítat mnoha (více než padesáti) glaciálních a interglaciálních výkyvů. Přitom se jejich intenzita směrem k dnešku neustále prohlubuje. Není od věci zdůraznit, že hlubokomořské záznamy velice dobře odpovídají kontinentálním sprašovým sériím, jak r. 1978 dokázal Jiří Kukla.

Syntézou velkého množství geofyzikálních, paleontologických, oceánografických a biologických poznatků, opřenou o souvislé sekvence hlubokomořských a sprašových záznamů, se v sedmdesátých letech konečně podařilo podchytit kvartérní problematiku v plné šíři a komplexnosti. Polyglacialistický model ukazuje, že rovnováha mezi glaciálním a interglaciálním režimem naší planety je v dlouhodobé perspektivě mnohánásobně vratná a zároveň nesmírně křehká. I malé změny v celkovém objemu a rozložení tepla přicházejícího od Slunce dokážou vyvolat dalekosáhlé klimatické změny. Ve vývoji kvartérní vědy tak konečně přichází okamžik, kdy si můžeme seriózně položit následující otázky: Proč Země někdy reaguje tak nečekaně dramatickým způsobem a jindy nikoliv? A jak je možné, že se doby ledo-

7. a – Nůž z pazourku nalezený v náplavu Labe u Děčína; b – přioštrřená kůstka a klín kamenný nalezený v hrobu u Kobylis; c – hliněné nádoby na ruce hnětené z hrobu u Kobylis. Ilustrace z Vesmíru 5, 56, 1876/5.





vé začaly projevovat až před dvěma a půl milionem let, na hranici třetihor a čtvrtohor? Vždyť k cyklickým proměnám Milankovičových parametrů muselo docházet nepřetržitě po celou dobu existence naší planety. To jsou otázky zásadní a poprvé nás vedou od pouhého popisu do složitěho světa vztahů. Na nejjednodušší úrovni to mohou být třeba vztahy příčinné (kauzální). S nimi bývá potíž (jak víme už od Aristotela), ale pro náš účel postačí, když si je rozdělíme na *příčiny vzdálené (ultimátní)* a *blízké (proximátní)*. Jedna věc je celkový objem slunečního tepla (příčina vzdálená). Ale jakým způsobem je toto teplo distribuováno v rámci planety (příčina blízká)? Tato složitá otázka vévodí kvartérnímu výzkumu od sedmdesátých let uplynulého století vlastně až do současnosti.

Důležitou roli v distribuci slunečního tepla hrají oceány, „ústřední topení“ planety, nazývané *termohalinní oceánský výměník* (Vesmír 77, 367, 1998/7). Je to systém hlubinných i povrchových proudů, které transportují různě teplou a různě slanou vodu, a tím ovlivňují klima v různých částech Země. S oceánským výměníkem je rozsáhle propojena cirkulace atmosférická. Činnost systému závisí na řadě okolností a v jistých situacích se může jeho chování prudce změnit. Důsledkem je náhlá změna celoplanetárního klimatického režimu – přechod doby ledové v meziledovou, nebo naopak.

Dobře, ale kdy to celé začalo a proč vlastně? V tomto okamžiku se konečně mohla vynořit takřka zapomenutá teorie kontinentálního

8. Kvartérní klimatické výkyvy mají největší dopad na oblasti kolem obou obrátek. Převodní pákou těchto změn je letní monzun, jehož síla závisí na množství dostupné sluneční energie. Řídí se proto změnami Milankovičových parametrů. Při výzkumech v severní Africe se setkáváme s paradoxem „zelené Sahary“, tj. vlhkého období, které se kryje s délkou trvání starší poloviny holocénu. Dokonce i střední pás dnešní pouště tehdy ovlivňovaly každoroční monzunové srážky. Ještě před 6000 lety tu byla bohatá savana s mnoha jezery, u kterých sídlili neolitické pastevci. Jak monzun slábl, celá oblast se změnila v poušť a nastoupila větrná eroze, která začala hlodat v měkkých sedimentech bývalých jezer. Dnes z jejich původního rozsahu a mocnosti zbývají jenom nepatrné zbytky v podobě *jardangů*, které jsou vidět na fotografii pořízené z místa ležícího východně od náhorní plošiny Gifl Kebir.

driftu, kterou v r. 1915 formuloval německý geolog Alfred Wegener (1880–1930). Domyslel ji krátce předtím v nemocnici, když se zotavoval z válečného zranění. Tak jako jiní před ním si povšiml komplementárního tvaru východního pobřeží Jižní Ameriky a západního pobřeží Afriky, ale vysvětlil je zcela originálním způsobem na základě analýzy fosilních nálezů. Stal se tak autorem teorie globální deskové tektoniky, která se značným zpožděním ovlivnila téměř celou geologii a uvažování o Zemi vůbec. Podle ní je naše planeta neustále se proměňující skládačkou z litosférických desek, které do sebe všelijak narážejí, stmelují se, vrásní a potom se zase rozpadají. Velice pomalu, samozřejmě. Sám Wegener se všeobecného přijetí svých představ bohužel nedožil. Roku 1930 odjel do Grónska budovat zimní meteorologickou stanicí. Zmizel na cestě od skupiny spolupracovníků, kterým měl přivést zásoby pro budovanou stanicí. Jeho zmrzlé tělo bylo nalezeno až během nadcházejícího polárního léta.

- Elias S. A.: *Encyclopedia of Quaternary Science*, Elsevier 2007
- Fejfar O.: *Žkamenělá minulost*, Albatros, Praha 1989
- Fridrich J.: *Ecce Homo. Svět dávných lovců a sběračů*, Krigl, Praha 2005
- Grapes R. H., Oldroyd D. R., Grigelis A. (eds.): *History of Geomorphology and Quaternary Geology*. The Geological Society of London, London 2008
- Horáček I.: Přírodní podmínky v pleistocénu. In: Kuna M. (ed.), *Archeologie pravěkých Čech 1. Pravěký svět a jeho poznání*, Archeologický ústav AV ČR, Praha 2007
- Nilsson T.: *The Pleistocene*, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1983
- Rádl E.: *Dějiny biologických teorií novověku*, díl I. a II., v redakci T. Hermann, A. Markoše a Z. Neubauera, Academia, Praha 2006

Desková tektonika kupodivu poskytuje také uspokojivé vysvětlení nástupu kvartérních ledových dob. Ukazuje, že zdrojem postupného ochlazování planety mohl být právě posun teplotně nestabilních kontinentů do vysokých zeměpisných šířek a následný vznik trvale podchlazených oblastí kolem pólů. Zároveň s tím probíhal zdvih středových oblastí euroasijské pevniny. Podstatná část největšího kontinentu se tak dostala do kilometrových výšek nad hladinou moře a stala se důležitým zdrojem sezonnosti klimatu a jedním z generátorů postupného ochlazování. Pokračující zdvih na většině velkých kontinentů zároveň přispíval ke klimatickému vysušování vnitřních oblastí, a tím k zeslabení celoplanetární schopnosti vyrovnávat periodické změny v celkovém objemu sluneční energie a jejím sezonním rozdělení. Milankovičovy oscilace tak na přechodu třetihor a čtvrtohor postupně získaly charakter střídání glaciálů a interglaciálů a o řád jemnějších stadiálů a interstadiálů.

Vraťme se ke geologickým záznamům. Velodůležité hlubokomořské vrty mají přeci jenom několik nedobrych vlastností. Je to zejména malé rozlišení způsobené nízkou akumulací rychlostí a v neposlední řadě i fakt, že zachycují situaci na mořském dně, tedy ve zvláštním, vyhraněném prostředí s poměrně vysokou setrvačností (nízkou reakční rychlostí). Bylo nutné hledat jiný zdroj informací. Vzpomeňme opět na Wegenera a na jeho tragickou výpravu do Grónska. Ještě před svou smrtí stihl pořídit 25 metrů dlouhý ledovcový vrt, první svého druhu. Předznamenal další revoluci v kvartérním výzkumu. Pokusy se strojovým vrtáním v ledovcích se začaly dělat koncem padesátých let. Kupodivu je to však ještě větší technický oříšek než vrty hlubokomořské a různé praktické problémy se podařilo uspokojivě zvládnout až na konci let osmdesátých.

Nejhlubší vrty zasahují víc než 3 km hluboko do ledové masy. Byly získány v posledních deseti letech v Antarktidě (starší *Vostok* a nedávný *Dome C*). *Dome C* poskytuje souvislý záznam téměř milion let do minulosti a přes určité problémy s chronologií je celkem podrobný. Srovnatelně hluboké vrty grónským ledovcem jsou sice podstatně mladší (vrty GRIP a GISP2 zasahují 100 000 let do minulosti), ale díky vydatnějším míst-

ním srážkám a vysoké akumulací rychlosti poskytují mnohem kvalitnější chronologii. V horních částech se dokonce dají počítat každoroční přírůstkové vrstvičky.

Nejdůležitější vlastností ledovcových vrtů je jejich použitelnost k velkému množství různých souběžných analýz. Jejich výsledky umožňují rozkrývat vztahy mezi fungováním jednotlivých složek planetárního systému. Kyselost (pH) ledu například vypovídá o sopečné aktivitě. Obsah a charakter prachových částic o celkové prašnosti atmosféry a o zdrojových oblastech tohoto znečištění. Stejně jako v hlubokomořských sedimentech je i v ledu možné stanovovat obsah těžkého izotopu kyslíku ($\delta^{18}\text{O}$), a konstruovat tak dlouhodobé teplotní křivky. Obsah izotopu ^{10}Be je měřítkem intenzity kosmického záření, a tedy i výchozího množství energie přicházející od Slunce. Nejzajímavější vlastností ledu je jeho schopnost uchovávat vzorky dávné atmosféry v droboučkých bublinkách, jejichž složení je možné analyzovat plynovými chromatografy a hmotnostními spektrometry. Tak byla objevena úzká spojitost mezi atmosférickou koncentrací skleníkových plynů a globálními teplotami v průběhu glaciálně-interglaciálních cyklů, i v měřítku daleko jemnějším.

Dalším významným přínosem výzkumu ledovcových vrtů je objev nesmírně prudkých, a přitom krátkodobých klimatických událostí, které kupodivu nelze vysvětlit Milankovičovými cykly. V kvartérní minulosti nebyla výjimkou ani změna průměrné roční teploty (nutno upozornit, že nikoliv globální, ale té na povrchu ledovce v místě vrtu) o 12 °C a zároveň změna objemu srážek o 200 % v průběhu několika málo desítek let. K nejprudším výkyvům docházelo v průběhu glaciálních úseků. Očividně jde o výraz křehké nerovnováhy klimatického systému naší planety, přičemž podezření padá zejména na labilní charakter systému mořského proudění, které se mnohokrát „překlápělo“ mezi chladným stadiálním a teplejším interstadiálním režimem.

Krátce před pořízením prvních dostatečně spolehlivých ledovcových záznamů, které tento jev popisují (jsou to opět grónské vrty GISP2 a GRIP), zveřejnil mořský geolog Hartmuth Heinrich nález hrubozrnných valounů v severoatlantických hlubokomořských vrtech. V usazeninách starých 70 000 až 10 000 let našel celkem šest takových vrstev. Vysvětlil je jako materiál transportovaný ledovými krami odlomenými ze severského ledovcového štítu. Pozdější výzkumy potvrdily Heinrichovu původní hypotézu popisující periodickou nestabilitu Laurentinského (severoamerického) ledovce, který čas od času uvolňoval na mořskou hladinu spousty ker. To znamená, že kontinentální ledovce ovlivňovaly oceánické proudění, a tím i klima, doslova na globální úrovni. Jejich rychlým táním se totiž uvolňovalo obrovské množství sladké vody, která zůstávala ležet na povrchu oceánu jako „deka“ (protože je lehčí než voda slaná a obě se spolu překvapivě špatně mísí), a tím dočasně zastavila činnost termohalinního oceánského výměníku.



9. Hroby z doby předhistorické neporušenou ornicí pokryté, jež v Kobyliších u Prahy objeveny byly. Ilustrace z Vesmíru 5, 29, 1876/3.

Složitost a mnohostrannost poznatků o kvartérní minulosti přímo volá po využití počítačového modelování. Využívá se v paleoklimatologii a při studiu biologických, hydrologických či společenských reakcí systému na minulé klimatické změny. Výsledky modelů odladěných v situacích známých z minulosti hrají čím dál větší roli v předpovídání budoucího vývoje. Tím už se přímo dotýkáme jevu, pro který se v poslední době vžil název „globální oteplování“.

Člověk nad Slunce mocnější?

Ukazuje se, že posledních zhruba 10 000 let je v rámci běžných „čtvrtohorních zvyklostí“ nebyvale klimaticky stabilních. Danému období někdy říkáme „postglaciální“, jako bychom tím chtěli naznačit, že doby ledové už jsou jednou provždy za námi. Snad je to dědictví původního monoglacialismu. Bude proto lepší hovořit o *holocénu* a mít přitom na mysli, že tato současná kvartérní epocha s vysokou pravděpodobností představuje pouze jeden v řadě interglaciálů. *Pouze?* Tady raději pozor! V průběhu holocénu se totiž odehrál bezprecedentní rozvoj lidského rodu. Na jeho úplném začátku se jistá část lidstva trvale usadila a začala se žít zemědělstvím. Ve světě pak porůznu vznikaly složité společnosti a s nimi města, literární kultura, vyspělá náboženství, filozofie, věda...

Holocén je tudíž interglaciál výjimečný nejen z lidského pohledu. Mnozí se lidstvo začalo postupně ovlivňovat svoje prostředí – nejdříve na lokální, pak doslova na globální úrovni. Přední americký paleoklimatolog William F. Ruddiman, který se v posledních letech hodně zabýval počítačovým modelováním, se v knize s názvem *Plows, plagues & petroleum* (2005) dokonce snaží dokázat, že lidstvo ovlivňovalo klima celé naší planety už před 5000 lety, kdy se masově šířilo zemědělství. Nebýt tohoto působení, dnes bychom prý pomalu měli zakoušet začátek dalšího nastupujícího glaciálu.

Ať už to je, či není pravda, skutečností zůstává, že zmasovění lidstva a všech jeho projevů směrem k dnešku děsivě narůstá. Posledních zhruba 200 let lidí na Zemi exponenciálně přibývá. A exponenciální je i nárůst problémů, které se aktuálně zdají eskalovat, aniž by bylo v dohledu řešení. Šíří se obava, že v sázce je dokonce samo přežití lidstva. Dokáže se k tomu nějak vyjádřit kvartérní věda, či spíše filozofické tázání, které na jejich výsledcích může být postaveno? Jistěže má povinnost se k této otázce nějak přihlásit a pochopitelně to také dělá. Vždyť kde jinde vzít odpovídající referenční systém než právě v kvartérní minulosti? Časové měřítko vědy o čtvrtohorách se pro to hodí přímo ideálně.

Například data z nejdelšího ledovcového vrtu *Dome C* v Antarktidě popisují vývoj atmosférických koncentrací dvou nejdůležitějších skleníkových plynů – oxidu uhličitého a metanu – v průběhu osmi posledních glaciálně-interglaciálních cyklů. Kolísání těchto koncentrací je s kvartérním klimatickým cyklem těsně provázáno a očividně mezi nimi fun-

guje nějaký příčinný vztah. Všeobecná shoda ovšem nepanuje v jedné klíčové otázce: Který z obou pozorovaných jevů je vlastně příčinou a který následkem? Velice rádi bychom znali odpověď kvůli možnému vlivu průmyslových exhalací na globální oteplování planety. Na problém upozorňoval (jak si možná vzpomínáte) už koncem 19. století Arrhenius. Dnešní koncentrace obou skleníkových plynů je kvůli emisím podstatně vyšší než kdykoliv předtím v průběhu kvartéru. V případě metanu více než dvojnásobná.

Reakce každého komplexního systému jsou ovšem rovněž komplexní. Každý takový systém zpravidla vykazuje větší nebo menší sebedržovací schopnost (homeostázi). Ta působí značnou setrvačností při stavových proměnách. Klimatický systém naší planety v tomto směru není výjimkou. Vezměme pro ilustraci následující příklady z každodenní praxe. Když Slunce stojí v poledne nejvyšší na obloze, pochopitelně také nejvíce hřeje. Přesto budou maximální teploty vzduchu naměřeny až o několik hodin později, tak kolem třetí odpoledne. Na severní polokouli je nejvyšší příkon slunečního záření každoročně 21. června. Přesto je nejteplejší částí roku druhá půlka července. Nebo vezměme třeba takový oceán. Jeho povrchovým vodám to trvá několik měsíců, než se plně prohřeje. Zamrzlá hladina polárních moří reaguje se zpožděním několika let až desetiletí. Hluboké oceánské vody mají setrvačnost staletou. Velká ledovcová tělesa třeba až v řádu tisíců let.

Tohle jsou úplně jednoduché příklady. Zkusme ale uvažovat planetu Zemi jako celek! Možná si se skleníkovými plyny zaděláváme na trpké ovoce, které budeme sklízet za dlouhá desetiletí, aniž to budeme schopni jakkoliv změnit. Znalost kvartérní minulosti nám k ilustraci podobných jevů poskytuje nepřehlednou řadu varovných příkladů. Právě proto je pro nás tolik důležitá – možná přímo životně.

S přehledem vývoje kvartérní vědy jsme to nakonec dotáhli až do současnosti. I při stručném podání je snad dostatečně zřejmé, že každá etapa má svou vlastní, jedinečnou, historickou pravdu. Že to není jenom série různých pošetilostí na cestě k jedinému pravému poznání – zrovna tomu našemu aktuálnímu. To by bylo zajisté absurdní zjištění! V průběhu dějin vědeckého poznání se neustále proměňují předešlým vše prostupující předpoklady v pozadí. Je těžké je exaktně postihnout, ale můžeme jim jednoduše říkat „duch doby“, „sociálně-kulturní kontext“ ap. Na nich v posledku nejvíce záleží, jakou z mnoha tváří se nám podaří ze světa vědeckými prostředky vydobýt. Takže je snad na místě otázka: Kde se to pro změnu ocitáme dnes? Vypadá to, že „duch šedesátých let“ nastíněný v úvodním odstavci už konečně zmizel v nenávratnu. Náš dnešní svět (rozuměj *svět v naší mysli*) je v každém případě nejistější než kdykoliv předtím. Dříve laskavá *Gaia* jako by na nás teď výstražně vrčela a v ústech původně nastavených k polibku s úlekem vidíme ostré řezáky. ☞

Abstract: The Quaternary period and how it became even more complicated. Part II: Explosion of the knowledge in 20th century. By Petr Pokorný. Along with revolutionary discoveries in the field of Quaternary geology, theoretical inquiries expanded our insights into the causes of past glaciations. Taking some older concepts, J. Croll developed the theory of harmonically changing orbital parameters of the planet Earth that could lead to the successive alterations between warm and cold periods. Under the framework of dominant monoglaciation concept of that time, such theory could not find general acceptance. Some 50 years later, much more precise calculations of Milutin Milanković had by far the same fate. This was only after World War II when these theoretical models found their background in the factual data collected by geologists studying river terraces, loess sequences and deep ocean cores. Using multiple correlations between different sorts of sedimentary records, complemented by application of new techniques of their absolute dating, modern paradigm of multiple glaciations finally established in 60th and 70th of the last century. Together with rising appreciation of global-scale processes such development led to the emergence of the new global consciousness of our time.

*Poděkování:
Srdečné díky Ivanu Horáčkovi a Vojenu Ložkovi za bohatou inspiraci v průběhu zpracování tématu. Centru pro teoretická studia UK a AV ČR patří dík za možnost využívat prostředky výzkumného záměru MSM0021620845.*