

Zemské klima pod taktovkou kosmického rytmu

Když Johannes Kepler v r. 1609 formuloval své první dva zákony o pohybu planet okolo Slunce po eliptických drahách, netušil, že položí základ pro vyřešení jedné z největších klimatických záhad – vzniku rozsáhlého zalednění v nedávné geologické minulosti známé dnes jako pleistocén (2,58 milionu až 11 700 let před současností). Periodické změny oběžné dráhy Země, sklonu její osy a precese (úklonu osy a jejího rotačního pohybu po kuželové ploše) totiž zásadně ovlivňují množství a distribuci slunečního záření (insolace) dopadajícího na zemský povrch. Ve středních zeměpisných šířkách (mezi 30° a 60° severní a jižní šířky) mohou tyto změny způsobit až 25% odchylky v intenzitě dopadajícího záření. To hraje klíčovou roli zejména v obdobích s nízkou koncentrací oxidu uhličitého v atmosféře, kdy je skleníkový efekt oslabený. Tyto orbitální odchylky jsou způsobeny gravitačním působením ostatních těles sluneční soustavy, zejména Jupiteru, Marsu a Venuše, která periodicky deformují oběžnou dráhu Země z téměř dokonalého kruhu na mírnou elipsu a zpět. Jako první to na přelomu 18. a 19. století spočítali francouzští matematici Joseph-Louis Lagrange a Pierre-Simon de Laplace. V 19. století pak skotský přírodovědec James Croll propojil tyto výpočty s myšlenkou, že by astronomické cykly mohly způsobovat doby ledové, nedokázal je však přesně matematicky vyjádřit. Skutečný průlom přinesl až v první polovině 20. století srbský matematik a klimatolog Milutin Milanković. Zasvětil 30 let života extrémně složitým ručním výpočtům a vytvořil precizní matematický model klimatu založený na množství dopadajícího slunečního záření. Definitivně tak doložil, že právě tyto mechanismy jsou hlavním spouštěčem pleistocenních dob ledových a meziledových.

Milankovićovo vrcholné dílo však výrazně předběhlo svou dobu. Přestože byly jeho propočty dopadajícího slunečního záření přesné, tehdejší věda postrádala metody, kterými by bylo možné převratný model reálně ověřit. Kvůli nedostatku přímých důkazů přijímala akademická obec jeho model se značnou skepsí a v následujících dekáдах jej odborný svět téměř zcela odmítl. Většina tehdejších meteorologů a klimatologů byla přesvědčena, že drobné výkyvy v množství slunečního záření vyvolané astronomickými cykly jsou příliš slabé na to, aby dokázaly spustit nebo ukončit globální dobu ledovou. Podpory se nedočkal ani ze strany geologů, podle kterých byla Milankovićova teorie v rozporu s pozorováními uloženin alpského zalednění. Také nové datovací metody v 50. letech 20. století se zpočátku zdály být s astronomickou teorií v přímém rozporu. Spravedlnosti a úplné rehabilitace se tak Milanković dočkal až dlouho po své smrti – k definitivnímu uznání jeho teorie došlo díky novým vědeckým metodám až v 70. letech 20. století.

Klíčovým milníkem ve výzkumu klimatu se stalo publikování přelomové studie Pacemaker of the Ice Ages (Spouštěč dob ledových) v r. 1976, za níž stáli vědci James Hays, John Imbrie a Nicholas Shackleton. Autoři dokázali to, co Milanković za svého života udělat nemohl – objevili spolehlivý

„archiv“ starého klimatu v podobě hlubokomořských sedimentů z období pleistocénu. K vědeckému bádání je zpřístupnil až mezinárodní projekt hlubokomořského vrtání (Deep Sea Drilling Project) prováděný z paluby speciální lodi Glomar Challenger. Získané profily vrtného jádra obsahovaly mikroskopické schránky dírkonošců (foraminifer), které v sobě uchovaly záznam o změnách izotopových poměrů kyslíku $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Poměr těchto „těžkých“ a „lehkých“ izotopů funguje v paleoklimatologii jako spolehlivý globální teploměr a „glaciometr“, který vědcům prozrazuje teplotu oceánské vody v dané historické epoše a celkový objem ledovců na pevnině. Aby vědci dokázali určit přesné stáří jednotlivých vrstev sedimentu, zkombinovali analýzu schráněk s nezávislými metodami radioizotopového datování významných geologických událostí zastižených ve vrtech, např. záznamy o přepólování magnetického pole Země. Takto časově kalibrovaná izotopová data kyslíku byla podrobena spektrální analýze časových řad, která ukázala, že klimatické cykly zjištěné v období pleistocénu ve vrtech přesně kopírují Milankovićovy periodicity v délce 23 tisíc, 41 tisíc a 100 tisíc let. Původní hypotéza se tak díky nezvratným důkazům definitivně stala testovatelnou a přijímanou teorií.



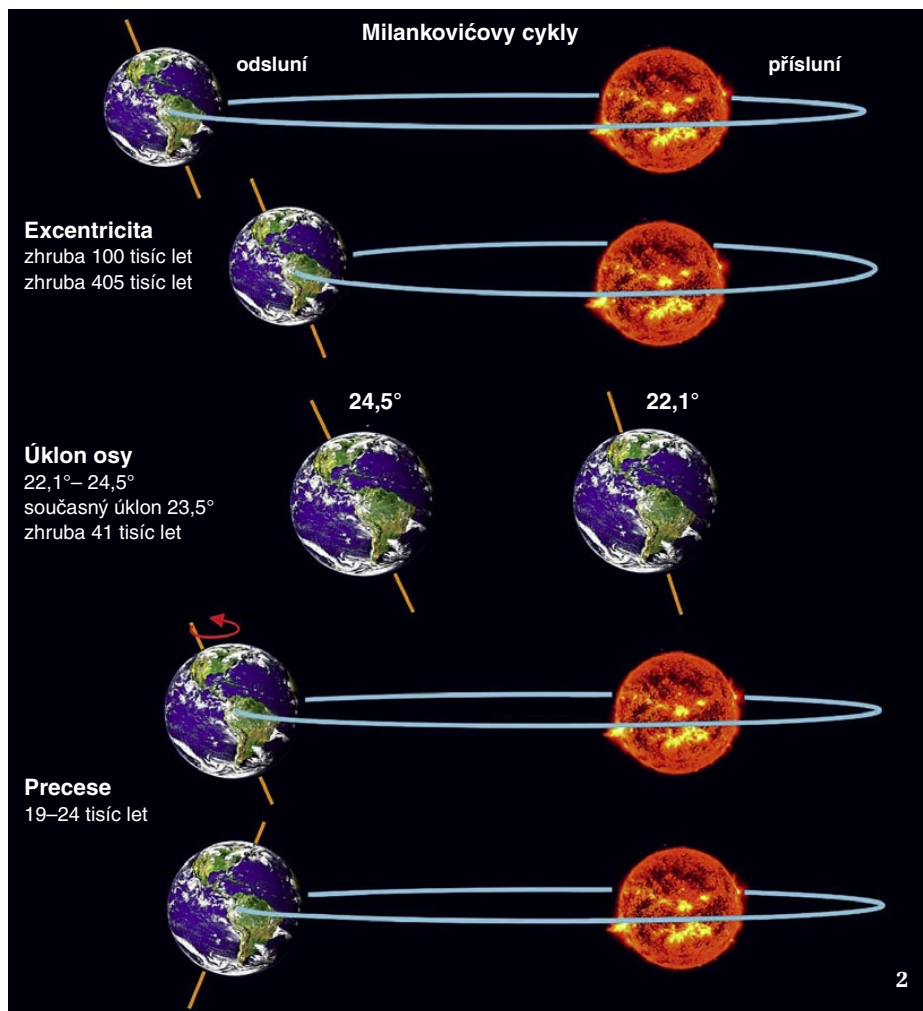
Milutin Milanković:

géníus, který předběhl svou dobu

Srbský matematik, astronom, klimatolog a stavební inženýr Milutin Milanković (28. května 1879 – 12. prosince 1958, obr. 1) se narodil v rakousko-uherské pohraniční obci Dalj (dnešní Chorvatsko) do srbské rodiny. V r. 1896 odešel studovat stavební inženýrství na Technickou univerzitu ve Vídni (TU Wien), kde v r. 1902 úspěšně promoval a o dva roky později obhájil disertační práci o teorii tlakových křivek. Od r. 1905 pracoval ve vídeňské stavební firmě. Své teoretické znalosti si v praxi ověřil při stavbě mostů, přehrad a dalších objektů po celém Rakousko-Uhersku. Proslavil se řadou originálních řešení, včetně zcela nové technologie železobetonových stropů, kterou chránilo několik patentů.

Zásadní životní obrat nastal 1. října 1909. Milanković se rozhodl opustit lukrativní inženýrskou kariéru a přijal nabídku Bělehradské univerzity na místo docenta na katedře aplikované matematiky, jež propojovala racionální mechaniku, nebeskou mechaniku a teoretickou fyziku. Původní profesí inženýra však zcela neopustil – v Srbsku, kde v r. 1910 získal občanství, souběžně pokračoval v projektování a konstrukci staveb. Kolem r. 1912 se začal zajímat o kosmickou klimatologii. Inspirován staršími teoriemi, které tvrdily, že klima ovlivňuje poloha Země vůči Slunci, se Milanković rozhodl vytvořit exaktní matematický model pozemského klimatu. V letech 1912–17 publikoval 7 článků o matematických teoriích klimatu na Zemi i na jiných planetách. Formuloval přesný numerický klimatologický model, který umožňoval rekonstruovat minulost a předpovídat budoucnost. Tím zavedl astronomickou teorii klimatu jako obecnou matematickou teorii oslunění a položil pevné základy pro svou další poválečnou práci, v níž pokračoval již jako řádný profesor Bělehradské univerzity.

Milankovićovy výzkumy, zejména jeho křivka oslunění za posledních 130 tisíc let, zaujaly významného klimatologa Vladimira Köppena a geofyzika Alfreda Wegenera. Na jejich popud rozšířil Milanković výpočty na období 650 tisíc let do minulosti. Přijal také Köppenovo doporučení, že klíčovým spouštěčem zalednění jsou chladná léta. Vyvinul matematický aparát, který dokázal přesně spočítat intenzitu oslunění pro jakoukoli zeměpisnou šířku a roční období. Následně strávil 100 dní čistými výpočty. Výsledkem byl podrobný graf změn



1 Milutin Milanković, 20. léta 20. století. Autor snímku neznámý
 2 Milankovičovy cykly jsou periodické změny v příjmu slunečního záření zemským tělesem a jeho distribuci v různých zeměpisných šířkách. Souvisejí s téměř pravidelně se opakujícími změnami výstřednosti oběžné dráhy Země (excentricity), úklonu zemské osy a rotačního pohybu zemské osy po kuželové ploše (precese). V geologické historii Země vedly ke klimatickým změnám, např. ke střídání dob ledových a meziledových v pleistocénu. Poměr velikostí Země a Slunce není z důvodu zobrazení zachován. Podle: S. Opluštil a kol. (2022)

slunečního záření na 55°, 60° a 65° severní šířky – tedy v oblastech, kde docházelo k nejzásadnějším událostem čtvrtohorního zalednění. Jeho celoživotní úsilí vyvrcholilo v r. 1941 vydáním rozsáhlé monografie *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem* (Kánon oslunění Země a jeho aplikace na problém dob ledových). Tato kniha podrobně shrnuje jeho výzkum a přinesla kompletní matematické vysvětlení klimatických cyklů.

Principy teorie

Milankovičova teorie stojí na třech základních parametrech orbitální geometrie Země, které se v čase mění v důsledku gravitačního působení ostatních planet a těles sluneční soustavy. I když Milanković tyto parametry sám neobjevil a nepopsal (do svých výpočtů o oslunění zahrnoval výpočty o změnách orbitálních parametrů

publikované ostatními učenými), dal změněnám matematicky doložený klimatický význam v podobě konzistentního matematického modelu. Milanković tak lze právem považovat za otce paleoklimatického modelování. Parametry excentricity, úklonu zemské osy a precese dnes souhrnně označujeme jako Milankovičovy cykly (obr. 2). Jak tyto cykly fungují?

● Excentricita (výstřednost dráhy) – cyklus zhruba 100 tisíc a 405 tisíc let

Oběžná dráha Země kolem Slunce má tvar elipsy, kde Slunce spočívá v jednom z ohnisek. Tvar elipsy není stabilní; její excentricita kolísá od 0,005 do 0,067. Tyto změny, při kterých se mění délka vedlejší poloosy, probíhají v pravidelných cyklech s periodou 405 tisíc let (dlouhá excentricita) kombinovanou s kratší periodou přibližně 100 tisíc let (krátká excentricita). Při maximální excentricitě se rozdíl ve vzdálenosti zvýší na přibližně 10–12 %, což způsobuje, že v přisluní (periheliu) dopadá na Zemi o 23–24 % více záření než v odsluní (afeliu). Při současné hodnotě výstřednosti Země přijímá o asi 6,8 % více sluneční energie v periheliu než v afeliu.

● Oblikvita (sklon zemské osy) – cyklus zhruba 41 tisíc let

Sklon zemské osy k rovině ekliptiky kolísá v rozmezí přibližně od 22,1° do 24,5°. Současný úklon osy 23,44° leží téměř uprostřed tohoto intervalu. Maximální hodnoty bylo naposledy dosaženo před 8,7 tisíce let. Úklon osy má zásadní vliv na sezonní změny v insolaci mezi severní a jižní polokoulí, a je tudíž zodpovědný za střídání ročních období.

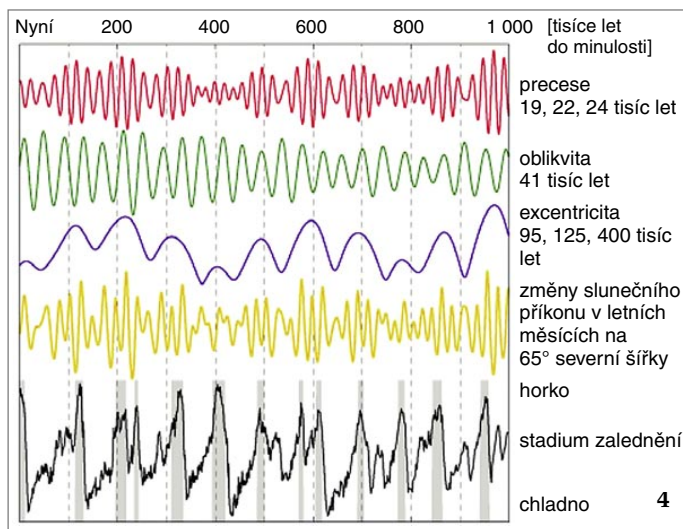
Čím je úklon vyšší, tím více slunečního záření dopadá do vyšších zeměpisných šířek a napomáhá tání ledovců. Nižší sklon osy znamená mírnější léta ve vysokých šířkách, což je ideální pro růst ledovců, neboť sníh ze zimy nestihne v chladném létě roztát. Střídání glaciálů a interglaciálů v intervalu 41 tisíc let, odpovídající změnám v úklonu zemské osy, bylo skutečně potvrzeno pro starší polovinu pleistocénu. Přibližně před jedním milionem let se ale začal prosazovat cyklus excentricity s periodou 100 tisíc let.

● Precese (kolísání zemské osy) – cyklus zhruba 19 tisíc až 24 tisíc let

Při precesním pohybu opisuje rotující zemská osa kuželovou plochu s periodou přibližně 24 tisíc let. Precese určuje, v jakém bodě oběžné dráhy (zda v přisluní, či odsluní) nastává na dané polokouli léto nebo zima. Pokud na severní polokouli přichází léto v době, kdy je Země nejbližší Slunci (v periheliu), jsou léta horká a zimy studené. Pokud však léto nastává v afeliu (nejdále od Slunce), jsou teplotní rozdíly mezi sezonami mírnější. V současnosti vychází přisluní během zimy a odsluní během léta na severní polokouli. Tato kombinace vede k mírnějším létům i mírnějším zimám a snižuje tak rozdíly mezi ročními obdobími severní polokoule, zatímco na jižní polokouli tyto rozdíly zvětšuje. Situace se obrátí asi za 12 tisíc let, kdy se úklon osy změní v opačný a léto na severní polokouli nastane během přisluní. Vliv tohoto astronomického cyklu na insolaci a klima závisí na excentricitě a s rostoucí hodnotou výstřednosti se sezonní kontrast v oslunění mezi severní a jižní polokoulí zvyšuje. Rozdíly v insolaci způsobené precesním cyklem se pohybují kolem 5–7 %. Ačkoli se nám mohou zdát malé, jsou zodpovědné za poměrně velké rozdíly v úhrnu srážek v hodnotách 26–46 % v důsledku posunu monzunové cirkulace z oceánu na pevninu a naopak.

Pro vznik ledovců je zásadní studené léto ve vysokých severních zeměpisných šířkách (kolem 65° severní šířky) způsobující, že zimní sněhová pokrývka přežije letní měsíce. Toho je dosaženo při maximální hodnotě excentricity. Ta sice glaciál sama nespustí, ale funguje jako zesilovač efektu precese. Pokud je excentricita vysoká, afélium je extrémně daleko od Slunce. Kombinace severního léta v takto vzdáleném afeliu znamená, že severní polokoule dostává v létě historické minimum energie. Ideální pro vznik glaciálů je výše uvedená kombinace s minimálním úklonem zemské osy, což způsobuje, že Slunce v polárních oblastech svítí pod ostřejším úhlem a je tam stabilně chladněji po celý rok.

V průběhu času byly Milankovičovy cykly kromě již zmíněných hlubokomořských sedimentů zjištěny i v dalších typech klimatických archivů. Nejpresnějšími archivem pleistocenních glaciálů a interglaciálů jsou dnes vrtná jádra z grónského a zejména antarktického ledovce. Každá vrstva sněhu, která v minulosti napadla a tlakem se přeměnila v led, v sobě uzavírá vzorek tehdejší atmosféry. Nejnovější evropský projekt Beyond EPICA dokončil analýzu vrtné hlubokého 2,8 km, který poskytuje nepřetržitý klimatický záznam sahající 1,2 milionu let do minulosti. Z analýzy ledu dokážou vědci s velkou přesností rekonstruovat složení a teplotu atmosféry



v době vzniku ledu, sopečnou aktivitu, změny v obsahu prachu v ovzduší i sluneční a kosmickou aktivitu.

Ledovcová jádra poskytla definitivní a nezvratný důkaz o správnosti Milankovičovy teorie. Když vědci vynesli data z antarktických vrtů, jako jsou Vostok a EPICA, do grafu, zjistili, že křivky teploty a koncentrace skleníkových plynů (oxidu uhličitého a metanu) přesně kopírují rytmus Milankovičových astronomických cyklů. Frekvenční analýza dat o paleoteplotě získaná z izotopových poměrů $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ vzduchu uzavřeného v ledu objevila tři naprosto dominantní cykly. Intervalu za posledních 800 tisíc let dominoval cyklus 100 tisíc let odpovídající excentricitě. Následoval výrazný cyklus změn teplot o délce 41 tisíc let, který přesně kopíruje kolísání úklonu zemské osy (oblikvity). Menší pravidelné výkyvy s periodou 23 tisíc a 19 tisíc let odpovídají cyklu precese. Tato shoda frekvencí vylučuje, že by střídání dob ledových bylo náhodné. Astronomické hodiny vesmíru prokazatelně řídí klima na Zemi (obr. 4).

Řešení záhady „zesilovače“ – role oxidu uhličitého a metanu

Kritici Milankovičovy hypotézy namítali, že změny příkonu slunečního záření (insolace) jsou příliš slabé, aby „zmrazily“ celou planetu. Ledovcová jádra tuto záhadu vyřešila. Vrtná jádra ukázala, že Milankovičovy cykly fungují jako spouštěč, ale samotný glaciál pohání přírodní zpětná vazba.

- Oběžná dráha se změní a mírně ochladí severní léto.

- Ochlazené oceány začnou pohlcovat více CO_2 z atmosféry, což vede k dalšímu ochlazení a na pevnině přibude sníh. Současně se kvůli sněhu a menšímu skleníkovému efektu zvýší albedo a zemský povrch přijímá méně sluneční energie.

- Ledová jádra z té doby ukazují drastický propad obsahu CO_2 z 280 na 180 ppm (parts per million, miliontiny) a úbytek metanu.
- Tento pokles skleníkových plynů oslabil skleníkový efekt a ochladil celou planetu o dalších několik stupňů, což vedlo k dalšímu zvětšení objemu ledovců.

Milankovičova teorie rovněž předpovídá, že během glaciálů se kvůli chladu a přesunu srážek změní globální cirkulace vzduchu. Analýza mikročásteček prachu z ledovcových jader ukázala, že v obdobích minimální insolace stouplo množství

prachu v ledu až 50násobně. To potvrzuje, že v chladných fázích cyklů byla Země extrémně větrná, suchá a pouště se rozšiřovaly, přesně jak předpovídaly klimatické modely orbitálních změn.

Astronomické hodiny zapsané v kameni

Kromě ledovců a hlubokomořských sedimentů, které nám poskytují záznamy pouze pro nejmladší historii Země (přibližně poslední desítky milionů let), byly Milankovičovy cykly úspěšně identifikovány v celé řadě dalších geologických archivů od hlubokého prekambria (před 2,5 miliardami let) až po geologicky nedávný pleistocén. Věda zabývající se studiem těchto cyklů v horninách se nazývá cyklostratigrafie.

Páskované železné rudy (BIF – Banded Iron Formations) jsou klíčovým archivem pro období prekambria. Tyto specifické horniny vznikaly v dnes již neexistujících oceánech předtím, než se atmosféra plně nasýtila kyslíkem. Tvoří je ostře ohraničené střídající se proužky tmavých oxidů železa (magnetitu, hematitu) a světlého křemene (páskovaného křemene/jaspisu). Tloušťka a frekvence těchto proužků v sobě nesou zakódovaný orbitální signál. V r. 2022 vědci analyzovali páskované železné rudy souvrství Brockman v západní Austrálii staré 2,46 miliardy let (obr. 5). Zjistili, že tehdejší precesní cyklus měl periodu jen kolem 11 tisíc let (oproti dnešním 21 tisícům), protože Měsíc byl blíže k Zemi, Země rotovala rychleji a den trval jen 17 hodin.

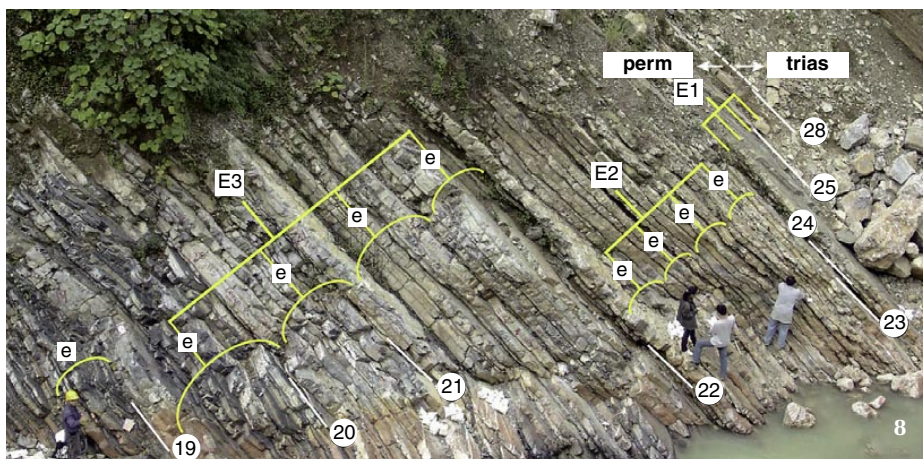
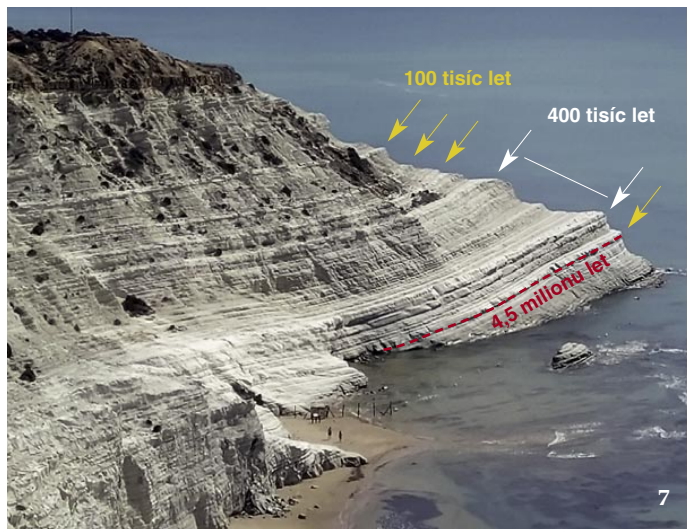


3 Zakrytá sněhová jáma v Antarktidě je osvětlena slunečním světlem prosávajícím sněhem z přilehlé jámy. Tmavé vrstvy představují zimní sníh a světlé vrstvy letní sníh. Chemikálie a plyny zachycené ve vrstvách zaznamenávají klimatické podmínky a používají se k rekonstrukci toho, jak a proč se klima v minulosti měnilo. Tato jáma byla součástí projektu ledových jader WAIS Divide, který získal nejpodrobnější záznam o atmosférickém oxidu uhličitém za posledních 68 tisíc let.

4 Jak to funguje dohromady? Excentricita působí jako „zesilovač“ a dirigent. Když je oběžná dráha Země nejvíce eliptická, extrémně se zesílí vliv precese. V kombinaci se správným sklonem osy pak stačí malý impulz (chladné léto na severní polokouli), aby sněh přes léto neroztál. Bílá plocha začne odrážet více slunečního světla zpět do vesmíru (albedo efekt) a spustí se lavinový efekt, který Zemi uvrhne do doby ledové. Časové fluktuace jednotlivých proměnných jsou zde vyneseny v různých měřítkách a slouží jen pro kvalitaturní porovnání.

5 Páskované železné rudy souvrství Brockman v národním parku Karijini, Fortescue Falls, Západní Austrálie, 2,49 až 2,46 miliardy let. Foto G. Churchard

6 Cykly precesního původu zaznamenané v sedimentech teplického souvrství české křídové pánve byly nedávno odhaleny frekvenční analýzou. Lom Úpohlavy u Lovosic. Foto D. Uličný



7 Příklad Milankovičových cyklů zaznamenaný v hlubokomořských sedimentech pliocenního stáří v pobřežních útesech v Punta di Miata na Sicílii. Převzato z Wikimedia Commons, v souladu s podmínkami použití (obr. 1, 3–5 a 7 – zde výřez a doplněny popisky), plně odkazy k přejatým obr. najdete na webu Živý. 8 Souvrství dalong stáří svrchního permu (hranice perm/trias, 251,9 milionu let) v profilu Shangsi v Číně. Tenké precesní rytmy jsou seskupeny do cyklů excentricity 100 tisíc let (e) a ty následně do cyklů dlouhé excentricity 405 tisíc let (E). Převzato: H. Wu a kol. (2013), upraveno

Významné archivy pocházejí také z mladšího paleozoika, kdy Zemi postihla jedna z nejdelších dob ledových za celých 540 milionů let trvající fanerozoikum. Během závěrečné fáze formování Pangey se v její jižní části, superkontinentu Gondwana vytvořily obří ledovce, jejichž rozloha se měnila v rytmu Milankovičových cyklů. Změny v objemu kontinentálních ledovců se projevovaly pravidelnými zdvihy a poklesy mořské hladiny přesahujícími v některých obdobích až 100 m. Oscilace vedly k pravidelným posunům březní linie o desítky až stovky kilometrů. Místa však přesahovala i tisíce km. Jejich záznamem jsou cyklotémy – cyklicky se opakující sled sedimentů ukládaný z části v mělkém moři, z části na pevnině (blíže v Živě 2021, 5: 207–212). I když dešifrace astronomického signálu cyklotém není triviální (astronomicky řízené cykly bývají v cyklotémách smíchány

s neastronomickým „šumem“), s pomocí přesného radioizotopového datování vrstviček sopečného popela se podařilo Milankovičovy cykly zjistit i v tomto typu záznamu, např. v doněcké či illinoiské pánvi nebo u nás na Ostravsku. Odlišným mechanismem vznikaly cyklotémy v pánvích kontinentálních mimo dosah mořských záplav v období interglaciálu. Zde se Milankovičovy cykly zapsaly do sedimentárního archivu prostřednictvím střídání humidního a sezonně suchého podnebí doprovázeného změnou srážkového režimu.

Během humidního podnebí byly srážky více či méně rovnoměrně rozloženy v průběhu celého roku, což podporovalo rozvoj mohutných rašelinišť. Naopak během suššího podnebí měly sezonní charakter, zatímco po zbytek roku krajina převážně vysychala. Tyto změny měly zásadní dopad na hustotu vegetačního pokryvu, který bránil erozi, ovlivňoval intenzitu chemického zvětrávání a v důsledku i množství a zrnitost sedimentu přinášeného do sedimentárních pánví ve vnitrozemí superkontinentu Pangea. Sedimenty vlhčí a sušší části cyklu (většinou krátké excentricity) se tak liší charakterem svých uloženin a v profilu se cyklicky opakují. V období permu je následkem postupující aridifikace celá řada archivů vázána na suché (aridní) oblasti subtropů, kde docházelo v závislosti na oběžné dráze k periodickému vysychání uzavřených mořských zálivů. Příkladem je souvrství Castile v Texasu staré asi 250 milionů let, kde se pravidelně střídají vrstvy evaporitů (sádrovce, anhydritu a halitu) s organickými břidlicemi. Až několik tisíc metrů mocné

souvrství vykazuje nepřerušovaný precesní rytmus trvající stovky tisíc let.

Milankovičovy cykly byly identifikovány i v archivech z období mezozoika a raného kenozoika, kdy na Zemi vládlo skleníkové podnebí, které ledovcům příliš nepřeje. Skleníkové klima tehdy panovalo kvůli extrémně intenzivní sopečné činnosti spojené s rozpadem superkontinentu Pangea, která do atmosféry uvolnila obrovské množství oxidu uhličitého. Příkladem sedimentárních archivů bývají souvrství rytmicky se střídajících vrstev vápenců a slínovců nebo břidlic (obr. 6–8). Vápencová vrstvička představuje období vysoké hladiny moře a teplého klimatu, zatímco měkký slínovcový nebo jílovitý vložek značí pokles hladiny, ochlazení a zvýšený přísun prachu z pevniny. Příkladem jsou křídové vápence v Itálii nebo Severní Americe vykazující až metronomicky přesné střídání vrstev ovlivněné cyklem excentricity s periodou 405 tisíc let. Podobně i v sedimentární výplni české křídové pánve se podařilo zachytit velmi dobře zachovaný precesní signál. Tento cyklus ovlivňoval sezonnost, intenzitu říčního odtoku (srážek) a s tím spojený přírůstek terigenního (pevninského) materiálu do pánve. V hlubokomořských usazeninách tvořených směsí jemnozrnného materiálu spláchnutého z pevniny (např. jílu a prachu) a mikroskopických schránek mořských organismů (převážně foraminifer a nanoplanktonu) se projevuje rytmickým střídáním vrstev bohatších na vápnitou složku a vrstev jílovitějších.

Závěr

Ačkoli není Milanković otcem astronomické teorie, jak se někdy v literatuře mylně uvádí – tyto dlouhodobé variace ve změnách orbitálních parametrů sám nevypočítával, ale hojně je používal k výpočtu přicházejícího slunečního záření – rozšířil naše chápání kvartérních klimatických změn. Jeho teorie oslunění je ve své podstatě platná po téměř století od vzniku. Těžko bychom našli před Milankovićem jiného vědce, který by dosáhl v matematickém modelování klimatu založeném na výpočtech dopadajícího slunečního záření takový pokrok. S přibližně stovkou vědeckých prací si tak Milutin Milanković bezesporu zaslouží titul otce paleoklimatického modelování.

Použitá literatura uvedena na webu Živý.